

一种高效稳健的均匀圆阵互耦校正方法

刘 松^{1,2}, 廖 勇^{1,2}, 谢远举¹

(1. 重庆大学飞行器测控与通信教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 紧凑均匀圆阵(UCA)的强电磁互耦效应严重影响波束赋形(BF)和波达方向(DoA)估计的性能, 本文利用UCA的特殊圆对称性, 提出了一种稳健高效的互耦参数校正方法. 该方法只需要单个信源和单次校正实验, 并且信源方向并不需要事先精确校准. 首先互耦矩阵在离散傅里叶空间被转化为具有中心对称的一个参矢量, 随后在一个有限的先验二维空间角域内进行搜索, 从而根据基于对称性的目标函数将互耦参数估计出来. 仿真对比实验验证了新校正算法的有效性和鲁棒性, 同时揭示了秩损(RARE)校正方法不够稳健, 为基于UCA的雷达、移动通信等应用提供了简单且高效的互耦误差校正方法.

关键词: 阵列信号处理; 波达方向估计; 阵列校正; 均匀圆阵; 电磁互耦; 秩损方法

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)09-2170-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.017

An Efficient and Robust Calibration Method of Mutual Coupling for Uniform Circular Array

LIU Song^{1,2}, LIAO Yong^{1,2}, XIE Yuan-ju¹

(1. Key Laboratory of Aircraft TT&C and Communication, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. The State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The strong electromagnetic mutual coupling effect of a compact uniform circular array (UCA) will severely degrade the performance of beamforming (BF) or direction-of-arrival (DoA) estimation. Based on the special circular symmetry of a UCA, a new efficient and robust calibration method is proposed for the mutual coupling effect. Only one single signal source and one trial are required to complete the calibration, and the direction of the signal source does not need to be calibrated beforehand. First in discrete Fourier transform (DFT) space, the mutual coupling matrix (MCM) is transformed to be a centrosymmetric vector. Then in a prior 2D spatial angular domain, limited angle searching is carried out to get the estimate of the parameters according to a novel objection function based on the symmetry. Comparative simulations verify the effectiveness and robustness of the new algorithm and at the same time reveal that method based on rank reduction (RARE) lacks robustness, and thus a simple and efficient approach for mutual coupling calibration is provided when UCA is applied in radar, mobile communication system etc.

Key words: array signal processing; direction of arrival estimation; array calibration; uniform circular array; electromagnetic mutual coupling; rank reduction

1 引言

阵列信号处理是当前最为重要的热点研究领域之一, 如何将理论成果用于工程实际仍面临挑战, 需要更

符合实际情况的模型和更稳健、易于实现的方法^[1,2]. 典型的均匀圆阵(Uniform Circular Array, UCA)由于特殊的对称性, 能在360度方位角上提供几乎相同的分辨能力, 而且还能提供俯仰角估计, 因此得到了深入研究

收稿日期: 2016-01-26; 修回日期: 2016-04-20; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(No. 91438104); 国家自然科学基金(No. 61501066, No. 61571069); 重庆市基础与前沿研究计划项目(No. cstc2015jcyjA40003); 西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室开放基金(No. ISN16-03); 中央高校基本科研业务费重点基金(No. CDJZR165505)

和广泛应用. 许多熟知的波达方向 (Direction-of-Arrival, DoA) 估计方法如多重信号分类法 (Multiple Signal Classification, MUSIC)^[3], 相位模式空间中的旋转不变子空间法 (Estimation of Signal Parameters via Rotation Invariant Technique, ESPRIT)^[4] 都可用于 UCA 的 DoA 估计; 更高效算法如 UCA-RB (Real Beamspace)-MUSIC^[5] 和 UCA-ESPRIT^[5], 以及基于秩损 (RAnk REduction, RARE) 方法的 UCA-RARE^[6] 都能得到好的估计结果; 针对任意结构阵列的流形分离技术 (Manifold Separation Technique, MST) 也可用于 UCA 的一维和二维 DoA 估计^[7,8].

