

基于协方差差分的近场源定位参量估计

秦宇镒, 孙晓颖, 刘国红

(吉林大学通信工程学院, 吉林长春 130022)

摘要: 提出一种基于空间差分技术的近场源方位角和距离联合估计新算法. 算法利用平稳噪声协方差矩阵关于主对角线对称的特点, 构造近场源定位模型下的空间差分矩阵. 推导并证明了该矩阵的谱分解特性, 以此为基础确定噪声子空间, 借助谱峰搜索实现定位参量估计. 算法通过对消噪声分量有效降低了未知平稳噪声对定位精度的影响, 同时避免了应用差分技术解决信源定位时出现的伪峰问题. 均方根误差的仿真结果证明了算法的有效性.

关键词: 信源定位; 空间差分技术; 平稳噪声; 多重信号分类算法

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)01-0177-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20141438

Passive Localization for Near-Field Sources Based on Covariance Difference

QIN Yu-di, SUN Xiao-ying, LIU Guo-hong

(Department of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract: An algorithm for estimation of direction of arrival (DOA) and range of near field source based on the spatial differential technique is proposed in this paper. The algorithm firstly utilizes the feature that the stationary noise covariance matrix is symmetrical about the main diagonal and constructs the spatial difference matrix only containing the target signal location information. Then, it proves the distribution characteristics of the matrix eigenvalues and selects the noise subspace reasonably. Finally, the DOA and range estimations for near-field sources can be obtained through the spectral searching. The algorithm can effectively suppresses the unknown stationary noise and avoid the pseudo peak problems for the application of the spatial differential method when used to solve the source localization. Computer simulations confirm the satisfactory performance of the proposed algorithm.

Key words: source localization; spatial differential technique; stationary noise; multiple signal classification (MUSIC)

1 引言

阵列信号定位参量估计在无线通信、声纳、雷达等多领域具有重要研究意义^[1,2]. 依据信源与接收传感器阵列间的距离, 可分为远场源定位和近场源定位. 现有的空间谱估计研究主要集中在远场波达方向估计方面, 关于近场源定位问题的探索工作则相对较少, 然而近场情况在语音增强、声源定位和地震探测中是很常见的^[3,4].

近年来, 近场源定位理论已逐渐引起国内外学者的密切关注和深入研究^[2-8]. Huang 等人提出的近场 2-D MUSIC 算法具有较估计精度与分辨率^[2], 在高斯白

噪声背景下有良好的估计性能. Challa 借鉴远场 ESPRIT 思想构建了近场模型下的四阶累积量矩阵^[6], 利用总体最小二乘方法求解信源定位参量, 虽可将背景噪声范围扩展到高斯有色噪声, 但要求必须已知噪声的统计特性, 并且在估计精度方面略低于谱峰搜索类算法. 循环统计量算法利用信号的循环平稳特性有效抑制了未知平稳噪声和循环平稳干扰^[7]. 文献[8]结合三阶循环矩, 抑制了近场模型下平稳噪声对定位性能的影响, 但该算法对信源参数选择敏感, 且存在估计精度低的问题. 协方差空间差分技术利用平稳噪声与信号的协方差矩阵间的不同结构^[9], 构造接收数据协方差矩阵与其线性变换矩阵的差矩阵, 对消噪声相关分

收稿日期: 2016-05-27; 修回日期: 2016-11-20; 责任编辑: 郭游

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61171137); 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2013AA013704); 装备预先研究教育部支撑技术项目 (No. 625010217)

量降低了平稳噪声对定位性能的影响. 文献[10~13]等结合空间差分方法, 实现了远场相干信源波达方向估计并有效抑制了有色噪声, 但上述方法均基于远场定位模型假设.

本文提出一种未知平稳噪声环境下基于空间差分技术的近场源方位角与距离联合估计, 利用二阶统计量抑制近场源定位中的平稳噪声. 算法基于 MUSIC 思想, 降低平稳噪声影响的同时具有较高的估计精度, 通过理论推导与仿真证明了算法可有效避免应用空间差分方法解决信源定位参量估计中出现的伪峰问题, 对高性能近场源定位参量估计研究具有参考价值.

