

基于 Toeplitz 矩阵的互耦误差下 相干信号源 DOA 估计

窦慧晶, 侍建超, 雷倩, 程军

(北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

摘要: 在阵列互耦误差存在的前提下, 针对多组相干信号源和若干非相干信号源并存的情况, 提出了一种对信号源进行准确估计的算法. 算法首先估计阵列的互耦参数, 并利用此互耦参数对阵列接收数据进行补偿; 然后利用 Toeplitz 矩阵重构法对相干信号进行解相干; 最后利用 MUSIC 算法估计各个信号源的来波方向 (direction of arrival, DOA). 实验结果表明, 算法有效解决了互耦的影响, 避免了阵列损失, 实现了间距很小信源的准确估计.

关键词: 互耦; 相干源; Toeplitz 矩阵

中图分类号: TN 911

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)12-1857-05

DOA Estimation of Coherent Signals Under Mutual Couple Based on Toeplitz Matrix

DOU Hui-jing, SHI Jian-chao, LEI Qian, CHENG Jun

(College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: This paper describes the method of direction of arrival (DOA) estimation for many groups of coherent and uncorrelated sources under mutual couple based on Toeplitz matrix. The method first estimates the mutual couple parameter of the linear array, and compensates the array data using the mutual couple parameter. Then, the method decoherences the coherent sources by using Toeplitz matrix. Finally, the DOA of each source is estimated by using the MUSIC method. Experimental results show that the algorithm is effective in solving the influence of mutual coupling, avoiding the loss of array, and realizing the accurate estimation of small sources.

Key words: mutual couple; coherent sources; Toeplitz matrix

基于特征空间分解的波达方向估计算法, 如多重信号分类 (multiple signal classification, MUSIC) 算法^[1]、基于旋转因子的信号参数估计 (estimation of signal parameter via rotation invariance techniques, ESPRIT) 算法^[2]等, 虽然分辨率都很高, 但是只适用于理想阵列情况、非相干信源且噪声是高斯白噪声的情况, 对于存在多径传播或考虑阵列互耦的情况, 这 2 种算法的性能急剧下降, 甚至完全失效. 在实际环境中, 阵元间的互耦作用是不可避免的, 阵列互

耦校正也是阵列信号处理的一个重要课题; 另外, 由于阵列接收的直射信号和由于多径效应引起的反射信号是相干的, 在相干源条件下, 信号协方差矩阵的秩将退化, 导致无法正确地划分信号子空间和噪声子空间, 从而无法正确地进行波达方向估计. 因此, 阵列互耦及多径情况下的信号源 DOA 估计已受到了广泛重视.

均匀线阵的互耦矩阵可用对称的 Toeplitz 矩阵表示. Friedlander 等利用均匀线阵的互耦矩阵的特

收稿日期: 2011-10-08.

基金项目: 北京市教委科研项目 (KM201210005001); 北京工业大学自然科学基金资助项目 (00200054K2001).

作者简介: 窦慧晶 (1969—), 女, 副教授, 主要从事阵列信号处理、目标定位方面的研究, E-mail: dhuijing@bjut.edu.cn.

殊结构,提出了迭代的互耦自校正方法^[3],通过迭代,该方法能联合在线估计阵列互耦及信号的DOA,但是,该方法的不足之处在于难以保证全局收敛.文献[4]指出当阵元间距足够大时,阵元间的互耦系数可近似为0,将互耦矩阵简化为条状、对称的Toeplitz矩阵,从而降低待估参数的空间维数.近年来,还有许多针对互耦误差的校正方法,如迭代求解方法^[5]等,但这些方法都建立在信号源为非相干信源的基础之上,当信号源相干时,接收数据的协方差矩阵不满足Toeplitz对称性,故许多方法失效.

