

文章编号 1005-0388(2011)05-0967-06

# 基于均匀圆阵的近场源三维参数估计

胡增辉<sup>1,3</sup> 朱炬波<sup>2</sup> 何 峰<sup>1</sup> 梁向农<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073; 3. 酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 732750)

**摘 要** 基于均匀圆阵, 提出一种近场源距离-方位角-俯仰角联合估计算法。利用阵元观测数据, 构造一组高阶累积量矩阵, 通过矩阵联合对角化技术得到阵列流形矩阵的估计。根据阵列流形矩阵的估计以及近场和远场条件下方位角相同的结论, 获得方位角的估计。利用阵列流形矩阵和方位角的估计, 得到距离和俯仰角的估计。该方法无需二维频域峰值搜索或参数配对。计算机仿真验证了算法的有效性。

**关键词** 波达方向; 均匀圆阵; 联合对角化; 近场

**中图分类号** TN911.7; TN974

**文献标志码** A

## 1. 引 言

与均匀线阵(ULA)相比, 均匀圆阵(UCA)具有许多优异的特性, 如能同时估计信号的方位角和俯仰角、测向精度随方位角变化不明显等。基于均匀圆阵的波达参数估计一直是阵列信号处理领域的研究热点。

目前, 基于均匀圆阵的波达参数估计算法<sup>[1-4]</sup>的研究主要集中在二维波达角估计上, 即方位角和俯仰角的估计。然而, 当源信号位于圆阵的 Fresnel 区域<sup>[5]</sup>内时, 远场条件下的平面波前假设不再成立。在此情形下, 除方位角和俯仰角外, 源信号到圆阵的距离也需要估计。然而, 到目前为止, 基于均匀圆阵的近场参数估计算法非常少。LEE<sup>[6]</sup>等人利用路径跟踪技术, 提出了一种近场源三维参数估计算法。该算法首先利用二维多重信号分类(MUSIC)算法, 得到方位角和俯仰角的初始估计, 然后利用路径跟踪技术, 多次搜索得到距离、方位角和俯仰角的联合估计。然而, 二维 MUSIC 算法需要进行二维频域搜索, 计算量非常大, 且其估计精度受搜索步长的影响。

高阶累积量<sup>[7-8]</sup>在空间谱估计中有着广泛的应用, 它能够抑制高斯噪声。在文献[6]算法结论的基础上, 提出一种基于高阶累积量矩阵联合对角化<sup>[9-10]</sup>的均匀圆阵近场源三维参数估计算法, 该算

法无需进行二维频域搜索。

## 2. 理论分析

首先介绍相关信号模型及假设条件, 然后构造一组高阶累积量矩阵, 通过累积量矩阵联合近似对角化得到阵列流形矩阵的估计。利用阵列流形矩阵的估计及文献[6]的结论, 首先得到方位角的精确估计和距离、俯仰角的粗略估计。为提高估计精度, 利用最小二乘方法来获得更高精度的估计。

### 2.1 信号模型

考虑由  $N$  个各向同性阵元组成的均匀圆阵(如图 1 所示), 以均匀圆阵所在的平面为  $x$ - $y$  平面, 圆阵圆心为坐标原点, 圆阵半径为  $R$ 。  $M$  个具有相同中心频率  $f_c$  的独立近场窄带信号入射阵列, 入射参数为  $(r_k, \theta_k, \phi_k)$ ,  $k=1, \dots, M$ 。为避免模糊, 通常假设  $\theta_k \in [0, \pi/2)$ ,  $\phi_k \in [0, 2\pi)$ 。

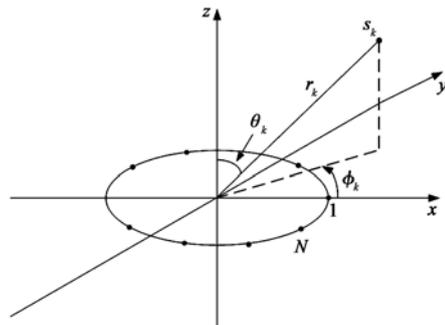


图 1 均匀圆阵结构示意图

收稿日期: 2010-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 60902092)

