

基于投影矩阵搜索的相干源 DOA 估计算法*

宗佳虹[✉], 戴旭初

(中国科学技术大学 电子工程与信息科学系 合肥 230027)

摘要: 在强相关或相干信号源环境下, 基于子空间分解的高分辨率方法无法准确估计信号到达角, 而许多传统的解相干方法, 如空间平滑法等, 会减少阵列的有效孔径, 且只适用于具有移不变性的阵列结构。针对相干信源 DOA 估计问题, 提出了一种基于投影矩阵搜索的 DOA 估计算法。首先根据阵列流型构造噪声子空间的投影矩阵, 并将阵列接收信号投影到噪声子空间; 然后通过遍历搜索所有可能的投影矩阵获得空间谱, 进而得到相干源的 DOA 估计。该算法能有效进行相干信源 DOA 估计, 与传统的相干源 DOA 估计方法相比, 该算法不会减小阵列的有效孔径, 且适用于任意阵列结构, 并具有良好的估计精度和超分辨率能力, 但计算复杂度较高。通过仿真实验, 验证了该算法的有效性, 比较了该算法与传统算法的性能。

关键词: DOA 估计; 相干源; 投影矩阵

中图分类号: TN951 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)03-0001-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211120001

引用格式: 宗佳虹, 戴旭初. 基于投影矩阵搜索的相干源 DOA 估计算法[J]. 遥测遥控, 2022, 43(3): 1-7.

DOA estimation algorithm for coherent signal sources based on projection matrix search

ZONG Jiahong, DAI Xuchu

(University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: For strongly correlated or coherent signal sources, the high-resolution methods based on subspace decomposition can not accurately estimate signal direction of arrival. While most decorrelation algorithms, such as spatial smoothing, will reduce the efficient aperture, and is only suitable to the array structure with shift-invariance. A new DOA estimation algorithm based on projection matrix search is proposed for coherent sources. Firstly, the projection matrix of the noise subspace is constructed, which is based on the array manifold, and then the array received signal is projected into the noise subspace. Secondly, the spatial spectrum is calculated by searching all possible projection matrices, thus the DOA estimation of coherent sources is obtained. The proposed algorithm can effectively estimate the DOA of coherent sources. Compared with the conventional DOA estimation method for coherent sources, the proposed algorithm will not reduce array aperture, and can be applied to any arrays, and possesses better estimation accuracy and super-resolution capability, but the computational complexity of the proposed algorithm is higher. Simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm and its superior performance over conventional algorithms.

Key words: DOA estimation; Coherent source; Projection matrix

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211120001

Citation: ZONG Jiahong, DAI Xuchu. DOA estimation algorithm for coherent signal sources based on projection matrix search[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(3): 1-7.

引 言

波达方向 (DOA) 估计是阵列信号处理的研究热点, 在雷达^[1]、导航^[2]等领域具有广泛的应用前景。

*基金项目: 国家自然科学基金 (61971391)

[✉]通信作者: 宗佳虹 (zongjh1999@mail.ustc.edu.cn)

收稿日期: 2021-11-20 收修改稿日期: 2021-12-17

传统的 DOA 估计算法中, 多重信号分类算法 MUSIC^[3]、旋转不变子空间算法 ESPRIT^[4]等子空间类算法具有良好的估计性能和超分辨率能力, 但是对于相干源, 阵列输出信号的协方差矩阵的秩亏导致子空间估计错误, 从而使算法失效^[5,6]。

针对相干源 DOA 估计问题, 许多学者提出了解相干算法, 例如空间平滑法^[7,8]、Toeplitz 矩阵重构法^[9]、基于 SVD 的解相干算法^[10]等。文献[7]提出的空间平滑算法具有良好的解相干性能, 且计算量小, 被广泛应用于实际工程中。但是, 空间平滑算法存在阵列孔径的损失, 从而降低估计的分辨率与精度, 特别是, 空间平滑算法只适合于特殊阵列, 即需要子阵列结构具有移不变性, 例如均匀线阵。