但阵元之间的电磁互耦效应将严重影响上述算法的估计性能, 因此需要对阵列进行校正. 经典的基于迭代交替搜索的自校正算法^[9] 可以进行互耦、通道及 DoA 参数的联合估计, 但是其运算量大且容易得到局部最优解. 不过该文献的 RARE 思想得到了后续许多估计算法的发展^[10-13]. 同时, 基于子空间/流形矢量拟合的思想也广泛用于阵列的互耦校正^[14,15], 这些方法需要精确校准的信源或者辅助阵元, 实现成本较高, 因此我们提出一种只利用单个信源和两次校正实验同时估计信道参数和互耦参数的方法^[16], 且信源方向无须事先校准, 实现简单, 估计结果准确、稳健. 该方法基于 UCA 的对称性, 同时假设互耦矩阵为一个常参数矩阵, 但文献^[10] 指出 UCA 互耦参数依赖于俯仰角, 即不同俯仰角入射情况下, 互耦参数将有差异, 因此这种情况下两次校正实验必须在同一俯仰角上完成, 使得文献^[16] 的方法具有一定局限性.

工程实际中的信道参数可以事先经测量并进行补偿, 因此信道的一致性可以得到较好保证, 在这种情况下基于我们前期研究成果中的对称性思想^[16], 提出一种更加简单高效的 UCA 互耦校正方法, 即通过单个信源单次校正实验估计出互耦参数, 并且信源方向不需要事先校准. 同时本文指出 RARE 方法得到的互耦参数估计不具有稳健性, 而本文所提方法有较好的鲁棒性, 适合低信噪比环境, 这使得本文提出的校正方法成为目前少有的能用于俯仰角依赖模型下互耦参数稳健估计方法.

2 系统模型

远场窄带单信源从方向 (θ, φ) 入射到 M 元均匀圆阵上, 圆阵半径为 r , 则快拍矢量可表示为

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{C}\mathbf{a}(\theta, \varphi)s(k) + \mathbf{n}(k), k = 1, \dots, K \quad (1)$$

其中 K 为采样总数, $s(k)$ 为信号采样. $\mathbf{a}(\theta, \varphi)$ 为信号流形矢量, 它具有如下形式

$$\begin{aligned} & (\mathbf{a}(\theta, \varphi))_m \\ &= f(\theta, \varphi)_m \exp\left(i \frac{2\pi r \sin\varphi}{\lambda} \cos\left(\theta - \frac{2(m-1)\pi}{M}\right)\right), m = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (2)$$

此处 λ 为信号波长. $f(\theta, \varphi)_m$ 为第 m 个天线单元在 (θ, φ) 处的方向图因子, 由于各天线单元相同, 所有的天线单元具有相同的方向图因子, 可把它看作信号采样值的因子, 即将 $f(\theta, \varphi)_m s(k)$ 作为一个有效信号采样值, 因此本文采用有效信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 作为仿真时的信噪比参数, 它包含了该方向图公共因子, 此时 $f(\theta, \varphi)_m = 1$.

\mathbf{C} 为互耦矩阵 (MCM, Mutual Coupling Matrix), 它是一个对称循环 Toeplitz 矩阵

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_0 & c_1 & \cdots & c_N & \cdots & c_1 \\ c_1 & c_0 & \cdots & c_{N-1} & \cdots & c_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_N & c_{N-1} & \cdots & c_0 & \cdots & c_{N-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_1 & c_2 & \cdots & c_{N-1} & \cdots & c_0 \end{bmatrix}, N = \lfloor \frac{M}{2} \rfloor \quad (3)$$

其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整. MCM 可以由互耦参数矢量 \mathbf{c} 表示, 通常归一化其首元素

$$\mathbf{c} = [c_0, c_1, \dots, c_N]^T, c_0 = 1 \quad (4)$$

对理想的偶极子天线阵, 理论上可以根据电动势法 (Electro-Motive Force, EMF) 计算互阻抗, 然后利用开路电压法 (Open Circuit Voltage, OCV) 得到互耦矩阵^[17]. 实际上电磁互耦参数受各种因素影响, 需要通过实测来校正.

此外还假定式(1)中 $\mathbf{n}(k)$ 为加性高斯白噪声

$$\mathbb{E}[\mathbf{n}(k)] = \mathbf{0}, \mathbb{E}[\mathbf{n}(k)\mathbf{n}(k)^H] = \sigma_w^2 \mathbf{I} \quad (5)$$

3 校正算法

3.1 信号和噪声子空间估计

信号和噪声子空间一般通过对协方差矩阵的特征分解或者传播算子方法来估计, 由于单信源校正实验信号子空间就是协方差矩阵最大特征值对应的特征矢量, 因此可以用幂法来计算. 利用协方差阵乘上一个矢量, 经过几次迭代就可收敛到信号特征矢量上, 记 $\mathbf{R}_z = \mathbb{E}[\mathbf{z}(k)\mathbf{z}(k)^H]$, 有

$$\mathbf{g}_j = \mathbf{R}_z \mathbf{q}_{j-1}, \mathbf{q}_j = \frac{\mathbf{g}_j}{\|\mathbf{g}_j\|}, j = 0, 1, \dots \quad (6)$$