联系人: 胡增辉 E-mail: zhunudt@163.com

以坐标原点处的虚拟阵元为相位参考点,  $t$  时刻第  $i$  个阵元的输出为

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^M a_i(r_k, \theta_k, \phi_k) \cdot s_k(t) + n_i(t), \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, N$$

式中:  $s_k(t)$  为第  $k$  个源信号;  $n_i(t)$  表示第  $i$  个阵元上的加性高斯白噪声;  $a_i(r_k, \theta_k, \phi_k)$  为第  $k$  个源信号对应的导向矢量  $\mathbf{a}(r_k, \theta_k, \phi_k)$  的第  $i$  个元素:

$$\mathbf{a}(r_k, \theta_k, \phi_k) = [\exp\{-j\omega(r_k - R_1(r_k, \theta_k, \phi_k))\}, \dots, \exp\{-j\omega(r_k - R_N(r_k, \theta_k, \phi_k))\}]^T \quad (2)$$

式中:  $\omega = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为信号的载波波长, 上标  $T$  表示向量和矩阵的转置,  $R_l(r_k, \theta_k, \phi_k)$  为第  $k$  个源信号到第  $l$  个阵元的距离, 且有

$$R_l(r_k, \theta_k, \phi_k) = \sqrt{r_k^2 + R^2 - 2Rr_k\rho_l(\theta_k, \phi_k)} \quad (3)$$

其中  $\rho_l(\theta_k, \phi_k) = \sin\theta_k \cos(\phi_k - (l-1)\theta_0)$ ,  $l = 1, \dots, N$ ,  $\theta_0 = 2\pi/N$ .

对于近场源, 利用 Fresnel 近似,  $R_l(r_k, \theta_k, \phi_k)$  可以近似为

$$R_l(r_k, \theta_k, \phi_k) \simeq r_k \left[ 1 - \rho_l(\theta_k, \phi_k) \frac{R}{r_k} + \frac{1 - \rho_l^2(\theta_k, \phi_k)}{2} \left( \frac{R}{r_k} \right)^2 + \frac{\rho_l(\theta_k, \phi_k) - \rho_l^3(\theta_k, \phi_k)}{2} \left( \frac{R}{r_k} \right)^3 \right] \quad (4)$$

式(1)用矩阵形式表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_N(t)]^T$  为接收信号矢量;  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(r_1, \theta_1, \phi_1), \dots, \mathbf{a}(r_M, \theta_M, \phi_M)]$  为阵列流形矩阵;  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_M(t)]^T$  和  $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), \dots, n_N(t)]^T$  分别为源信号矢量和噪声矢量。

对信号模型作如下假设:

1) 源信号是相互统计独立的窄带平稳随机过程, 它们的四阶累积量均不为零。

2) 阵元上的加性噪声是零均值白高斯过程, 噪声与信号之间是相互统计独立的。

3)  $N \geq M$ , 阵列流形矩阵  $\mathbf{A}$  是列满秩的。

4) 相邻阵元间距  $d$  和载波波长  $\lambda$  之间满足如下关系:  $d \leq \lambda/2$ 。

假设 2)~4) 为近场源参数估计问题的一般性假设, 而假设 1) 则是基于高阶累积量的算法所通常需要的假设条件。另外, 源信号数目  $M$  的确定属于信号检测问题, 已有许多文献研究该问题, 因此, 假设  $M$  是已知的。

## 2.2 阵列流形矩阵 $\mathbf{A}$ 的估计

定义阵元接收数据的四阶累积量<sup>[9]</sup>

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_i &= \text{cum}\{x_i, x_i^*, x, x^H\} \\ &= E\{x_i x_i^* \mathbf{x} \mathbf{x}^H\} - E\{x_i x_i^*\} E\{\mathbf{x} \mathbf{x}^H\} - \\ &\quad E\{x_i \mathbf{x}\} E\{x_i^* \mathbf{x}^H\} - E\{x_i^* \mathbf{x}\} E\{x_i \mathbf{x}^H\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, N$$