2 信号模型

如图 1 所示, 考虑 L 个窄带信号入射到由 M 个全向阵元组成的均匀线性阵列上, 阵元间距为 d . 以第 0 个全向阵元为相位参考点, 则第 m 个阵元在 k 时刻的观测信号表示为

$$x_m(k) = \sum_{l=1}^L s_l(k) e^{j\tau_{ml}} + n_m(k) \quad (1)$$

其中, $0 \leq m \leq M-1$, $s_l(k) = z_l(k) e^{j\omega_d k}$ 是第 l 个窄带信源, $z_l(k)$ 为 $s_l(k)$ 的时变包络信号. $n_m(k)$ 为第 m 个传感器接收噪声, τ_{ml} 为第 l 个窄带信源在第 0 与第 m 个传感器间的传播相位差, 表示为

$$\tau_{ml} = m\gamma_l + m^2\phi_l \quad (2)$$

其中, $\gamma_l = -2\pi d \sin \theta_l / \lambda$, $\phi_l = \pi d^2 \cos^2 \theta_l / r_l \lambda$, λ 为信号波长, θ_l 和 r_l 分别为第 l 个信源的方位角和距离参数. 式(1)的矩阵形式为

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{A}\mathbf{S}(k) + \mathbf{N}(k) \quad (3)$$

其中, 接收数据矩阵、方向矩阵、信号与接收噪声矩阵分别如式(4)~(7)所示

$$\mathbf{X}(k) = [x_0(k) \cdots x_m(k) \cdots x_{M-1}(k)]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\gamma_1, \varphi_1) \cdots \mathbf{a}(\gamma_l, \varphi_l) \cdots \mathbf{a}(\gamma_L, \varphi_L)] \quad (5)$$

$$\mathbf{S}(k) = [s_1(k) \cdots s_l(k) \cdots s_L(k)]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{N}(k) = [n_0(k) \cdots n_m(k) \cdots n_{M-1}(k)]^T \quad (7)$$

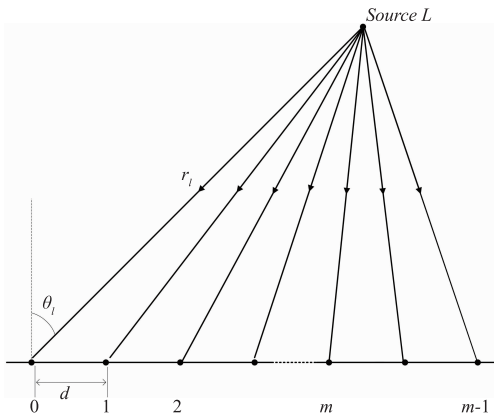


图1 基于均匀线阵的近场源定位模型

式(5)中, 方向向量 $\mathbf{a}(\gamma_l, \varphi_l)$ 包含第 l 个人射信号方位角与距离信息, 具有如下形式:

$$\mathbf{a}(\gamma_l, \varphi_l) = [1, e^{j(\gamma_l + \varphi_l)}, \dots, e^{j[(M-1)\gamma_l + (M-1)\varphi_l}]^T \quad (8)$$

不失一般性, 做如下假设:

假设 1 信源信号为相互独立的窄带平稳随机过程, 方向矩阵 \mathbf{A} 为满秩矩阵.

假设 2 背景噪声为统计分布未知的平稳过程, 且与信号独立.

假设 3 阵元间距 $d \leq \lambda/4$, 阵元数大于信源数的两倍, 即 $M > 2L$.