此处 \mathbf{q}_0 是一个非零的初始迭代矢量, 一般可选首元素为 1 的标准列矢量. 假设最终获得的收敛矢量为 \mathbf{q} , 即为信号子空间 \mathbf{U}_s , 它与信号流形矢量的关系为

$$\mathbf{U}_s = \mathbf{q} = \gamma \mathbf{C}\mathbf{a}(\theta, \varphi) \quad (7)$$

其中 γ 为一个复常数. 同时可得到噪声子空间 U_n

$$U_n = I - q(q^H q)^{-1} q^H = I - qq^H \quad (8)$$

3.2 基于秩损的互耦参数估计方法

文献[9]给出了经典的迭代搜索自校正算法, 它提出的 RARE 思想被用于 UCA 的互耦参数估计

$$\hat{c} = \arg \max_{(\theta, \varphi)} \frac{1}{c^H Q(\theta, \varphi) c} \quad (9)$$

$$Q(\theta, \varphi) = T^H(a(\theta, \varphi)) U_n U_n^H T(a(\theta, \varphi)) \quad (10)$$

其中, $T(a)$ 将列矢量 a 转化为一个矩阵, 本文给出适用于 UCA 的较文献[9, 11]更为直观简洁的表达式

$$T(\cdot, 1) = a$$

$$T(\cdot, m) = \text{circshift}(a, m-1) + \text{circshift}(a, 1-m), m=2, \dots, N$$

$$T(\cdot, N+1) = \begin{cases} \text{circshift}(a, N), & N \text{ 为偶数} \\ \text{circshift}(a, N) + \text{circshift}(a, -N), & N \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (11)$$

此处 $N = \lfloor M/2 \rfloor$. $\text{circshift}(a, m)$ 是循环移位函数, 若 $m > 0$, 则将矢量 a 循环移位 m 次; 若 $m < 0$ 则反方向循环移位 $|m|$ 次.

对式(9)中的 (θ, φ) 进行二维角度搜索, 找出使目标函数最大化的矢量 \hat{c} 作为互耦参数矢量的估计, 由此可见 \hat{c} 为所有矩阵 $Q(\theta, \varphi)$ 中对应最小特征值的特征矢量 \hat{g}_{\min} , 然后将其首元素归一化, 即

$$\hat{c} = \frac{\hat{g}_{\min}}{(\hat{g}_{\min})_1} \quad (12)$$

3.3 均匀圆阵基于对称性的新校正算法

本文利用文献[16]中的引理 1 并给出证明.

引理 1^[16, 18] 对于对称循环矩阵 C , 其首个列矢量为 $c = [c_0, c_1, \dots, c_N, \dots, c_1]^T$, F 为傅里叶矩阵

$$F = [w_0, w_1, \dots, w_{M-1}] \quad (13)$$

$$w_j = \frac{1}{\sqrt{M}} \left[1, \exp\left(i \frac{2\pi j}{M}\right), \dots, \exp\left(i \frac{2\pi j(M-1)}{M}\right) \right]^T, \\ j=0, \dots, M-1 \quad (14)$$

则 $A = FCF^H$ 是一个对角阵且对角元素 $\beta_m = A_{(m+1)(m+1)}, m=0, \dots, M-1$ 满足

$$\beta_m = \beta_{M-m}, m=1, \dots, M-1 \quad (15)$$

证明 对于循环矩阵 C , 假定其首个列矢量为 $c = [c_0, c_1, \dots, c_{M-1}]^T$, 则直接根据文献[18], $A = FCF^H$ 为一对角矩阵且对角元素为

$$\beta_m = A_{(m+1)(m+1)} = \sum_{j=0}^{M-1} c_j \exp\left(i \frac{2\pi jm}{M}\right), m=0, \dots, M-1 \quad (16)$$

注意到对傅里叶矩阵有 $F = F^T, F^H = F^*$, 于是根据 C 矩阵的对称性, 即 $C = C^T, A$ 可重新写为

$$\begin{cases} \beta_m = w_m^T C w_m^* = (w_m^T C w_m^*)^T = w_m^H C w_m \\ 0 = w_m^T C w_j^*, j \neq m \end{cases} \quad (17)$$

于是有

$$\beta_{M-m} = w_{M-m}^H C w_{M-m} = w_m^T C w_m^* = \beta_m, m=1, \dots, M-1 \quad (18)$$

证明完毕.