式中:  $x_i^*$  表示标量  $x_i$  的共轭;  $\mathbf{x}^H$  表示矢量  $\mathbf{x}$  的转置共轭;  $E\{x\}$  表示随机变量  $x$  的期望。

由式(5)及假设 H1 和 H2,  $\mathbf{C}_i$  具有如下形式

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{A} \mathbf{\Gamma}_i \mathbf{A}^H \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{\Gamma}_i = \text{diag}\{c_{s1} | \mathbf{A}(i, 1) |^2, \dots, c_{sM} | \mathbf{A}(i, M) |^2\}$ ,  $\text{diag}\{z_1, z_2\}$  表示以  $z_1$  和  $z_2$  为对角线元素的对角矩阵,  $c_{s_i} = \text{cum}\{s_i, s_i^*, s_i, s_i^*\}$  为源信号  $s_i(t)$  的四阶累积量;  $\mathbf{A}(i, k)$  表示  $\mathbf{A}$  的第  $i$  行第  $k$  列元素。

由于  $\mathbf{A}$  是满秩的, 对任意的  $1 \leq i \neq k \leq M$ , 至少存在  $m \in \{1, \dots, N\}$ , 使得  $\mathbf{\Gamma}_m$  的第  $i$  个和第  $k$  个对角线元素不相同。因此, 可以应用矩阵联合对角化技术到  $\{\mathbf{C}_i\}_{i=1}^N$  来得到  $\mathbf{A}$  的估计。

矩阵联合对角化是指, 寻找满足一定约束条件(如范数为某个常数)的非零矩阵  $\mathbf{V}$ , 使得式(8)定义的代价函数值最小。

$$f(\mathbf{V}) = \sum_{i=1}^N \text{off}\{\mathbf{V}^H \mathbf{C}_i \mathbf{V}\} \quad (8)$$

式中  $\text{off}\{\mathbf{B}\}$  表示矩阵  $\mathbf{B}$  非对角线元素绝对值平方和。

文中利用文献[11]中的非正交联合对角化算法得到  $\mathbf{A}$  的估计。

理想情况(无噪声, 源信号之间严格统计独立)下,  $\mathbf{A}$  的估计  $\tilde{\mathbf{A}}$  与  $\mathbf{A}$  之间满足

$$\tilde{\mathbf{A}} \simeq \mathbf{A} \mathbf{P} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为一对角线元素非零的对角矩阵, 代表估计的尺度不确定性;  $\mathbf{P}$  为一置换矩阵, 代表顺序不确定性。

置换矩阵  $\mathbf{P}$  对于结果的影响可以忽略。因为  $\mathbf{A}$  每列可由一组不完全相同的  $(r, \theta, \phi)$  表示。得到  $\tilde{\mathbf{A}}$  后, 由  $\tilde{\mathbf{A}}$  的每列可得到一组  $(r, \theta, \phi)$  的估计。因此, 后文不考虑  $\mathbf{P}$  的影响, 即假设

$$\tilde{\mathbf{A}} \simeq \mathbf{A} \mathbf{\Lambda} \quad (10)$$

## 2.3 方位角估计

文献[6]指出, 无论距离和俯仰角取值如何, 近场方位角等于距离无穷远时的方位角。因此, 利用该结论及已有的远场均匀圆阵二维波达角估计算法, 结合式(10)的  $\tilde{\mathbf{A}}$ , 可以首先得到较为精确的方位角估计。

令  $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_M\}$ , 记  $\tilde{\mathbf{A}}$  的第  $k$  列为  $\tilde{\mathbf{a}}_k$ , 则

$$\tilde{\mathbf{a}}_k \simeq \lambda_k \mathbf{a}_k(r_k, \theta_k, \phi_k) \quad (11)$$