3 基于差分技术的近场源定位方法

3.1 近场模型下差分矩阵的构建

根据式(3)的观测信号矩阵形式, 定义接收数据的协方差矩阵 \mathbf{R}_x 为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x &= E\{\mathbf{X}(k)\mathbf{X}(k)^H\} = \mathbf{A}E\{\mathbf{S}(k)\mathbf{S}(k)^H\}\mathbf{A}^H \\ &\quad + E\{\mathbf{N}(k)\mathbf{N}(k)^H\} \\ &= \mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H + \mathbf{Q} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $(\cdot)^H$ 为共轭转置, \mathbf{S} 为信号自相关矩阵, \mathbf{Q} 为噪声的协方差矩阵. 由式(9)构造经转置变换的空间差分矩阵为

$$\mathbf{R}_D = \mathbf{R}_x - \mathbf{R}_x^T = \mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H + \mathbf{Q} - (\mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H)^T - \mathbf{Q}^T \quad (10)$$

由于平稳噪声协方差矩阵 \mathbf{Q} 具有对称结构^[14], 可知 $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T$, 得

$$\mathbf{R}_D = \mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H - (\mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H)^T = \mathbf{R}_s - \mathbf{R}_s^T \quad (11)$$

其中 $\mathbf{R}_s = \mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H = \mathbf{A}E\{\mathbf{S}(k)\mathbf{S}(k)^H\}\mathbf{A}^H$ 为信号的协方差矩阵. 容易发现, 噪声协方差矩阵 \mathbf{Q} 已从差分矩阵中消除, 这意味着新算法能有效降低近场源定位中未知平稳噪声对定位估计性能的不利影响, 对复杂环境下的信源定位参量估计有着重要的意义.

3.2 近场差分矩阵谱分解特点

对差分矩阵 \mathbf{R}_D 特征值分解得

$$(\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_s^T)\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{V} \quad (12)$$

$\mathbf{A} = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M]$ 为降序排列的对角矩阵, $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L \geq \lambda_{L+1} = \dots = \lambda_M = \sigma^2$, 其特征值对应的特征向量为 $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_M$. 设 λ_i 为差分矩阵特征值, 其对应特征向量为 \mathbf{u}_i 有

$$(\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_s^T)\mathbf{u}_i = \lambda_i \mathbf{u}_i \quad (13)$$

式(13)两边同时取共轭得

$$(\mathbf{R}_s^* - \mathbf{R}_s^H)\mathbf{u}_i^* = \lambda_i \mathbf{u}_i^* \quad (14)$$

利用 Hermite 矩阵共轭转置等于本身且共轭矩阵与转置矩阵相等的性质^[14], 可得式(15), 将式(15)等号左右同乘 -1 得式(16)

$$(\mathbf{R}_s^T - \mathbf{R}_s)\mathbf{u}_i^* = \lambda_i \mathbf{u}_i^* \quad (15)$$

$$(\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_s^T)\mathbf{u}_i^* = -\lambda_i \mathbf{u}_i^* \quad (16)$$

其中,上标 $(\cdot)^*$ 表示共轭.由式(13)与式(16)对比可知,若 λ_i 为 $\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_s^T$ 的一个特征值, \mathbf{u}_i 为 λ_i 对应的特征向量,则有 $-\lambda_i$ 仍为 $\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_s^T$ 的特征值而此时对应的特征向量为 \mathbf{u}_i^* .得证我们建立差分矩阵与文献[9]构建的差分矩阵具有类似的特性,特征值均关于0对称分布且正负成对出现.这一性质也同时降低了协方差差分矩阵 \mathbf{R}_D 特征值分解的计算量.

由于大特征值对应 L 个信源,且其正负成对出现,取 $M - 2L$ 个零特征值对应的特征向量张成零值子空间,现需证明该零值子空间与方向向量正交,根据式(10)和式(11)有

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_s - \mathbf{R}_s^T &= \mathbf{A} \mathbf{S} \mathbf{A}^H - (\mathbf{A} \mathbf{S} \mathbf{A}^H)^T \\ &= (\mathbf{A} \quad \mathbf{A}^T) \begin{pmatrix} \mathbf{S} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{S}^T \end{pmatrix} (\mathbf{A} \quad \mathbf{A}^T)^H \end{aligned} \quad (17)$$