引理 1 表明 $[\beta_1, \dots, \beta_{M-1}]^T$ 是一中心对称矢量.

由引理 1 可得到离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 空间中的信号子空间为

$$\tilde{U}_s = F U_s = \gamma F C a(\theta, \varphi) = \gamma F C F^H F a(\theta, \varphi) = \gamma A F a(\theta, \varphi) \quad (19)$$

又由于

$$A F a(\theta, \varphi) = \text{diag}(F a(\theta, \varphi)) \beta \quad (20)$$

其中

$$\beta = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{M-1}]^T = [A_{11}, A_{22}, \dots, A_{MM}]^T \quad (21)$$

于是最终得到

$$\beta = \gamma^{-1} \text{diag}^{-1}(F a(\theta, \varphi)) \tilde{U}_s \quad (22)$$

若精确知道入射方向 (θ, φ) , 则可通过式(22)直接解出矢量 β 并由引理 1 求出互耦矩阵 C

$$C = F^H A F = F^H \text{diag}(\beta) F \quad (23)$$

由于校正信源的入射方向并没有事先校准, 因此不能准确知道 (θ, φ) 的数值, 但校正实验本身提供了有关它的先验信息, 即 (θ, φ) 一定是在以某个拟定方向为中心的一个空间角域内, 即 $\theta_{\min} < \theta < \theta_{\max}, \varphi_{\min} < \varphi < \varphi_{\max}$. 在此, 这个先验方向信息还可以通过不考虑互耦效应的 MUSIC 谱获得, 此时没有经过互耦补偿的 MUSIC 谱虽然不再具有针状谱峰, 却可以显示出大致的信源入射方向范围. 因此为了准确地获得 β 估计, 需要在这个空间角域内进行搜索, 找到满足如下目标函数的 $\hat{\beta}$

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} \sum_{j=1}^N |\beta_j - \beta_{M-j}|, N = \lfloor \frac{M}{2} \rfloor \quad (24)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \beta = \text{diag}^{-1}(F a(\theta, \varphi)) \tilde{U}_s \\ \theta_{\min} < \theta < \theta_{\max} \\ \varphi_{\min} < \varphi < \varphi_{\max} \end{cases} \quad (25)$$

目标函数表示在空间角域内寻找使得 β 对称性最好的那个矢量作为最佳估计. 式中没有考虑 γ 是因为在归一化时可消去该非常数. 以下是校正算法的详细步骤:

(1) 在拟定的入射方向上做一次校正实验, 确定入射方向大致空间角域 $(\theta_{\min}, \theta_{\max}), (\varphi_{\min}, \varphi_{\max})$ 并记录下校正实验的快拍数据 $z(k), k=1, \dots, K$.

(2) 计算出样本协方差矩阵 $\hat{R} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K z(k) z^H(k)$, 并根据幂法获得信号子空间估计 \hat{U}_s , 然后获得 DFT 空间中的信号子空间 $\hat{\tilde{U}}_s = F \hat{U}_s$.

(3) 根据目标函数式(24)和式(25)在确定的角域内进行二维角度搜索, 获得 $\hat{\beta}$ 的估计, 式(24)中的 \tilde{U}_s 由 $\hat{\tilde{U}}_s$ 代替, 表示它由样本数据获得.

(4) 根据式(23)获得互耦矩阵的估计并归一化首元素

$$\hat{\mathbf{C}} = \frac{\mathbf{F}^H \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\beta}}) \mathbf{F}}{(\mathbf{F}^H \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\beta}}) \mathbf{F})_{11}} \quad (26)$$

通过 $\hat{\mathbf{C}}$ 即可获得互耦参数矢量 $\hat{\mathbf{c}}$, 由于此时 $\hat{\mathbf{C}}$ 不再具有严格的对称性, 因此我们提出两种方法来估计 $\hat{\mathbf{c}}$.

方法 1 取 $\hat{\mathbf{C}}$ 的第一个列矢量的前 $N+1$ 个元素作为 $\hat{\mathbf{c}}$ 的估计

$$\hat{\mathbf{c}} = \hat{\mathbf{C}}(1:N+1, 1) \quad (27)$$

方法 2 对 $\hat{\mathbf{C}}$ 的第一个列矢量取平均值作为 $\hat{\mathbf{c}}$ 的估计, 即

$$\hat{c}_0 = 1, \hat{c}_j = \frac{(\hat{\mathbf{C}}(j+1, 1) + \hat{\mathbf{C}}(M+1-j, 1))}{2}, j=1, \dots, N \quad (28)$$

将估计得到的 $\hat{\mathbf{C}}$ 代入互耦效应下的均匀圆阵模型, 再根据 MUSIC 算法可得到校正实验的准确入射方向, 此方向反过来又可验证事先确定的先验角域是否正确, 若校正信源方向确实落在在这个角域内, 则说明得到的互耦参数估计真实可信.