对于一般的阵列, 可以考虑采用虚拟内插变换法^[11,12]将其变换为均匀阵列, 再进行空间平滑等解相干处理。虚拟内插变换是在某扇区范围内进行内插, 将原阵列变换为一个虚拟阵列。不过, 虚拟阵列变换只能针对某一入射角范围, 且会引入额外的误差, 内插范围越大, 变换误差越大, 从而导致 DOA 估计性能降低。

针对上述问题, 本文提出了一种基于投影矩阵搜索的 DOA 估计算法, 其基本思想是由阵列流型导出噪声子空间的投影矩阵, 将接收信号样本投影到噪声子空间, 获得空间谱, 进而得到相干源的 DOA 估计。该算法适用于任意阵列结构(如非均匀线阵), 且无需进行虚拟内插、空间平滑等预处理, 避免了变换误差和孔径损失, 具有良好的估计性能。

1 信号模型

考虑 K 个远场窄带平稳信号入射到空间某窄带阵列上, 设阵列的阵元数为 $M (M > K)$, 信号中心频率为 ω , 第 m 个阵元在时刻 t 的输出信号可表示为:

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^K s_i(t - \tau_m(\theta_i)) + v_m(t) = \sum_{i=1}^K s_i(t) e^{-j\omega\tau_m(\theta_i)} + v_m(t) \quad (1)$$

其中, $s_i(t)$ 为第 i 个窄带源信号, θ_i 为第 i 个信源到达阵列的入射角, $\tau_m(\theta_i)$ 为第 i 个源信号到达第 m 个阵元时相对于参考阵元的时延, $v_m(t)$ 为第 m 个阵元的加性噪声, 其功率为 σ^2 。将 M 个阵元 t 时刻的接收信号表示成矢量形式, 则有:

$$\begin{pmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_M(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-j\omega\tau_1(\theta_1)} & \dots & e^{-j\omega\tau_1(\theta_K)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\omega\tau_M(\theta_1)} & \dots & e^{-j\omega\tau_M(\theta_K)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1(t) \\ \vdots \\ s_K(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_1(t) \\ \vdots \\ v_M(t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

令 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_M(t)]^T$ 为阵列接收信号矢量, $\mathbf{a}(\theta_i) = [e^{-j\omega\tau_1(\theta_i)}, \dots, e^{-j\omega\tau_M(\theta_i)}]^T$ 为阵列在 θ_i 方向上的导向矢量, 阵列流型 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_K)]$, $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_K(t)]^T$, $\mathbf{v}(t) = [v_1(t), \dots, v_M(t)]^T$, 则阵列接收信号可表示为:

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

设快拍数为 N , 则接收到的 N 个信号样本用矩阵形式可表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{V} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{X} = [\mathbf{x}(t_1), \dots, \mathbf{x}(t_N)]$, $\mathbf{S} = [\mathbf{s}(t_1), \dots, \mathbf{s}(t_N)]$, $\mathbf{V} = [\mathbf{v}(t_1), \dots, \mathbf{v}(t_N)]$ 。

定义阵列接收信号的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}(t)^H\} \approx \frac{1}{N} \mathbf{X}\mathbf{X}^H \quad (5)$$

对 \mathbf{R} 进行特征分解, 则有:

$$\mathbf{R} = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H \quad (6)$$

其中, λ_i 和 \mathbf{u}_i 分别为 \mathbf{R} 的第 i 个特征向量和特征值, 且 M 个特征值满足如下关系:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_K \geq \lambda_{K+1} = \dots = \lambda_M = \sigma^2 \quad (7)$$

基于特征空间理论, $\mathbf{U}_s = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_K]$ 构成了接收信号的信号子空间, $\mathbf{U}_n = [\mathbf{u}_{K+1}, \mathbf{u}_{K+2}, \dots, \mathbf{u}_M]$ 构成了接收信号的噪声子空间, 且 \mathbf{U}_s 与 \mathbf{U}_n 正交。子空间类算法就是利用该正交性进行 DOA 估计, 因此传统的子空间类算法需要对子空间进行准确的估计。

实际应用环境中, 源信号之间可能是相关或相干的。设两平稳信号 $s_i(t)$ 、 $s_k(t)$, 其相关系数定义为:

$$\rho_{ik} = \frac{E\{[s_i(t) - E(s_i(t))][s_k(t) - E(s_k(t))]\}}{\sqrt{E\{[s_i(t) - E(s_i(t))]^2\}E\{[s_k(t) - E(s_k(t))]^2\}}} \quad (8)$$