在不考虑阵列误差的情况下,对于相干信号的DOA估计问题有很多处理方法,效果较好的如空间平滑(spatial smoothing, SS)算法^[6],矩阵分解(matrix decomposition, MD)^[7]算法,Toeplitz^[8]算法等.其中,SS算法和MD算法以牺牲有效阵元数为代价来换取信号的不相干性,Toeplitz算法利用移动阵列的方法处理相干信号,不损失阵列孔径,效果较好.

在阵列存在互耦误差,且信号源存在相干信号的情况下,也有很多处理方法^[9-10],如基于斜投影算子的互耦补偿解相干算法^[9],先估计阵列互耦参数,然后对互耦进行补偿,并利用斜投影算子的性质分离相干源和非相干源,以实现信号源DOA的估计.文献[11]对互耦补偿后的数据进行空间平滑,达到解相干的目的,从而估计出各信号源的DOA,但由于运用空间平滑算法,因此,阵列孔径有损失.

本文提出了一种新的解决方法,先估计互耦矩阵的互耦参数,然后对阵列导向矢量进行补偿,对补偿后的接收数据进行Toeplitz矩阵重构,达到解相干的目的,最后用传统的DOA估计算法估计出各信号源的DOA,该算法既比较准确地估计了阵列互耦误差,较好地对误差进行补偿,又避免了阵列损失,而且能分辨近间距信源,弥补了上述各算法的不足,仿真实验证明了算法的优越性.

1 数据模型

对于 L 元均匀线阵且不考虑阵列互耦,阵元间距为 d ,且假设均为各向同性阵元.阵列远场中在以线阵轴线法线为参考的 $\theta_i (i=1, 2, \dots, M)$ 处有 M 个窄带点源以平面波入射(波长为 $\lambda_0, d = \frac{\lambda_0}{2}$),以阵列第1个阵元为参考点,设有 Q 组相干信号源,第 i 组($i=1, 2, \dots, Q$)的相干信源的个数为 G_i ,则相干

信源的总个数 $M_c = \sum_{i=1}^Q G_i$,任意2组相干信源之间不相干,因此,非相干信源数目为 $M_{nc} = M - M_c$ 个.阵列噪声为高斯白噪声,所以,阵列快拍数据矢量可表示为^[9]

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t) &= [x_0(t), x_1(t), \dots, x_L(t)]^T = \\ &= \sum_{i=1}^Q \sum_{l=1}^{G_i} \mathbf{a}(\theta_{il}) \rho_{il} s_{c_i}(t) + \sum_{k=M_c+1}^M \mathbf{a}(\theta_k) s_k(t) + \mathbf{n}(t) = \\ &= \mathbf{A}_c \mathbf{s}_c(t) + \mathbf{A}_{nc} \mathbf{s}_{nc}(t) + \mathbf{n}(t) = \mathbf{A} \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{a}(\theta_{il}) = [1, e^{-j\beta_{il}}, \dots, e^{-j(L-1)\beta_{il}}]^T, (i=1, 2, \dots, Q; l=1, 2, \dots, G_i)$,为阵列导向矢量, $\beta_{il} = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta_{il}$; $\mathbf{a}(\theta_k) = [1, e^{-j\beta_k}, \dots, e^{-j(L-1)\beta_k}]^T, (k=M_c+1, \dots, M), \beta_k = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta_k$; ρ_{il} 为第 i 组相干源中第 l 个相干信源的相干因子, $\boldsymbol{\rho}_i = [\rho_{i1}, \dots, \rho_{iG_i}]^T, (i=1, \dots, Q)$; $\mathbf{A}_c = [\mathbf{A}_{c1} \boldsymbol{\rho}_1, \dots, \mathbf{A}_{cQ} \boldsymbol{\rho}_Q], \mathbf{A}_{c_i} = [\mathbf{a}(\theta_{i1}), \dots, \mathbf{a}(\theta_{iG_i})]$; $\mathbf{A}_{nc} = [\mathbf{a}(\theta_{M_c+1}), \dots, \mathbf{a}(\theta_M)]$; $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_{nc}, \mathbf{A}_c]$; $\mathbf{s}_c(t) = [s_{c_1}(t), \dots, s_{c_Q}(t)]^T$; $\mathbf{s}_{nc}(t) = [s_{M_c+1}(t), \dots, s_M(t)]^T$; $\mathbf{n}(t)$ 表示空间高斯白噪声矢量.