因为阵列校正可通过实验数据离线计算, 运算量不是考虑的主要性能指标. 但从基于 RARE 的校正方法和新校正方法看, 对每个二维角度对 (θ, φ) , 前者需要

计算出 $\mathbf{Q}(\theta, \varphi)$, 对它进行特征分解求得最小的特征值和特征矢量, 而新方法只需要计算出 $\boldsymbol{\beta}$ 值, 仅涉及到一个对角矩阵和矢量的乘积, 因此新方法较基于 RARE 的校正方法简单高效.

4 仿真实验

阵列校正需要衡量估计参数的精度和稳定性, 即估计的绝对偏差和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE). 由于有 N 个互耦参数, 因此定义参数估计的平均绝对偏差和平均均方根误差

$$\text{avr_abs_bias}(\hat{\mathbf{c}}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\bar{c}_j - c_j| \quad (29)$$

$$\text{avr_RMSE}(\hat{\mathbf{c}}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |\hat{c}_j(t) - \bar{c}_j|^2} \quad (30)$$

其中 T 为总的估计次数, t 为单次估计实验编号, \bar{c}_j 为第 j 个互耦参数的估计平均值

$$\bar{c}_j = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \hat{c}_j(t), j=1, \dots, N \quad (31)$$

考虑一个 $M=16$ 元的紧凑半波偶极子天线组成的 UCA, 半径为 $r=0.7\lambda$, 信号源工作频率 $f_0=1.032\text{GHz}$, 理论上互耦参数如表 1 所示.

表 1 互耦参数 ($c_0=1$)

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8
-0.320417	0.149641	0.0435498	-0.0186772	-0.00439594	-0.0373879	-0.0542693	-0.0527588
+0.187788i	+0.115298i	-0.0680282i	-0.00929058i	-0.0157479i	-0.0297006i	-0.019243i	-0.0171603i

4.1 单点校正仿真

拟定在 $(40^\circ, 90^\circ)$ 方向上作 $T=100$ 次测量 ($K=1000$), 每次测量可估计出待估计的互耦参数矢量, 然后再求得 T 次平均值. 实际入射方向在以拟定方向为中心的 $\pm 1^\circ$ 的空间角内平均分布, 即 $\theta \in (39^\circ, 41^\circ)$, $\varphi \in (89^\circ, 91^\circ)$ 且呈平均分布. 先验角域范围为 $\pm 5^\circ$, 即需要在 $\theta \in (35^\circ, 45^\circ)$, $\varphi \in (85^\circ, 95^\circ)$ 的空间角域内搜索. 图 1 和图 2 是仿真得到的平均绝对偏差和平均 RMSE 随信噪比的变化情况, 搜索步长为 0.1° .

结果表明新的校正方法得到的估计方差和基于 RARE 思想的校正方法基本一致, 但绝对偏差更小, 这说明新校正方法估计结果更为精确, 且在低信噪比下估计结果更为稳健. RARE 方法利用信号子空间和噪声子空间相互正交的性质, 而新方法则基于阵列结构本身所具有对称性质, 仿真结果表明在低信噪比区间对称性对噪声影响更为稳健.

此外“方法 1”和“方法 2”获得的互耦参数估计精度 (偏差) 没有明显区别, 但在高信噪比下“方法 2”比

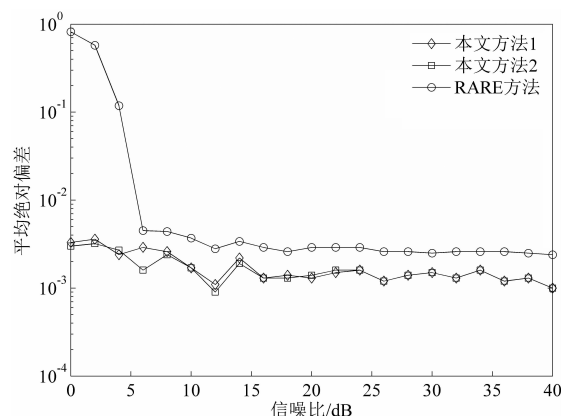


图 1 单点校正时, 平均绝对偏差随信噪比的变化情况

“方法 1”更稳健, 这是因为“方法 2”在最后的参数估计中再取了一次平均 (见式(28)).