由 Schwartz 不等式可知 $|\rho_{ik}| \leq 1$, 当 $|\rho_{ik}| = 0$ 时, 称 $s_i(t)$ 与 $s_k(t)$ 为独立信号源; 当 $0 < |\rho_{ik}| < 1$ 时, 称 $s_i(t)$ 与 $s_k(t)$ 为相关信号源; 当 $|\rho_{ik}| = 1$ 时, 称 $s_i(t)$ 与 $s_k(t)$ 为相干信号源^[13]。

对于独立或弱相关信号源, 信号子空间的维数等于信源数 K ; 而对于强相关或相干信号源, 信号子空间的维数小于 K , 也就是说, 相干信号源会导致协方差矩阵 \mathbf{R} 秩亏缺, 从而使子空间 \mathbf{U}_s 与 \mathbf{U}_n 估计错误。因此, 传统的子空间类算法难以有效估计相干源 DOA。

2 基于虚拟阵列变换和空间平滑的 MUSIC 算法

本节简要介绍已有的相干源 DOA 估计方法。对于具有移不变性的阵列结构, 常用的相干源 DOA 估计方法是 J.E.Evans 等人提出的空间平滑算法^[7]; 对于一般的非移不变的阵列结构, 考虑采用虚拟内插变换法将其变换为具有移不变性的虚拟阵列^[11], 再进行空间平滑。

空间平滑算法是将阵列分成若干个相同结构的子阵, 对每个子阵的协方差矩阵进行平均运算, 这样得到的平滑后的协方差矩阵, 其秩得以恢复, 从而实现解相干。但是, 此方法是以牺牲阵列孔径为代价的, 且只适用于具有移不变性的阵列结构。

虚拟内插变换法最早由 Friedlander.B 等人提出。假设源信号位于某个角度范围 Θ 内, 将 Θ 区间离散化, 即将 Θ 划分为 r 个离散角度的集合, $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r]$, 其中 θ_1 、 θ_r 为角度范围的左、右边界, 且 $r > M$, 则与 $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r]$ 相对应的原阵列的阵列流型为:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_r)] \quad (9)$$

与 $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r]$ 相对应的虚拟阵列的阵列流型:

$$\bar{\mathbf{A}} = [\bar{\mathbf{a}}(\theta_1), \bar{\mathbf{a}}(\theta_2), \dots, \bar{\mathbf{a}}(\theta_r)] \quad (10)$$

\mathbf{A} 与 $\bar{\mathbf{A}}$ 之间的变换关系由变换矩阵 \mathbf{B} 表征, 即 $\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{B}^H \mathbf{A}$, 基于最小二乘原理, 可得:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{A}\mathbf{A}^H)^{-1} \mathbf{A}\bar{\mathbf{A}}^H \quad (11)$$

另外, 为保持原阵列和虚拟阵列的噪声特性不变, 需要对 \mathbf{B} 进行修正, 修正后的变换矩阵为:

$$\mathbf{T} = (\mathbf{B}^H \mathbf{B})^{-1/2} \mathbf{B}^H \quad (12)$$

通过对虚拟阵列进行传统的空间平滑处理, 可实现解相干, 然后可采用一般的空间谱估计方法进行测角, 如 MUSIC 算法。

值得注意的是, 虚拟内插变换需要到达角的范围, 即需要确定信源到达角的大致位置。这里考虑采用 Capon 算法^[14]确定虚拟内插变换的角度范围。Capon 算法的基本思想是在期望方向信号功率不变的情况下, 最小化总功率, 也就是最小化噪声及非信源方向干扰功率, 该算法的空间谱表示为:

$$p_c(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{a}(\theta)} \quad (13)$$

由于 Capon 算法对相干性不敏感, 但与子空间类算法相比, 其性能较差, 且分辨率受波束宽度限制, 因此考虑采用 Capon 算法对空间谱进行一次搜索, 取每个谱峰值处的一个波束宽度范围, 取它们的并集作为虚拟内插的范围。