当阵列存在互耦时,阵列的导向矢量 $\mathbf{a}_s(\theta, \mathbf{c}) = \mathbf{C} \mathbf{a}(\theta)$,其中, \mathbf{C} 为互耦矩阵,对于均匀线阵, \mathbf{C} 为Toeplitz阵,其元素 c_{ij} 为阵元 i 和阵元 j 之间的互耦系数,阵元自身互耦系数 $c_{ii} = 1$.则 t 时刻,阵列接收的快拍数据为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{C} \mathbf{A}(\theta) \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t)$$

所以,阵列的协方差矩阵可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{E}[\mathbf{X}(t) \mathbf{X}^H(t)] = \\ &= \mathbf{C} \mathbf{A}(\theta) \mathbf{R}_s \mathbf{A}^H(\theta) \mathbf{C}^H + \sigma^2 \mathbf{I} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{R}_s = \mathbf{E}[\mathbf{s}(t) \mathbf{s}^H(t)]$ 为信号源协方差矩阵; σ^2 为噪声功率; \mathbf{I} 为单位阵.由于相干信号源的存在, \mathbf{R}_s 的秩降为 $M_{nc} + Q$.

2 本文算法

2.1 互耦矩阵估计及互耦补偿

互耦误差存在时,阵列的导向矢量 $\mathbf{a}_s(\theta, \mathbf{c})$ 可以通过矩阵运算表示为^[3]

$$\mathbf{a}_s(\theta, \mathbf{c}) = \mathbf{C} \mathbf{a}(\theta) = \mathbf{T}[\mathbf{a}(\theta)] \mathbf{c} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{T}[\mathbf{a}(\theta)]$ 为 $L \times L$ 矩阵, \mathbf{c} 为 $L \times 1$ 矢量,为 \mathbf{C} 的第1行,即 $\mathbf{c} = (1, c_{12}, \dots, c_{1M})$, $\mathbf{T}[\mathbf{a}(\theta)]$ 满足

$$\mathbf{T}[\mathbf{a}(\theta)] = \mathbf{T}_1[\mathbf{a}(\theta)] + \mathbf{T}_2[\mathbf{a}(\theta)] \quad (4)$$

式中:

$$\mathbf{T}_1[\mathbf{a}(\theta)]_{i,j} = \begin{cases} [\mathbf{a}(\theta)]_{i+j-1}, & i+j \leq L+1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$T_2[\mathbf{a}(\theta)]_{i,j} = \begin{cases} [\mathbf{a}(\theta)]_{i-j+1}, & i \geq j \geq 2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

用文献[12]提供的方法求出互耦自由度 P , 且 $P < L$, 那么 $c_{1i} = 0 (i \geq P + 1)$, 则有^[13]

$$T[\mathbf{a}(\theta)]\mathbf{c} = [T_0[\mathbf{a}(\theta)]] \\ T_1[\mathbf{a}(\theta)] \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \end{bmatrix} = T_0[\mathbf{a}(\theta)]\mathbf{c}_0 \quad (7)$$

式中: $T_0[\mathbf{a}(\theta)]$ 为 $L \times P$ 矩阵, \mathbf{c}_0 为 $P \times 1$ 矢量. 如果 $\theta \in \{\theta_k | k = 1, 2, \dots, M_{nc}\}$, 即 θ 为信号源中的独立信号的来波角度, 那么根据子空间的正交性原理有

$$\mathbf{c}_0^H T_0^H[\mathbf{a}(\theta)] U_N U_N^H T_0[\mathbf{a}(\theta)] \mathbf{c}_0 = 0 \quad (8)$$

式中: U_N 是对 R 进行特征值分解后小特征值对应的特征向量构成噪声子空间.