4.2 多点校正仿真

实际的校正方法是绕圆阵每间隔一定角度作一次校正实验然后取平均. 设 $T=100$, 拟定的入射角为 $(3.6 \times t^\circ, 90^\circ)$, $t=1, \dots, 100$, 而实际入射角仍然是在以拟定方向为中心 $\pm 1^\circ$ 的角域内呈均匀分布, 先验角范围

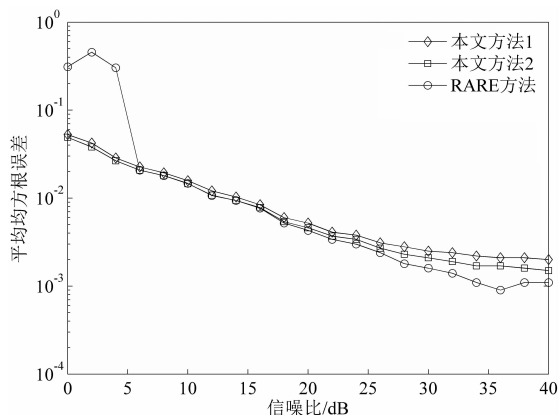


图2 单点校正时, 平均均方根误差随信噪比的变化情况

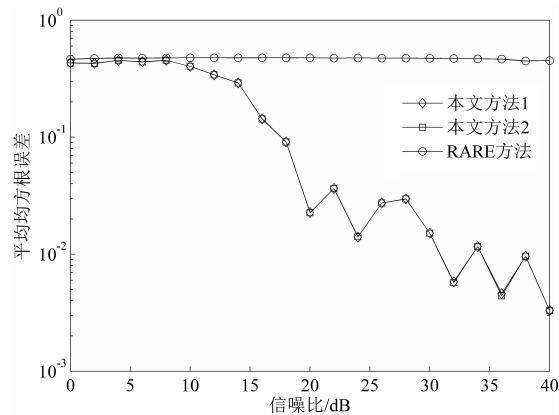


图4 多点校正时, 平均均方根误差随信噪比的变化情况

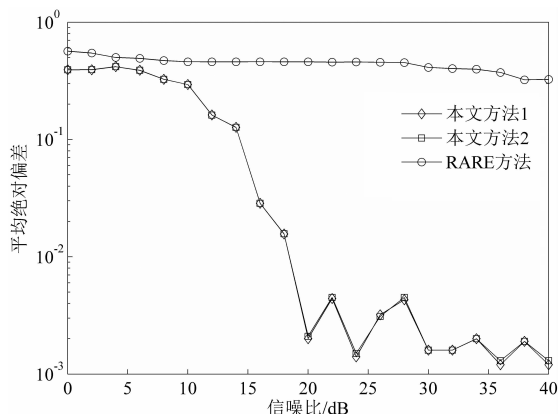


图3 多点校正时, 平均绝对偏差随信噪比的变化情况

仍为 $\pm 5^\circ$, 其它条件如 4.1 节. 图 3, 图 4 给出的是平均绝对偏差和平均 RMSE 随信噪比的变化情况.

表 2 信号方向对及相应的互耦参数估计 ($c_0 = 1$)

(θ, φ)	校正方法	\hat{c}_1	\hat{c}_2	\hat{c}_3	\hat{c}_4	\hat{c}_5	\hat{c}_6	\hat{c}_7	\hat{c}_8
$(6.6177^\circ, 90.5232^\circ)$	RARE 方法	-0.9995 +0.0001i	0.9994 +0.0001i	-0.9993 -0.0000i	0.9993 -0.0000i	-0.9993 +0.0000i	0.9993 -0.0000i	-0.9994 -0.0000i	0.9993 -0.0000i
	本文方法	-0.3200 +0.1866i	0.1494 +0.1164i	0.0439 -0.0690i	-0.0192 -0.0087i	-0.0040 -0.0162i	-0.0379 -0.0291i	-0.0535 -0.0197i	-0.0535 -0.0164i
$(31.8166^\circ, 89.2538^\circ)$	RARE 方法	-0.9988 +0.0004i	0.9985 +0.0001i	-0.9981 -0.0000i	0.9982 -0.0001i	-0.9982 +0.0001i	0.9981 -0.0001i	-0.9983 +0.0000i	0.9981 -0.0001i
	本文方法	-0.3189 +0.1899i	0.1469 +0.1133i	0.0467 -0.0653i	-0.0217 -0.0124i	-0.0011 -0.0127i	-0.0407 -0.0331i	-0.0508 -0.0160i	-0.0562 -0.0208i