设 \mathbf{u} 为差分矩阵零值子空间的一个特征向量,可知

$$(\mathbf{A} \quad \mathbf{A}^T) \begin{pmatrix} \mathbf{S} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{S}^T \end{pmatrix} (\mathbf{A} \quad \mathbf{A}^T)^H \mathbf{u} = 0 \quad (18)$$

由假设知 \mathbf{S} 是非奇异的且信源方向矩阵 \mathbf{A} 具有满秩结构,式(18)左、右乘式(19)可得式(20)

$$\begin{pmatrix} \mathbf{S} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{S}^T \end{pmatrix}^{-1} [(\mathbf{A} \quad \mathbf{A}^T)^H (\mathbf{A} \quad \mathbf{A}^T)]^{-1} (\mathbf{A} \quad \mathbf{A}^T)^H (\mathbf{A} \quad \mathbf{A}^T)^H \mathbf{u} = 0 \quad (20)$$

可见零值子空间的特征向量与 $(\mathbf{A} \quad \mathbf{A}^T)$ 列向量正交,即与差分矩阵的协方差矩阵方向向量 $\mathbf{a}(\gamma_l, \varphi_l)$ 正交,将 $M - 2L$ 个零特征值对应特征向量张成的零值子空间记为噪声子空间 \mathbf{U}_n , $2L$ 个非零特征值对应特征向量张成信号子空间.至此,近场源空间差分矩阵噪声子空间的确定得到了很好的证明.

3.3 近场源方位角与距离同时估计

有限快拍数下,接收数据协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_X$ 与差分矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_D$ 为

$$\hat{\mathbf{R}}_X = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{X}(k_n) \mathbf{X}(k_n)^H \quad (21)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_D = \hat{\mathbf{R}}_X - \hat{\mathbf{R}}_X^T = \hat{\mathbf{R}}_X - \hat{\mathbf{R}}_X^T \quad (22)$$

基于 MUSIC 算法思想,对 $\hat{\mathbf{R}}_D$ 特征值分解,选取 $M - 2L$ 个小特征值对应的特征向量,得噪声子空间 $\hat{\mathbf{U}}_n$,利用信号方向矢量与噪声子空间的正交性得

$$\mathbf{A}^H \hat{\mathbf{U}}_n \hat{\mathbf{U}}_n^H \mathbf{A} = \mathbf{0} \quad (23)$$

求解谱函数得

$$P(\hat{\theta}, \hat{r}) = \frac{1}{|\mathbf{a}^H(\theta, r) \hat{\mathbf{U}}_n \hat{\mathbf{U}}_n^H \mathbf{a}(\theta, r)|} \quad (24)$$

在 $(\hat{\theta}, \hat{r})$ 平面内进行谱峰搜索得到信源的角度和距离参数.

3.4 近场源空间差分算法的伪峰区分

如式(13)~(16)所证,利用差分技术,接收数据协方

差矩阵特征值正负成对出现,故远场条件下,有方向矩阵

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_m(-\theta) &= -2\pi d m \sin(-\theta) / \lambda \\ &= -2\pi d m \sin(\theta) / \lambda \\ &= \mathbf{a}_m(\theta) \end{aligned} \quad (25)$$

即远场空间差分算法存在信源来波方向负角度上出现伪峰的问题,在近场源模型中,由于 $\varphi_l = \pi d^2 \cos^2 \theta_l / r_l \lambda$ 项的存在, $\mathbf{a}_m(\gamma_l, \varphi_l)$ 是包含 θ 与 r 二维参数的非线性函数.谱峰搜索公式 $\mathbf{a}^H(-\hat{\theta}, \hat{r}) \hat{\mathbf{U}}_n \hat{\mathbf{U}}_n^H \mathbf{a}(-\hat{\theta}, \hat{r})$ 不为零,即近场差分方法有效避免空间差分技术带来的伪峰问题.