因此, 可构造代价函数

$$\begin{cases} \min_{(\mathbf{c}_0, \theta)} \mathbf{c}_0^H \mathbf{Q}[\mathbf{a}(\theta)] \mathbf{c}_0 \\ \text{s. t. } \mathbf{c}_0^H \mathbf{w} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{Q}[\mathbf{a}(\theta)] = T_0^H[\mathbf{a}(\theta)] U_N U_N^H T_0[\mathbf{a}(\theta)]$, $\mathbf{w} = [1, 0, \dots, 0]^T$. 因为理想情况下, 当且仅当 θ 取独立信号源的来波方向时 $\mathbf{Q}[\mathbf{a}(\theta)]$ 才出现秩亏损, 所以当 $P \leq L - M_{nc} - 1$ 时, 式(9)的最优解为

$$\begin{cases} \hat{\theta}_0 = \max_{\theta} \mathbf{w}^H \mathbf{Q}^{-1}[\mathbf{a}(\theta)] \mathbf{w} \\ \hat{\mathbf{c}}_0 = \frac{\mathbf{Q}^{-1}[\mathbf{a}(\hat{\theta}_0)] \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H \mathbf{Q}^{-1}[\mathbf{a}(\hat{\theta}_0)] \mathbf{w}} \end{cases} \quad (10)$$

因此, 可根据信号源中的独立信号源来估计互耦矩阵 C .

$$\tilde{C} = \text{Toeplitz}[\underbrace{\hat{\mathbf{c}}_0^T, 0, \dots, 0}_L]. \quad (11)$$

估计出了阵列的互耦误差矩阵, 就可对阵列的互耦误差进行补偿, 以减小互耦对信源估计的影响.

由式(2)可推出

$$\hat{R} = R - \sigma^2 I = CA(\theta)R_s A^H(\theta)C^H \quad (12)$$

所以可用估计出的阵列互耦矩阵 C 对式(12)进行补偿

$$\hat{R} = \tilde{C}^{-1} \hat{R} (\tilde{C}^H)^{-1} = \tilde{A}(\theta)R_s \tilde{A}^H(\theta) \quad (13)$$

式中 $\tilde{A}(\theta) = \tilde{C}^{-1} CA(\theta)$.

2.2 估计信号源 DOA

根据相关函数的概念, 定义第 i 个阵元和第 j 个 ($1 \leq i, j \leq L$) 阵元的阵列接收数据的相关矩阵:

$$\mathbf{r}(i, j) = E[\mathbf{x}_i \mathbf{x}_j^H] = \\ \tilde{A}_i(\theta) E[s(t)s^H(t)] \tilde{A}_j^H(\theta) + \sigma^2 I =$$

$$A_i(\theta)R_s A_j^H(\theta) + \sigma^2 I \quad (14)$$

当 $i = 1, j$ 由 1 依次递增到 L 时, 可得到相关矢量为 $[r(1, 1), r(1, 2), \dots, r(1, L)]$.

不难看出, 式(14)应满足以下条件:

$$[r(1, 1), r(1, 2), \dots, r(1, L)] = \\ \tilde{A}_1(\theta)R_s [\tilde{A}_1^H(\theta), \tilde{A}_2^H(\theta), \dots, \tilde{A}_L^H(\theta)] \quad (15)$$

所有的信号源信息都包含在上述数据矢量中, 故对于互耦补偿后的数据应满足

$$\mathbf{V} = [\tilde{r}(1, 1), \tilde{r}(1, 2), \dots, \tilde{r}(1, L)] = \\ \tilde{A}_1(\theta)R_s [\tilde{A}_1^H(\theta), \tilde{A}_2^H(\theta), \dots, \tilde{A}_L^H(\theta)] \quad (16)$$