由此可见, 在某些入射方向上的校正实验通过 RARE 方法并不能得到正确的互耦参数估计, 这样的方向远不止表 2 所列出的两例, 这说明 RARE 方法估计互耦参数乃至估计波达方向并不稳健, 4.1 节的仿真实验只能表明在 $(40^\circ, 90^\circ)$ 附近能得到正确的估计结果. 而本文提出的校正方法在两例中均给出了正确的互耦参数估计, 这表明新方法则具有极大的稳健性. 因此对于

仿真结果与 4.1 节的结果迥异, 本文提出的校正方法无论在估计精度还是稳定性方面都取得了满意的结果, 而基于 RARE 思想的校正方法得到的估计偏差和均方根误差均大幅恶化, 究其原因是因为 RARE 方法缺少稳健性. 文献[19]指出这种盲估计方法会产生许多伪角度值, 且这种伪角度值是无规律的, 即在某些非真实入射方向上 $\mathbf{Q}(\theta, \varphi)$ 也会产生秩损, 因此估计得到了错误的参矢量. 这意味着存在着不同于真实 DoA 的角度对 (θ', φ') 和矩阵 \mathbf{C}' , 满足

$$\mathbf{C}'\mathbf{a}(\theta', \varphi') = \mu\mathbf{C}\mathbf{a}(\theta, \varphi) \quad (32)$$

其中 μ 为一个常数. 因此根据 RARE 方法搜索得到了错误的互耦参数矩阵估计 \mathbf{C}' . 具体到本实验 ($\text{SNR} = 30\text{dB}, K = 1000$), 表 2 列出了其中的两个信源入射角度和相应估计出的参矢量.

依赖于俯仰角的互耦参数估计, 本文方法仍然能给出正确的估计结果.

此外还可以看出, 最终估计出互耦参数的“方法 1”和“方法 2”基本没有区别, 这是因为本仿真实验虽然绕圆阵有 T 次校正实验, 但每次入射方向区别很大, 即每方向上只作了一次校正实验, 因此“方法 2”较“方法 1”平均效果并不明显.

4.3 阵列校正后的波达方向估计仿真

将 4.2 节的估计结果用于 UCA 的校正,并对同时入射的 3 个信号作 DoA 估计.入射方向分别为 $(35^\circ, 45^\circ)$, $(45^\circ, 55^\circ)$, $(200^\circ, 70^\circ)$,有效信噪比为 20dB, 20dB, 30dB.图 5 ~ 7 分别给出了未经校正的、基于 RARE 的方法和本文方法校正后的 MUSIC 谱.图 5 显示若不经互耦校正,根本得不到正确的 DoA 估计;图 6 是经过 RARE 方法校正后的 DoA 估计结果,由图只能得到一个针状谱峰;而经过本文校正算法后得到了正确的针状空间谱(图 7),因此能准确估计出三个空间信号的 DoA.