综上, 基于虚拟阵列变换和空间平滑的 MUSIC 算法流程总结如下。

输入: 信源数 K , 阵列流型 \mathbf{A} , 接收信号样本 \mathbf{X} ;

输出: 各信源的 DOA 估计。

- ① 用 Capon 算法进行一次搜索, 确定虚拟内插范围;
- ② 根据式 (11)、(12) 将原阵列变换为虚拟均匀阵列;
- ③ 针对虚拟均匀阵列, 用空间平滑法进行解相干处理;
- ④ 利用 MUSIC 算法得到 DOA 估计。

理论上, 基于虚拟阵列变换的空间平滑 MUSIC 算法可以进行相干源 DOA 估计, 但是, 虚拟阵列变换中引入的变换误差会降低最后的 DOA 估计性能, 且内插范围越大, 变换误差越大。另外, 空间平滑算法导致的孔径损失也会降低 DOA 估计的精度与分辨率。

3 本文算法

现有的基于空间谱 DOA 估计方法, 都是利用阵列接收到的数据来构造信号子空间和噪声子空间, 然后将阵列的导向矢量投影到噪声子空间来获得空间谱, 并通过对导向矢量的搜索得到 DOA 估计。与现有的方法不同, 本节将提出一种 DOA 估计的新方法, 即基于投影矩阵搜索的 DOA 估计算法, 其基本思想是利用阵列结构来构造信号子空间的投影矩阵, 再根据信号子空间和噪声子空间的正交性, 得到噪声子空间的投影矩阵, 然后将阵列接收到的数据投影到噪声子空间来构造空间谱, 从而通过投影矩阵的搜索得到空间谱和 DOA 估计。

3.1 算法设计

3.1.1 噪声子空间的构造

设信源数为 K , 将 K 个信源的 DOA 写成矢量形式 $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_K]$, 由于信号子空间与导向矢量张成的空间是同一个空间, 因此, 利用阵列流型 $A(\theta) = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_K)]$, 可以得到信号子空间的投影矩阵^[15]:

$$P_A(\theta) = A(\theta) \left(A(\theta)^H A(\theta) \right)^{-1} A(\theta)^H \quad (14)$$

由于信号子空间与噪声子空间正交, 得到噪声子空间的投影矩阵:

$$P_N(\theta) = P_A^\perp(\theta) = I - P_A(\theta) \quad (15)$$

由式 (14)、(15) 可以看出, 本文算法的子空间是根据阵列流型构造的, 与信号无关。

3.1.2 数据样本的降维处理

为了提高该算法的抗噪声能力, 同时降低算法的复杂度, 这里先对信号样本进行时域降维预处理。将信号样本 X 进行奇异值分解, 得到:

$$X = UDV^H \quad (16)$$

其中, U 为左奇异矩阵, V 为右奇异矩阵, D 为一 $M \times N$ 维的对角阵; 取 V 的前 K 列, 记为 V' , 取 D 的前 K 列和前 K 行, 记为 D' , 即保留信号空间的功率、去除噪声空间的功率, 则降维处理后的数据样本为:

$$X' = XV' D' \quad (17)$$

通常, N 远大于 K , 通过上述处理将 $M \times N$ 维信号样本 X 降维成 $M \times K$ 维的 X' , 减小了后续的投影运算的计算量。

3.1.3 数据样本的投影和空间谱

将处理过的信号样本 X' 投影到噪声子空间, 得到

$$Z = P_N(\theta) X' \quad (18)$$

由于 X' 始终位于信号空间, 当 θ 为真实的到达角时, $P_N(\theta)$ 对应的噪声子空间与真实的信号空间正交, 此时 $P_N(\theta)$ 与 X' 正交, $Z = \mathbf{0}$; 当 θ 不是真实到达角时, 该正交性不成立, 即 $P_N(\theta)$ 与 X' 不正交, $Z \neq \mathbf{0}$ 。

3.1.4 基于空间谱搜索的 DOA 估计

因此, 在可能的到达角范围内, 通过对投影矩阵 $P_N(\theta)$ 的搜索获得空间谱, 参考上节的算法一, 可能的到达角范围也可利用 Capon 算法得到, 本文算法的空间谱表示为:

$$p(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\|\mathbf{Z}\|_F} \quad (19)$$