4 仿真分析

考虑由15个阵元组成的均匀线阵,阵元间距为 $\lambda/4$,信源数 $L=2$.近场信源 NF_1 和 NF_2 的方位角与距离参数分别为 $[\theta_1 = 25^\circ, r_1 = \lambda/4]$, $[\theta_2 = 10^\circ, r_2 = \lambda/2]$.信源信号采用载波频率不同的窄带复正弦信号.

实验1 近场源空间差分算法的伪峰问题.选取与近场信源具有相同入射角度的远场信源 FF_1 和 FF_2 ,到达角分别为 $\theta_3 = 25^\circ, \theta_4 = 10^\circ$,背景噪声 $n_m(k)$ 为信噪比为5dB的高斯白噪声.近场源、远场源空间谱分别如图2和图3所示.

下面通过三组 Monte-Carlo 仿真实验验证算法的估

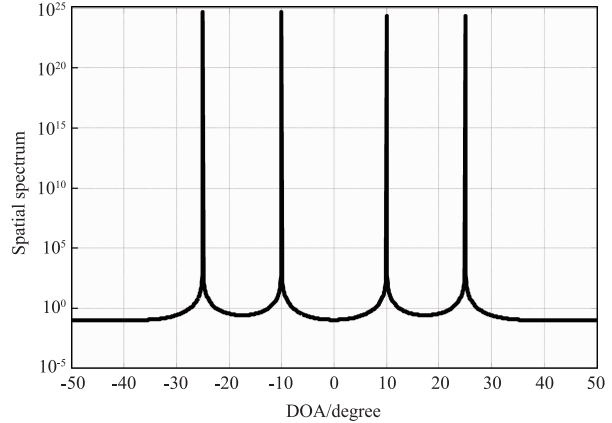


图2 远场差分MUSIC算法

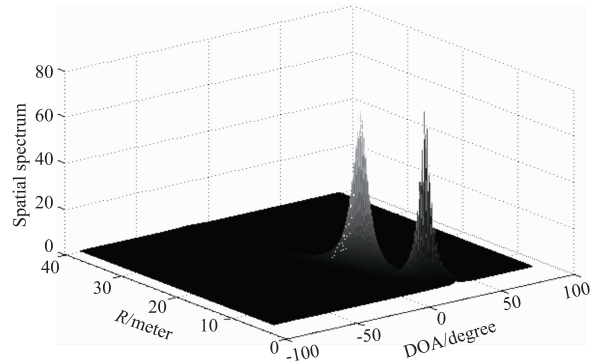


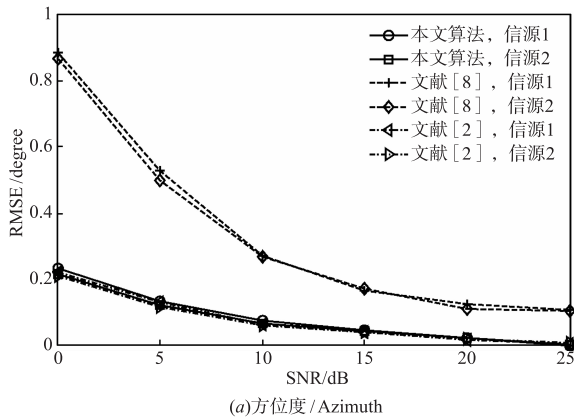
图3 近场差分MUSIC算法

计性能. 本文算法将与文献[2]、文献[8]算法进行比较, 其中只考虑文献[8]算法在加性噪声下性能, 且文献[8]信号采用循环平稳信号, 其它仿真条件相同. 所有实验进行 200 次 Monte-Carlo 仿真, 快拍数固定为 1024, 信噪比从 0dB 变化到 25 dB.

论文所有仿真信噪比(SNR)与方位角、距离的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)定义分别为

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{E\{s(t)s^H(t)\}}{E\{n(t)n^H(t)\}}$$

$$\text{RMSE}_\theta = \sqrt{\frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} (\hat{\theta}_i - \theta)^2} \quad (26)$$



$$\text{RMSE}_r = \sqrt{\frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \left(\frac{\hat{r}_i - r}{r} \right)^2} \quad (27)$$

其中, $\hat{\theta}_i$ 为参数 θ 的估计值, \hat{r}_i 为参数 r 的估计值, N_r 为 Monte-Carlo 实验次数.