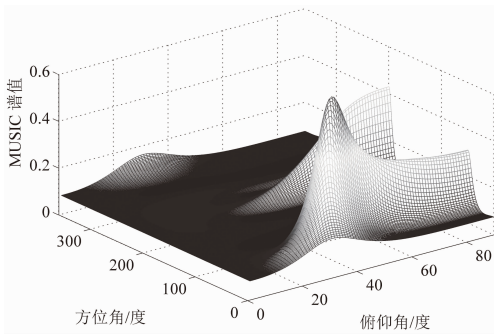


图5 未校正过的MUSIC谱

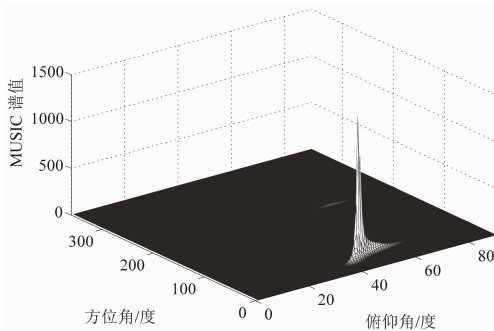


图6 基于RARE方法校正后的MUSIC谱

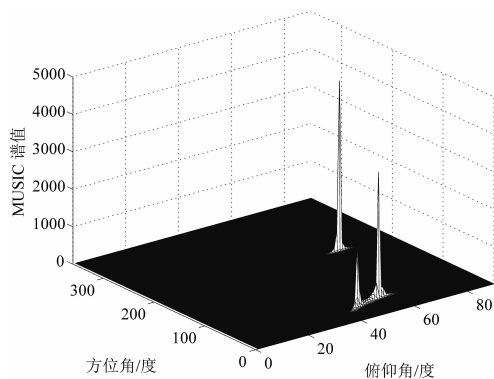


图7 本文方法校正后的MUSIC谱

5 结论

基于均匀圆阵的特殊圆对称性,本文提出了一种均匀圆阵互耦参数单信源单次实验的校正方法.该方法只需要一个单信源,一次校正实验即可准确估计出互耦参数,并且信源方向无须事先精确校准,因此能适用于方向依赖的互耦误差模型,也更符合实际校正实验情况.新的校正方法采用幂法估计子空间,且对互耦效应强弱不敏感,也不存在秩损方法所存在的伪角度估计值,因此是一种简单、高效、准确而且稳健的校正方法.

参考文献

- [1] Hu H, Nickel U, Kulpa K. Advances in antenna array processing for radar[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013, vol. 2013, Article ID 416096, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/416096>.
- [2] Hu H, Qi H M, Villano M, et al. Advances in antenna array processing for radar 2014[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2015, vol. 2015, Article ID 196910, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/196910>.
- [3] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276 - 280.
- [4] Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. IEEE Transactions on Acoustic Speech and Signal Processing, 1989, 37(7): 984 - 995.
- [5] 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.
- [6] Pesavento M, Böhme J F. Direction of arrival estimation in uniform circular arrays composed of directional elements[A]. Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop[C]. Rosslyn: IEEE, 2002. 503 - 507.
- [7] Belloni F, Richter A, Koivunen V. DoA estimation via manifold separation for arbitrary array structures[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(10): 4800 - 4810.
- [8] Hua G, Wu J D, Zhu X C, et al. Efficient two-dimensional direction finding via auxiliary-variable manifold separation technique for arbitrary array structure[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, vol. 2015, Article ID 740513, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/740513>.
- [9] Friedlander B, Weiss A J. Direction finding in the presence of mutual coupling[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991, 39(3): 273 - 284.
- [10] Wang B H, Hui H T, Leong M S. Decoupled 2D direction

- of arrival estimation using compact uniform circular arrays in the presence of elevation-dependent mutual coupling [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(3): 747 – 755.
- [11] Lin M, Yang L X. Blind calibration and DoA estimation with uniform circular arrays in the presence of mutual coupling [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2006, 5(1): 315 – 318.
- [12] Dai J, Bao X, Hu N, et al. A recursive RARE algorithm for DoA estimation with unknown mutual coupling [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13(5): 1593 – 1596.
- [13] Wang M, Ma X C, Yan S F, et al. An auto-calibration algorithm for uniform circular array with unknown mutual coupling [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, DOI:10.1109/LAWP.2015.2425423.
- [14] See C M S. Sensor array calibration in the presence of mutual coupling and unknown sensor gains and phases [J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(5): 373 – 374.
- [15] Si W, Wu D, Liu L, Qu X, et al. Direction finding with gain/phase errors and mutual coupling errors in the presence of auxiliary sensors [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, vol. 2014, Article ID 429426, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/429426>.
- [16] Liu S, Yang L S, Yang S Z. Robust joint calibration of mutual coupling and channel gain/phase inconsistency for uniform circular array [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15(1): 1191 – 1195.
- [17] Gupta I J, Ksienski A A. Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1983, 31(9): 785 – 791.
- [18] Ma Y L, Yang X Y, He Z Y, et al. Theoretical and practical solutions for high-order superdirectivity of circular sensor arrays [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(1): 203 – 209.
- [19] Gao D Y, Wang B H, Guo Y. Comments on “Blind calibration and DoA estimation with uniform circular arrays in the presence of mutual coupling” [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2006, 5(1): 566 – 569.

作者简介



刘松男, 1976年出生于湖北恩施。现为重庆大学通信工程学院博士研究生。主要研究方向为阵列信号处理。
E-mail: ls5836@163.com



廖勇(通信作者)男, 1982年出生于四川省自贡市。现为重庆大学副研究员。主要研究方向为宽带无线通信与网络、飞行器测控与通信等。
E-mail: liaoy@cqu.edu.cn



谢远举男, 1989年出生于重庆黔江。现为重庆大学通信工程学院硕士研究生。主要研究方向为软件无线电。
E-mail: xieyuanju@139.com