最后通过峰值搜索, 得到 DOA 估计。

3.1.5 算法流程

基于上述分析和讨论, 本文提出算法的流程总结如下。

输入: 信源数 K , 阵列流型 \mathbf{A} , 接收信号样本 \mathbf{X} ;

输出: 各信源的 DOA 估计。

- ① 用 Capon 算法进行一次搜索, 确定可能的到达角范围;
- ② 在可能的到达角范围内, 根据式 (14) 和 (15) 计算噪声子空间的投影矩阵;
- ③ 根据式 (16)、(17) 将接收信号进行降维处理;
- ④ 根据式 (18)、(19) 计算空间谱, 寻找峰值点, 得到 DOA 估计。

与算法一相比, 本文算法是由阵列流型导出噪声子空间, 而不是由数据的协方差矩阵导出的噪声子空间, 因此理论上本文算法与信号的相干性无关, 故对于相干源 DOA 估计问题, 本文算法无需进行解相干处理, 从而避免阵列孔径的损失。此外, 由于本文算法在满足布阵要求的情况下对不同阵列均可适用, 无需进行虚拟变换处理, 从而避免引入内插误差。

3.2 复杂度分析

设信源数为 K , 阵元数为 M , 快拍数为 N , 首先考虑基于虚拟阵列变换和空间平滑的 MUSIC 算法 (算法一) 的复杂度, 估计协方差矩阵的计算量为 M^2N , 设虚拟内插变换的范围为 $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r]$, 虚拟阵列变换的计算量为 $3M^3 + 2M^2r$; 设空间平滑子阵列的阵元数为 m , 则空间平滑的计算量为 $2(m^2M + M^2m)(M - m + 1)$; 最后采用 MUSIC 算法在 Θ 上进行一维搜索, 计算量为 $2m^2K + K^3$ 。因此算法一的总的计算量约为 $M^2N + 3M^3 + 2M^2r + 2(m^2M + M^2m)(M - m + 1) + (2m^2K + K^3)r$, 由于 $r \gg M, N \gg M$, 计算量近似为 $O(M^2N) + O(2m^2K + K^3)r$ 。

下面考虑本文算法 (算法二) 的复杂度, 信号样本矩阵奇异值分解的复杂度为 $O(MN^2)$, 投影矩阵的计算量为 $2MK^2 + M^2K + K^3$, 投影计算的计算量为 M^2K , 本文算法需进行 K 维搜索, 因此, 算法二的计算量约为 $O(MN^2) + O(2MK^2 + 2M^2K + K^3)r^K$ 。

通过上述分析可知, 在空间谱搜索部分, 算法一是进行一维搜索, 而算法二需进行 K 维搜索, 因此算法二的计算复杂度较高。

4 仿真实验及分析

本节通过仿真实验对现有算法 (算法一) 和本文算法 (算法二) 的性能进行分析和比较。

仿真实验的条件设置为: 五阵元的非均匀线阵 ($M = 5$), 阵元设置为 $0.25\lambda[0, 1, 3, 6, 8]$, 算法一的虚拟阵列设置为 $0.5\lambda[0, 1, 2, 3, 4]$, λ 为波长; 源信号为窄带高斯随机信号, 相干源的相关系数为 1; 实验中, 信噪比 SNR 定义为阵列接收信号的总功率与噪声总功率之比, 即:

$$\text{SNR} = 10 \times \lg \left(\frac{\|\mathbf{AS}\|_F^2}{\|\mathbf{V}\|_F^2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (20)$$

另外, DOA 估计精度由均方根误差 RMSE 来衡量, 不失一般性, 设独立实验次数为 n , 信源数为 K , 真实 DOA 为 $(\theta_1, \dots, \theta_K)$, 第 i 次实验的 DOA 估计为 $(\hat{\theta}_1(i), \dots, \hat{\theta}_K(i))$, RMSE 定义为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K (\hat{\theta}_j(i) - \theta_j)^2}{nK}} \quad (21)$$

4.1 实验一: 相干源的估计精度比较

参数设定: 信源数 $K = 2$, DOA 为 $(70^\circ, 80^\circ)$, 两信源相干; 快拍数 $N = 200$; 独立实验次数 $n = 500$;