定义  $(N-1) \times 1$  维矢量  $\mathbf{b}_k(l) = \tilde{\mathbf{a}}_k(l+1)/\tilde{\mathbf{a}}_k(l)$ , 将式(11)及式(2)代入  $\mathbf{b}_k$  的定义式中可得

$$\mathbf{b}_k(l) \simeq \exp\{j\omega(R_{l+1}(r_k, \theta_k, \phi_k) - R_l(r_k, \theta_k, \phi_k))\} \\ l = 1, \dots, N-1 \quad (12)$$

由文献[6]的结论, 令  $r_k \rightarrow \infty$ , 由于  $\omega | (R_{l+1}(r_k, \theta_k, \phi_k) - R_l(r_k, \theta_k, \phi_k)) | \leq 2\pi d/\lambda \leq \pi$ , 因此, 由式(12)可以得到

$$\frac{\lambda \arg\{b_k(l)\}}{2\pi R} \simeq \rho_l(\theta_k, \phi_k) - \rho_{l+1}(\theta_k, \phi_k) \\ = -\sin(\theta_0/2) \cdot \sin\theta_k \cdot \\ \sin(\phi_k - (2l-1)\phi_0/2) \quad (13)$$

式中  $\arg\{\cdot\}$  表示相位算子, 其取值范围为  $[-\pi, \pi]$ . 将式(13)用矩阵表示为

$$\mathbf{U}\boldsymbol{\eta} \simeq \boldsymbol{\rho} \quad (14)$$

式中  $\boldsymbol{\eta} = [\sin\theta_k \sin\phi_k, \sin\theta_k \cos\phi_k]^T$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0/2) & -\sin(\theta_0/2) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\frac{2N-3}{2}\theta_0) & -\sin(\frac{2N-3}{2}\theta_0) \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\rho} = -\frac{\lambda}{4\pi R \sin(\theta_0/2)} \begin{bmatrix} \arg\{b_k(1)\} \\ \vdots \\ \arg\{b_k(N-1)\} \end{bmatrix} \quad (15)$$

利用线性最小二乘, 由式(14)可得  $\boldsymbol{\eta}$  的估计, 记为  $\tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}} = (\mathbf{U}^H \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^H \boldsymbol{\rho}$ . 由  $\tilde{\boldsymbol{\eta}}$  可得到方位角  $\phi_k$  的估计为

$$\tilde{\phi}_k = \begin{cases} \arg\{u\}, & \text{if } \tilde{\eta}(1) \geq 0 \\ 2\pi + \arg\{u\}, & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $u = (\tilde{\eta}(2) + j\tilde{\eta}(1)) / \sqrt{\tilde{\eta}^H \tilde{\eta}}, \tilde{\eta}(1)$  和  $\tilde{\eta}(2)$  分别表示  $\tilde{\boldsymbol{\eta}}$  的第一个和第二个元素.

### 2.4 距离和俯仰角估计

由 2.3 节的讨论知, 利用  $\tilde{\mathbf{A}}$  的每列可以得到一个方位角的估计. 本节, 利用  $\tilde{\mathbf{A}}$  以及方位角的估计, 对距离和俯仰角进行估计.

对  $\tilde{\mathbf{A}}$  的第  $k$  列, 由式(12)和(13)有

$$\frac{\arg\{b_k(l)\}}{\omega} \simeq R_{l+1}(r_k, \theta_k, \phi_k) - R_l(r_k, \theta_k, \phi_k) \\ l = 1, \dots, N-1 \quad (17)$$

将式(4)代入式(17)可得

$$\frac{\arg\{b_k(l)\}}{\omega R} \simeq (p_l - p_{l+1}) + \frac{p_l^2 - p_{l+1}^2}{2} \frac{R}{r_k} + \\ \frac{p_l^3 - p_{l+1}^3 - (p_l - p_{l+1})}{2} \left(\frac{R}{r_k}\right)^2 \quad (18)$$

式中:  $p_{l+1} = p_{l+1}(\theta_k, \phi_k); p_l = p_l(\theta_k, \phi_k)$ .