实验 2 分析所提算法对高斯白噪声的抑制能力. 方位角与距离参数估计值的均方根误差如图 4(a)(b) 所示.

实验 3 分析所提算法对指数分布噪声的抑制能力. 方位角与距离参数估计值的均方根误差如图 5(a)(b) 所示.

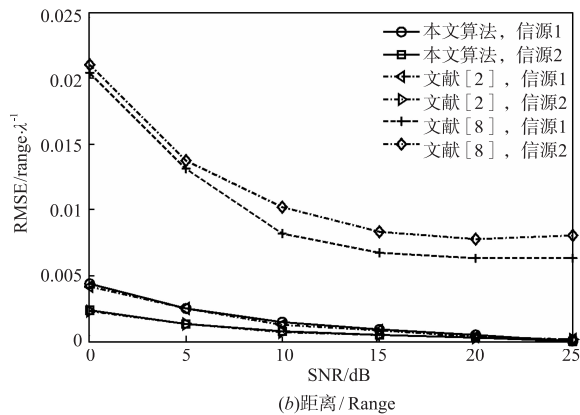


图4 高斯白噪声下参数RMSE随信噪比的变化曲线

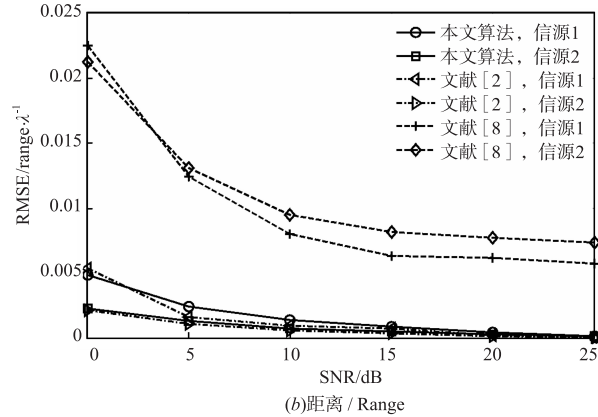
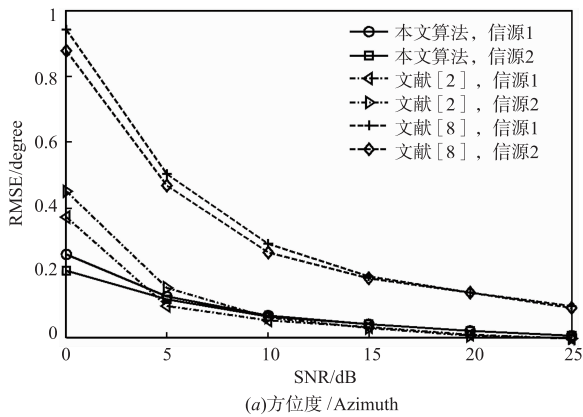


图5 指数噪声下参数RMSE随信噪比的变化曲线

实验 4 分析所提算法对指数分布噪声通过参数为 $(-1.8, 0.9)$ 的二阶 AR 模型产生的非高斯色噪声的抑制能力. 方位角与距离参数估计值的均方根误差如图 6(a)(b) 所示.

仿真分析结果表明:

(1) 由图 2 和图 3 可见, 近场空间差分算法不会出现来波方向负角度的伪峰, 有效避免了远场差分中的伪峰区分问题.