因此, 用数据矢量 \mathbf{V} 构造 Toeplitz 矩阵 \mathbf{R} , 则

$$\mathbf{R}' = \text{Toeplitz}(\mathbf{V}) =$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{r}(1, 1) & \tilde{r}(1, 2) & \dots & \tilde{r}(1, L) \\ \tilde{r}^*(1, 1) & \tilde{r}(1, 1) & \dots & \tilde{r}(1, L-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{r}^*(1, L) & \tilde{r}^*(1, L-1) & \dots & \tilde{r}(1, 1) \end{bmatrix} \quad (17)$$

因此, 对 \mathbf{R}' 进行奇异值分解, 将产生 M 个大特征值和 $L - M$ 个小特征值, 其中, 小特征值对应的特征矢量构成噪声子空间 E_{nc} , 则所有信号源的 MUSIC 算法空间谱函数为

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = \frac{1}{\|\hat{\mathbf{a}}^H(\theta)E_{nc}\|^2} \quad (18)$$

式中: $\hat{\mathbf{a}}(\theta) = \tilde{C}^{-1} \mathbf{C} \mathbf{a}(\theta)$.

通过谱峰搜索可估计出所有信号源的来波方向.

3 实验结果分析

3.1 算法对近间距信源的谱分辨能力

高斯白噪声背景下, 2 组相干信源及 2 个非相干信号源, 第 1 组以 $\pi/4$ 为中心频率, 入射方向为 $[-43^\circ, -40^\circ]$; 第 2 组以 $\pi/3$ 为中心频率, 入射方向为 $[0^\circ, 3^\circ]$; 非相干信号源的入射方向为 $[20^\circ, 23^\circ]$; 信噪比为 0 dB, 快拍数为 500, 阵元数为 10, 考虑相邻的 3 个阵元间存在互耦效应, 互耦自由度 P 为 3, 设互耦矢量为 $[1, 0.5927 + 0.5854j, 0.5858 + 0.4946j]$, FBSS 的子阵数为 3. 图 1 给出了基于斜投影算子的互耦补偿法、基于 FBSS 的互耦补偿法及本文算法实验结果.

由图 1 可看出, 在低信噪比下, 3 种方法都能分辨间距较远的相干信源, 但基于 FBSS 的互耦补偿算法无法清楚地分辨 0° 和 3° 两个间距较近的信源. 本文提出的算法和基于斜投影算子的互耦补偿算法