令  $\alpha_k(l) = \cos(\phi_k - (l-1)\theta_0) - \cos(\phi_k - l\theta_0)$ ,  $\gamma_k = \arg\{b_k(l)\}/(\omega R)$ ,  $y_k = \sin\theta_k$ ,  $z_k = R/r_k$ ,  $\beta_k(l) = \cos(\phi_k - (l-1)\theta_0) + \cos(\phi_k - l\theta_0)$ , 式(18)可以简化为

$$\frac{2\gamma_k(l)}{\alpha_k(l)} \simeq y_k(2 - z_k^2) + \beta_k(l) y_k^2 z_k + \\ \frac{\alpha_k^2(l) + 3\beta_k^2(l)}{4} y_k^3 z_k^2 \quad (19)$$

式(19)用矩阵表示为

$$\mathbf{E}_1 \boldsymbol{\eta}_1 \simeq \boldsymbol{\rho}_1 \quad (20)$$

式中:

$$\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} 1 & \beta_k(1) & \frac{\alpha_k^2(1) + 3\beta_k^2(1)}{4} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \beta_k(N-1) & \frac{\alpha_k^2(N-1) + 3\beta_k^2(N-1)}{4} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\boldsymbol{\eta}_1 = \begin{bmatrix} y_k(2 - z_k^2) \\ y_k^2 z_k \\ y_k^3 z_k^2 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\rho}_1 = \begin{bmatrix} \frac{2\gamma_k(1)}{\alpha_k(1)} \\ \vdots \\ \frac{2\gamma_k(N-1)}{\alpha_k(N-1)} \end{bmatrix} \quad (22)$$

由式(20)和  $0 \leq \theta_k < \pi/2$ , 以及源信号位于圆阵的 Fresnel 区域内的约束条件, 利用线性最小二乘方法可以求得  $(r_k, \theta_k)$  的估计值, 记为  $(\tilde{r}_k, \tilde{\theta}_k)$ . 估计过程中, 将由式(16)得到的  $\tilde{\phi}_k$  代替  $\phi_k$ .

综上所述, 由  $\tilde{\mathbf{A}}$  的每一列, 可得到某个源对应的波达参数  $(r_k, \theta_k, \phi_k)$  的估计  $(\tilde{r}_k, \tilde{\theta}_k, \tilde{\phi}_k)$ .

由式(11)~(22)可得到波达参数的粗略估计. 然而, 通常情况下, 距离和俯仰角的估计精度可能不是很高, 原因可能是多方面的

- 1) Fresnel 近似误差可能非常小, 但传播到每个参数上的误差可能非常大;
- 2) 矩阵  $\mathbf{A}$  的估计  $\tilde{\mathbf{A}}$  存在一定的误差;
- 3) 即使方位角  $\phi$  的估计精度很高, 由式(20)估计  $(r, \theta)$  时,  $\phi$  的微小误差也可能被放大.

对  $\mathbf{A}$  的估计  $\tilde{\mathbf{A}}$  的第  $l$  列, 利用  $(r_l, \theta_l, \phi_l)$  的初始估计  $(\tilde{r}_l, \tilde{\theta}_l, \tilde{\phi}_l)$ ,  $(r_l, \theta_l, \phi_l)$  可由如下的约束最小值问题重新估计, 即

$$\begin{cases} \min_{r_l, \theta_l, \phi_l} \mathbf{f}^H(r_l, \theta_l, \phi_l) \mathbf{f}(r_l, \theta_l, \phi_l) \\ \text{s. t. } 0 \leq \theta_l < \pi/2, 0 \leq \phi_l < 2\pi \\ 0.62(8R^3/\lambda)^{1/2} < r_l < 8R^2/\lambda \end{cases} \quad (23)$$