(2) 在高斯白噪声、指数分布噪声和非高斯色噪声

情况下, 相比于文献[2]、文献[8]算法, 本文算法在方位角与距离均有更优越的估计性能. 由图 4 可见, 由于本文算法大特征值正负成对出现, 存在一定的孔径损失, 故高斯白噪声下与文献[2]方法有着相似的估计精度并优于文献[8]算法. 但如实验 3、实验 4 可见, 当指数分布噪声、非高斯色噪声下, 文献[2]方法估计性能有所下降. 以表 1 为例. 由仿真结果可知, 本文算法采用空间差分技术有效抑制未知平稳噪声的影响, 提高了近场源定位参量估计精度.

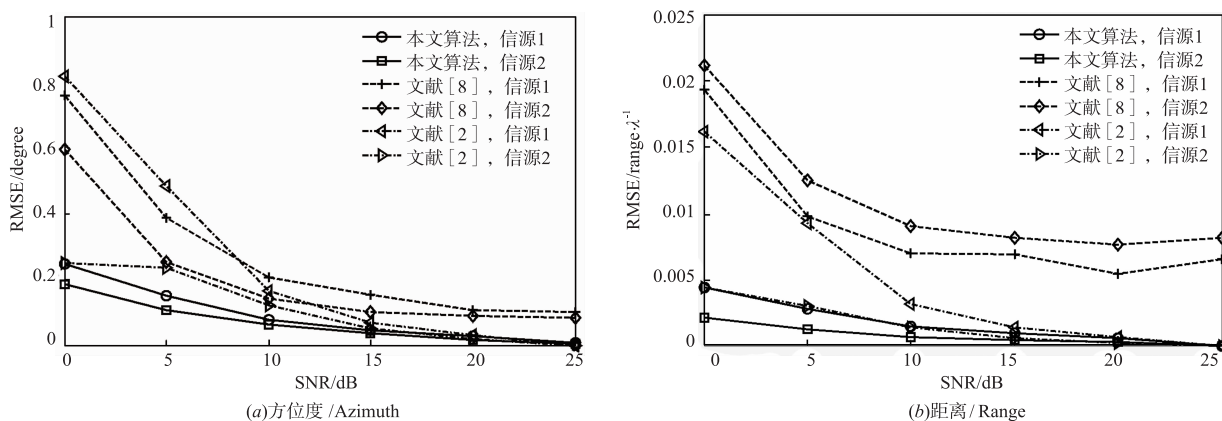


图6 非高斯色噪声下参数RMSE随信噪比的变化曲线

表 1 5dB 非高斯色噪声下信源 1 角度估计均值、方差比较

| 算法 | $\theta_1 = 25^\circ$ | | $r_1 = 0.25\lambda$ | |
|-------|-----------------------|--------|---------------------|---------|
| | 均值 | 方差 | 均值 | 方差 |
| 本文算法 | 25.001° | 0.0168 | 0.250 λ | 3.67e-6 |
| 文献[2] | 24.539° | 0.0188 | 0.252 λ | 4.22e-6 |
| 文献[8] | 24.954° | 0.1389 | 0.251 λ | 7.52e-5 |

(3) 如图 5 和图 6 所示,文献[2]和文献[8]算法在 5dB 以下时方位角与距离的 RMSE 明显增大,本文算法在 0dB 时仍有较高的精度.同时,本文算法的 RMSE 曲线波动更小更平滑,稳定性更强.从仿真结果可以看出,本文算法在低信噪比条件下具有更好的估计性能.

5 结论

针对未知平稳噪声下近场源方位角和距离的估计问题,提出了一种基于空间差分技术的联合估计算法.该算法通过构造近场源定位模型下的空间差分矩阵,有效抑制了平稳噪声.同时避免了应用差分技术解决信源定位时出现的“伪”DOA 问题.仿真结果表明,该算法兼顾高估计精度与有效处理未知平稳噪声的优势,尤其在非高斯有色噪声及低信噪比背景下,显著提高了近场源定位参量估计性能.

参考文献

- [1] Krim H, Viberg M. Two decades of array processing research: The parametric approach[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4): 67-94.
- [2] Huang Y D, Barkat M. Near-field multiple source localization by passive sensor array[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1993, 18(2): 968-975.
- [3] 梁军利, 冀邦杰, 赵峰, 张军英. 一种基于平行因子分析的近场源定位新方法[J]. 电子学报, 2007, 35(10): 1909-1915.