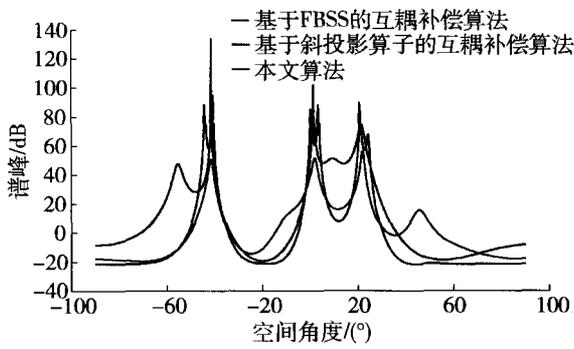


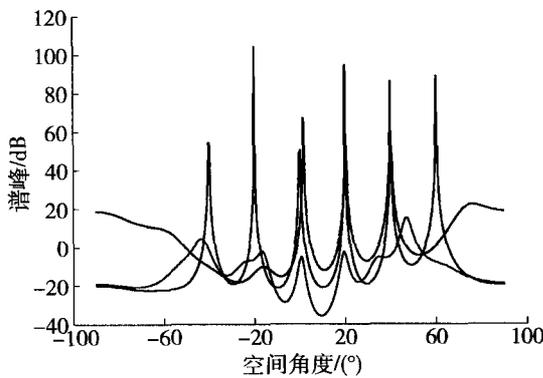
图1 对近间距信源的分辨能力

Fig. 1 Ability to distinguish close sources

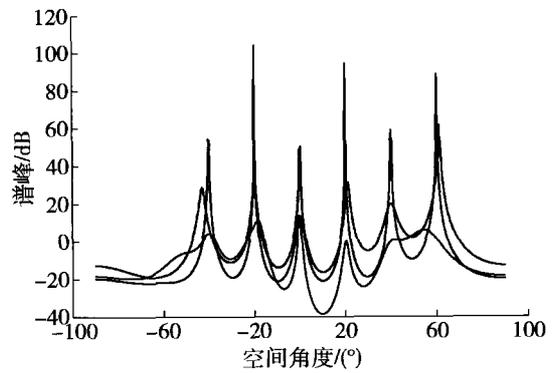
能很好地分辨各组相干信号源和非相干信号源,并且当2个信源间距较近时也能很好地分辨,但本文算法优势更加明显.

3.2 算法对噪声的抑制能力

高斯白噪声背景下,2组相干信源及2个非相



(a) SNR=-20 dB

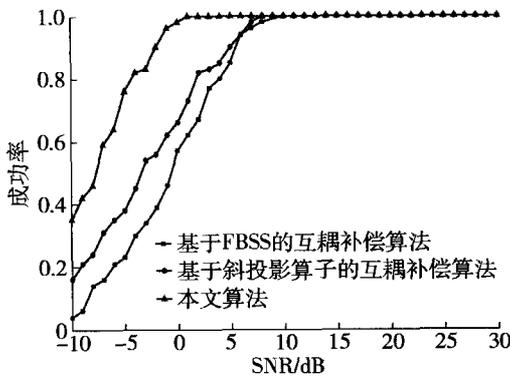


(b) SNR=-15 dB

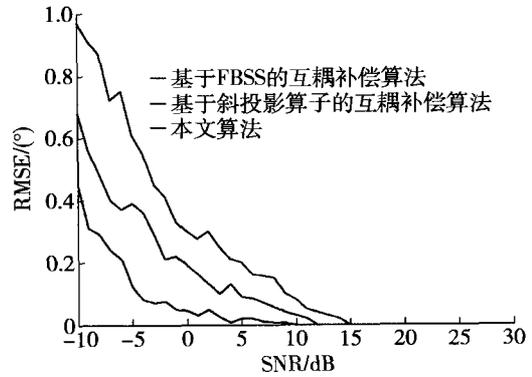
— 基于FBSS的互耦补偿算法 — 基于斜投影算子的互耦补偿算法 — 本文算法

图2 对噪声的抑制能力

Fig. 2 Ability to resolve noise



(a) 成功率随信噪比变化



(b) 均方根误差率随信噪比变化

图3 信噪比变化时的性能比较

Fig. 3 Resolution probability and RMSE versus SNR

干信号源,第1组以 $\pi/4$ 为中心频率,入射方向为 $[-20^\circ, -10^\circ]$;第2组以 $\pi/3$ 为中心频率,入射方向为 $[0^\circ, 20^\circ]$;非相干信号源的入射方向为 $[40^\circ, 60^\circ]$;噪声为高斯白噪声,信噪比为 -15 dB,其他条件与实验1相同,图2为3种算法计算机仿真结果.

由图2可知,基于FBSS的互耦补偿算法已经不能完全准确分辨入射信号源,基于斜投影算子的互耦补偿方法能准确估计出部分信号源DOA,本文算法采用Toeplitz矩阵重法,能精确地识别信号源并且效果优于基于斜投影算子的互耦补偿方法.

3.3 算法统计性能的比较

高斯白噪声背景下,比较不同算法的统计性能.实验条件与仿真2相同,仿真结果为100次蒙特卡罗实验(每个SNR或每个快拍点做100次Monte-Carlo仿真)的统计结果,图3分别为几种算法估计成功概率和均方根误差随SNR变化的比较曲线.