式中  $\mathbf{f}(r_l, \theta_l, \phi_l)$  称为残差函数, 其定义为

$$\mathbf{f}(r_l, \theta_l, \phi_l) = \mathbf{b}_l - \mathbf{d}_l \quad (24)$$

其中  $\mathbf{b}_l$  定义见式(12),  $\mathbf{d}_l$  定义为

$$d_i(k) = a_i(k+1)/a_i(k), k = 1, \dots, N-1 \quad (25)$$

式(23)为典型的约束非线性最小二乘问题,可应用经典的 Gauss-Newton 或 Levenberg-Marquardt 等算法<sup>[12]</sup>进行求解,由式(11)~(22)估计得到的 $(\tilde{r}_i, \tilde{\theta}_i, \tilde{\phi}_i)$ 作为迭代初值。由于迭代初值与真值误差(尤其是方位角)不是非常大,通常迭代几步即可得到收敛值。

### 3. 实验结果分析

本节通过仿真实验验证所提算法的有效性,并将文中算法与文献[6]中算法进行比较,文献[6]中算法简记为 MUSIC-PF。

实验结果为 500 次 Monte-Carlo 实验的平均数据,分别采用均方根误差(RMSE)和归一化均方根误差(NRMSE)作为角度(方位角和俯仰角)和距离的估计精度衡量指标。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{500} \sum_{k=1}^{500} \frac{|\tilde{\theta}(k) - \theta|^2 + |\tilde{\phi}(k) - \phi|^2}{2}}$$

$$\text{NRMSE} = \sqrt{\frac{1}{500} \sum_{k=1}^{500} \left| \frac{\tilde{r}_i(k) - r_i}{r_i} \right|^2} \quad (26)$$

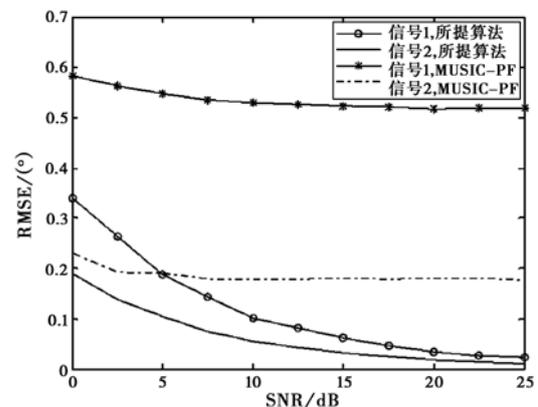
式中: $\tilde{\theta}(k)$ 、 $\tilde{\phi}(k)$ 、 $\tilde{r}_i(k)$ 分别表示第  $k$  次 Monte-Carlo 仿真时俯仰角  $\theta$ 、方位角  $\phi$ 、距离  $r_i$  的估计。

**仿真 1** 研究信噪比(SNR)对波达参数估计精度的影响。源信号选为  $s_i(t) = \exp(j(0.2\pi t + \varphi_i))$ , 其中  $\varphi_i$  为  $[0, 2\pi]$  内的均匀分布,  $\varphi_i$  间相互独立。均匀圆阵由 13 个阵元组成,圆阵半径  $R = \lambda$ , 相邻阵元间距约为  $0.48\lambda$ 。两个源信号的波达参数分别为  $(2.5R, 30^\circ, 45^\circ)$  和  $(3R, 50^\circ, 70^\circ)$ , 采样数为 1024。SNR 从 5 dB 变化到 25 dB 时,角度估计 RMSE 和距离估计 NRMSE 随 SNR 的变化曲线如图 2 所示。MUSIC-PF 算法中,二维 MUSIC 算法搜索步长为  $0.05^\circ$ 。

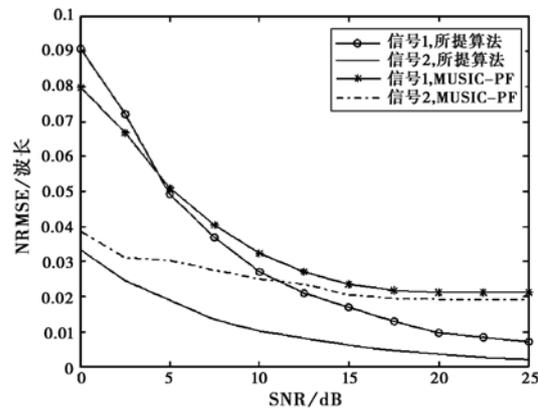
由图 2 可以看到,无论是角度估计还是距离估计,本文算法性能都要优于 MUSIC-PF 算法。原因主要有两个:一是 MUSIC-PF 算法方位角估计误差相对较大,进而影响距离和俯仰角估计精度;二是本文算法为高阶累积量算法,它能抑制高斯白噪声。