算法一的空间平滑子阵列的阵元个数取 3。图 1 为两种算法的 RMSE 与 SNR 的关系; 图中蓝色曲线表示算法一的 RMSE 随 SNR 的变化关系; 红色曲线表示算法二的 RMSE 随 SNR 的变化关系。

从图 1 可以看出, 对于相干源, 算法二较算法一有更高的估计精度, 在 SNR 取值范围为 2~12 dB 左右时, 算法一基本失效, 而算法二仍可以有效估计 DOA; 在 SNR 较高时, 两种算法均可有效估计相干源 DOA, 但算法二的 RMSE 较低, 相差约 0.5°~0.9°。

4.2 实验二: 相干源的分辨率性能比较

参数设定: 信源数 $K=2$, DOA 为 $(70^\circ, 70^\circ + \psi)$, 两信源相干; 快拍数 $N=200$; SNR = 5 dB; 独立实验次数 $n=500$; 算法一的空间平滑子阵列的阵元个数取 3。图 2 为两种算法的 RMSE 与角度差 ψ 的关系: 图中蓝色曲线表示算法一的 RMSE 随角度差 ψ 的变化关系; 红色曲线表示算法二的 RMSE 与角度差 ψ 的变化关系。

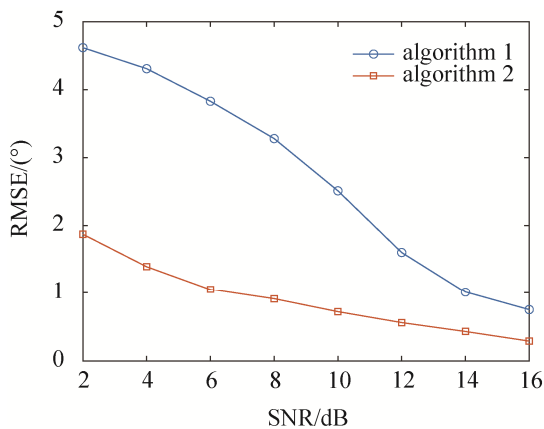


图 1 两种算法 RMSE 随 SNR 变化曲线
Fig. 1 RMSE of two kinds of algorithm with various SNR

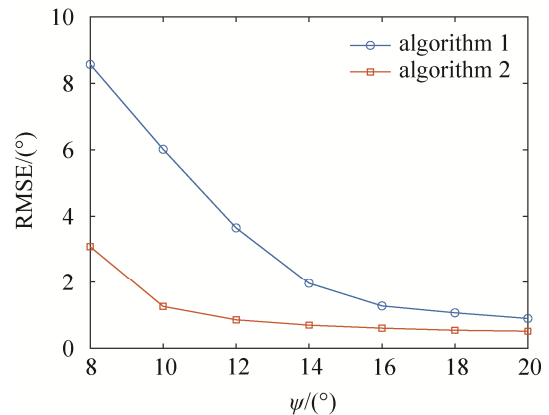


图 2 两种算法 RMSE 随 ψ 的变化曲线
Fig. 2 RMSE of two kinds of algorithm with various ψ

从图 2 可以看出, 对于相干源, 在不同的信噪比下, 算法二较算法一都有更高的分辨率。在实验条件下, 算法一在角度间隔大于 14°左右时可有效进行 DOA 估计 (RMSE < 2°), 算法二在角度间隔大于 9°左右时可有效进行 DOA 估计。

4.3 实验三: 相干、非相关混合信源时的性能比较

参数设定: 信源数 $K=3$, DOA 为 $(70^\circ, 80^\circ, 100^\circ)$, 其中前两个信源相干, 第三个信源与前两个信源不相关; 快拍数 $N=200$; 独立实验次数 $n=500$; 算法一的空间平滑子阵列的阵元个数取 4。图 3 为两种算法的 RMSE 与 SNR 的关系: 图中蓝色曲线表示算法一的 RMSE 随 SNR 的变化关系; 红色曲线表示算法二的 RMSE 随 SNR 的变化关系。

从图 3 可以看出, 对于相干、非相关混合源, 算法二较算法一有更高的估计精度, 在 SNR 取值范围为 5~12dB 左右时, 算法一基本失效, 而算法二仍可以有效估计 DOA; 在 SNR 较高时, 两种算法均可有效估计相干、非相关混合源 DOA, 但算法二的精度较高。