从图 3 所示的蒙特卡罗实验的统计结果可看出:本文算法相比其他 2 种算法具有更低的信噪比分辨门限、估计偏差和均方根误差,说明本文算法能更好地抑制高斯白噪声的影响,更有效地对相干信号源进行解相干,与仿真 1 和仿真 2 的分析结果是一致的。因此,在阵列互耦误差情况下多组相干源存在时,本文算法具有更大的优越性。

4 结论

1) 提出了一种阵列互耦误差存在时多组相干信号源和若干非相干信号源共存的情况下的信号源 DOA 估计算法,该方法首先估计互耦参数。

2) 利用所估计出来的互耦参数对阵列接收数据进行补偿;然后利用 Toeplitz 矩阵重构法对相干信号进行解相干。

3) 利用 DOA 估计的 MUSIC 算法估计各信号源的来波方向。本文算法不仅比较准确地估计了阵列互耦误差、较好地对误差进行了补偿,而且避免了阵列损失;尤其能有效地分辨近间距信源,弥补了以往各算法的不足,仿真实验证明了算法的优越性。

参考文献:

- [1] FRIEDLANDER B, WEISS A J. Direction finding using noise covariance modeling [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1995, 43(7): 1557-1567.
- [2] KRIM H, VIBERG M. Two decades of array signal processing research [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, 13(4): 67-94.
- [3] FRIEDLANDER B, WEISS A J. Direction finding in the presence of mutual coupling [J]. *IEEE Trans on AP*, 1991, 39(33): 273-284.
- [4] 王布宏, 王永良, 陈辉. 均匀线阵互耦条件下的鲁棒 DOA 估计及互耦自校正 [J]. *中国科学: E 辑*, 2004, 34(2): 229-235.
WANG Bu-hong, WANG Yong-liang, CHEN Hui. DOA Estimation and self-correction with uniform linear under mutual coupling [J]. *China Science: E*, 2004, 34(2): 229-235. (in Chinese)
- [5] SELLONE F, SERRA A. A novel online mutual coupling compensation algorithm for uniform and linear arrays [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2007, 55(2): 560-573.
- [6] PILLAI S U, KWON B H. Forward-backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification [J]. *IEEE Trans on ASSP*, 1989, 37(1): 8-15.
- [7] DI A, TAIN L. Matrix Decomposition and multiple sources location [C] // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. New York: IEEE, 1984, 33: 1-4.
- [8] BAI Jun, SHEN Xiao-hong, WANG Hai-yan, et al. Improved Toeplitz algorithms to coherent sources DOA estimation [C] // *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Piscataway: IEEE Computer Society, 2010: 442-445.
- [9] XU Xu, YE Zhong-fu, ZHANG Yu-feng. DOA estimation for mixed signals in the presence of mutual coupling [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2009, 57(9): 3523-3532.
- [10] LIAO B, CHAN S C. DOA estimation of coherent signals for uniform linear arrays with mutual coupling [C] // *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. Piscataway: IEEE, 2011: 377-380.
- [11] 谭靛林. 互耦误差条件下的阵列信号参数估计研究 [D]. 成都: 西南交通大学信息科学与技术学院, 2010.
TAN Qin-lin. Study of parameter estimation of array signal under mutual couple condition [D]. Chengdu: School of Information Science & Engineering, Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [12] 廖斌. 阵列校正与非均匀噪声环境下 DOA 估计方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学电子工程学院, 2009.
LIAO Bin. Study of array calibration and doa estimation in nonuniform noise [D]. Xi'an: School of Electronic & Engineering, Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [13] 张江利. 相干信号源 DOA 估计算法研究 [D]. 成都: 西南交通大学信息科学与技术学院, 2006.
ZHANG Jiang-li. Study on the DOA estimation algorithm for coherent signals [D]. Chengdu: School of Information Science & Engineering, Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)