**仿真 2** 考虑采样数对参数估计精度的影响。仿真条件同仿真 1, SNR = 15 dB, 采样数从 128 变化到 1024。图 3 为本文算法和 MUSIC-PF 算法参数估计性能随采样数的变化曲线。由图 3 可以看到, MUSIC-PF 算法对采样数不是很敏感。当采样

数较少时,本文算法性能比 MUSIC-PF 算法差,而当采样数较多时,情况则正好相反。主要原因在于

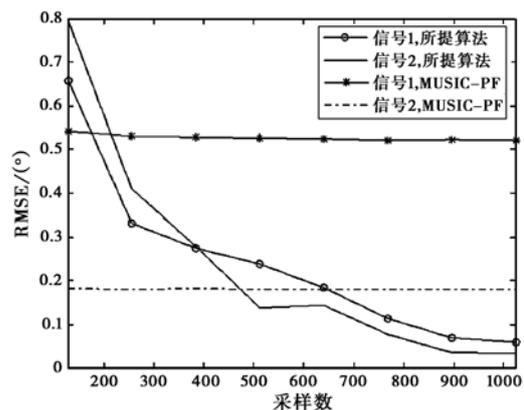


(a) 角度估计 RMSE



(b) 距离估计 NRMSE

图 2 角度估计 RMSE 和距离估计 NRMSE 随 SNR 变化曲线

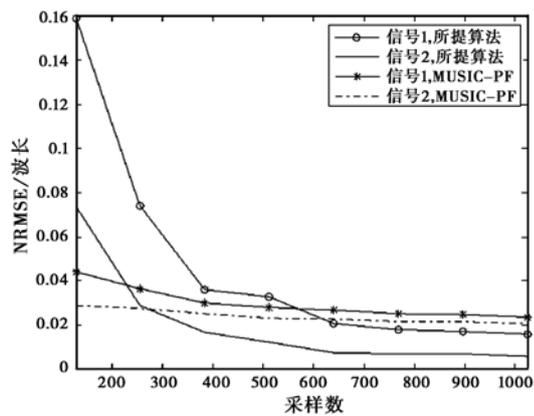


(a) 角度估计 RMSE

MUSIC-PF 算法利用的是二阶统计量,它对采样数不是非常敏感。而本文采用的四阶累积量虽然能抑制高斯白噪声,但是它对采样数比较敏感。

## 4. 结论

基于均匀圆阵,提出了一种基于高阶累积量的



(b) 距离估计 NRMSE

图3 角度估计 RMSE 和距离估计 NRMSE 随采样数变化曲线

近场源距离—方位角—俯仰角估计算法。首先利用阵元接收数据构造一组高阶累积量矩阵,通过矩阵联合对角化技术得到阵列流形矩阵的估计。再利用近场和远场情形方位角相同的结论,得到方位角的估计。最后利用估计得到的阵列流形矩阵及方位角,得到距离和俯仰角的估计。为提高估计精度,利用非线性最小二乘重新估计波达参数。与文献[6]中算法相比,本文算法无需进行二维频域搜索,且在采样数比较多时参数估计精度更高。本文算法的高估计性能代价是计算量比较大,主要是由于高阶累积量计算及矩阵联合对角化。