Liang Jun-li, Ji Bang-jie, Zhao Feng, Zhang Jun-ying. A new near-field source localization algorithm using parallel factor analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(10): 1909-1915. (in Chinese)

- [4] 梁国龙, 韩博, 林旺生, 王丹. 基于稀疏信号重构的近场源定位[J]. 电子学报, 2014, 42(6): 1041-1046.
Liang Guo-long, Han Bo, Lin Wang-sheng, Wang Dan. Near-field sources localization based on sparse signal Reconstruction[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(6): 1041-1046. (in Chinese)
- [5] Grosicki E, Abed-Meraim K, Hua Y. A weighted linear prediction method for near-field source localization[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2005, 53(10): 3651-3660.
- [6] R N Challa, S Shamsunder. High-order subspace based algorithms for passive localization of near-field sources[A]. 29th Asilomar Conference on Signals [C]. USA: IEEE, 1995. 777-781.
- [7] 叶方, 杨莘元, 李一兵, 等. 基于循环自相关的 DOA 估计方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(6): 792-795.
Ye Fang, Yang Xin-yuan, Li Yi-bing, et al. Estimating DOA based on cyclic auto correlation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005, 26(6): 792-795. (in Chinese)
- [8] 孙晓颖, 王波, 姜宏. 乘性噪声背景下基于三阶循环矩的二维近场源定位方法[J]. 电子学报, 2009, 37(7): 1324-1328.
Sun Xiao-ying, Wang Bo, Jiang Hong. Two dimensional near field sources localization based on third-order cyclic moment in multiplicated Noise[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7): 1324-1328. (in Chinese)
- [9] Surendra Prasad, Ronald T Williams, A K Mahalanabis. A transform-based covariance differencing approach for some classes of parameter estimation problems[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1988, 36(5): 631-641.

- [10] 齐崇英,王永良,张永顺,等. 色噪声背景下相干信源 DOA 估计的空间差分平滑算法[J]. 电子学报,2005,33(7):1314-1318.
Qi Chong-ying, Wang Yong-liang, Zhang Yong-shun, et al. Spatial difference smoothing algorithm for DOA estimation of coherent sources in the presence of colored noise fields [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(7): 1314-1318. (in Chinese)
- [11] Jinkuang Wang, Ruiyan D, Fulai Liu. A new method based on the spatial differencing technique for DOA estimation [A]. 2010 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC) [C]. USA: IEEE, 2010. 44-48.
- [12] 张进,叶中付,王伟. 一种新的未知相关噪声下的宽带相干信号 DOA 估计算法[J]. 电子学报,2012,33(8):1119-1126.
Zhang Jin, Ye Zhong-fu, Wang Wei. A novel DOA estimation algorithm for wideband coherent signals in the presence of unknown correlated noise [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 33(8): 1119-1126. (in Chinese)
- [13] 郭艳,刘学亮,李宁,等. 适于相干信号 DOA 估计的改进矩阵差分方法[J]. 北京邮电大学学报,2011,34(2):123-126.

Guo Yan, Liu Xue-liang, Li Ning, et al. Modified covariance matrix differencing method for DOA estimation of coherent signals [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011, 34(2): 123-126. (in Chinese)

作者简介



秦宇韬 男,1987年7月生于吉林省长春市,吉林大学通信工程学院博士研究生. 主要研究方法为阵列信号处理.

E-mail: qinyd13@163.com

孙晓颖(通讯作者) 男,1969年8月生于吉林省公主岭市,吉林大学通信工程学院教授,博士生导师,主要研究方向为信号参量估计理论及应用与电磁兼容技术.

E-mail: sunxy@jlu.edu.cn

刘国红 女,1986年10月生于内蒙古自治区通辽市,博士研究生,主要研究方向为阵列信号处理.

E-mail: liugh10@mails.jlu.edu.cn