### 参考文献

- [1] MATHEWS C P, ZOLTOWSKI M D. Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular arrays [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(9): 2395-2407.
- [2] 陶建武, 石要武, 常文秀. 一般阵列误差情况下信号二维方向角估计 [J]. *电波科学学报*, 2006, 21(4): 606-611.  
TAO Jianwu, SHI Yaowu, CHANG Wenxiu. Estimation of 2D angle for signals with general array error [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(4): 606-611.
- [3] 熊维族. 一种盲的多个分布源到达方向估计算法 [J]. *电波科学学报*, 2008, 23(5): 942-945.  
XIONG Weizu. A blind DOA estimation algorithm for multiple spread sources [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(5): 942-945.
- [4] YE Z, XIANG L, XU X. DOA estimation with circular array via spatial averaging algorithm [J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2007, 6(1): 74-76.
- [5] HOOLE P R P. *Smart Antennas and Signal Processing for Communications, Biomedical and Radar Systems* [M]. Southampton: WIT Press, 2001.
- [6] LEE J H, PARK D H, PARK G T, et al. Algebraic path-following algorithm for localizing 3-D near-field sources in uniform circular array [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(17): 1283-1285.
- [7] MENDEL J M. Tutorial on high order statistics (spectra) in signal processing and system theory: theoretical results and some applications [C]// *Proc. of IEEE*, 1991, 79(3): 278-305.
- [8] DOGAN M C, MENDEL J M. Application of cumulants to array processing part II: non-Gaussian noise suppression [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, 43(7): 1663-1676.
- [9] 周 祎, 冯大政, 刘建强. 基于联合对角化的近场源参数估计 [J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(10): 1766-1769.  
ZHOU Yi, FENG Dazhen, LIU Jianqiang. Parameter estimation of near field sources using joint diagonalization [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2006, 28(10): 1766-1769.
- [10] 夏铁骑, 万 群, 游志军, 等. 冲击噪声环境中的联合对角化波达方向矩阵法 [J]. *电波科学学报*, 2008, 23(3): 460-465.  
XIA Tieqi, WAN Qun, YOU Zhijun, et al. Joint diagonalization DOA matrix method in impulsive noise environments [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(3): 460-465.
- [11] LI X L, ZHANG X D. Nonorthogonal joint diagonalization free of degenerate solution [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(5): 1803-1814.
- [12] NOCEDAL J, WRIGHT S J. *Numerical Optimization* [M]. New York: Springer-Verlag Press, 1999: 250-275.

**作者简介**

**胡增辉** (1982—), 男, 江西人, 2004 年和 2006 年分别在国防科技大学获理学学士和硕士学位。现在国防科技大学电子科学与工程学院攻读博士学位, 研究方向为盲信号处理、阵列信号处理等。

**朱炬波** (1967—), 男, 湖南人, 国防科技大学理学院教授, 博士生导师。研究方向为信息获取与处理、雷达系统、数学与系统科学等。

**何 峰** (1976—), 男, 湖北人, 国防科技大学理学院副研究员。研究方向为双(多)基地 SAR 信号处理、参数化 ISAR 超分辨与融合信号处理、分布式卫星合成孔径雷达系统设计等。

**梁甸农** (1936—), 男, 湖南人, 国防科技大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 中国电子学会会士。研究方向为超宽带雷达系统理论、星载分布式 SAR 系统理论及自适应信号处理、谱估计等。

### 3-D parameter estimation of near-field sources using uniform circular array

HU Zeng-hui<sup>1</sup> ZHU Ju-bo<sup>2</sup> HE Feng<sup>1</sup> LIANG Dian-nong<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China; 2. School of Science, National University of Defense

Technology, Changsha Hunan 410073, China;

3. Jiuquan Satellite Launching Center, Jiuquan Gansu 732750, China)

**Abstract** Based on uniform circular array (UCA), a new algorithm for range-azimuth-elevation joint estimation of near-field sources is proposed. Firstly, a set of high-order cumulant matrices are constructed using the array observation, the array manifold matrix is then estimated based on the joint diagonalization of these matrices. Secondly, azimuth angles are estimated using the estimated array manifold matrix and the conclusion for each source, actual near-field azimuth angle is equal to the estimated far-field azimuth angle. Finally, elevation angle and range are estimated with estimated azimuth angle. The proposed method does not need two-dimensional peak searching in frequency domain or parameter pairing operation. Computer simulations are carried out to verify the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words** direction-of-arrival; uniform circular array; joint diagonalization; near-field