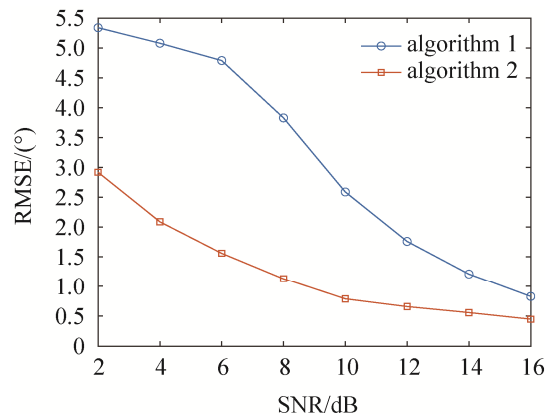


图 3 相干、非相关混合源情况下, 两种算法 RMSE 随 SNR 变化曲线
Fig. 3 RMSE of two kinds of algorithm with various SNR for coherent and non-correlation sources

5 结束语

本文提出的算法可以有效进行相干源 DOA 估计,在已知信源数的情况下,无需进行解相干预处理,且适用于任意阵列。而传统的相干 DOA 估计算法对于非均匀阵列,需要进行虚拟变换后再进行空间平滑,这样会引入变换误差,且空间平滑会损失阵列孔径。仿真结果表明,相较于基于虚拟内插变换的空间平滑 MUSIC 算法,本文算法具有更优的精度与分辨率,这与理论分析一致。但是,传统 DOA 估计算法的空间谱均为一维搜索,而本文算法的空间谱是 K 维搜索,因此本文算法的复杂度较高。后续工作将聚焦于如何降低本文算法的复杂度,可以考虑与其他算法如空域滤波^[16]或 STAP^[17]相结合。

参考文献

- [1] 张海鑫,周鹏,孙昭乾,等. 基于 DOA 聚类算法的 ARM 抗有源诱偏技术研究[J]. 遥测遥控, 2021, 42(4): 95–103.
ZHANG Haixin, ZHOU Peng, SUN Zhaoqian, et al. Research on ARM anti-active decoy technique based on DOA clustering algorithm[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(4): 95–103.
- [2] 李江渠,高立朝. 一种 GPS 抗干扰及干扰 DOA 估计工程集成方法[J]. 遥测遥控, 2020, 41(5): 23–28.
LI Jiangqu, GAO Lichao. An implementation method of anti-jam and jam DOA in GPS[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(5): 23–28.
- [3] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans. on Antenna and Propagation, 1986, 34(3): 276–280.
- [4] ROY R, PAULRAJ A, KAILATH T. ESPRIT-A subspace rotation estimation of parameter of cissoids in noise[J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1986, 34(10): 1340–1342.
- [5] 王永良,陈辉,彭应宁,等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] 张小飞,李剑锋,徐大专,等. 阵列信号处理及 MATLAB 实现(第 2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [7] SHAN T J, WAX M, KAILATH T. On spatial smoothing for direction of arrival estimation of coherent signals[J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1985, 33(4): 806–811.
- [8] PILLAI S U, KWON B H. Forward-backward spatial smoothing techniques for the coherent signal identification[J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, 37(1): 8–15.
- [9] ZHANG W, HAN Y, JIN M. Multiple-Toeplitz matrices reconstruction algorithm for DOA estimation of coherent signals[J]. IEEE Access, 2019, 7: 49504–49512.
- [10] ZHAO Z J, WANG Y, XU C Y. DOA estimation of coherent signals based on improved SVD algorithm[C]// International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Dec. 2012.
- [11] FRIEDLANDER B, WEISS A J. Performance analysis of spatial smoothing with interpolated arrays[J]. IEEE Tran. on Signal Processing, 1993, 4(5): 1881–1892.
- [12] FRIEDLANDER B, WEISS A J. Direction finding using spatial smoothing with interpolated arrays[J]. IEEE Tran. on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(2): 574–587.
- [13] 叶中付. 统计信号处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [14] CAPON J. High resolution frequency wave number spectrum analysis[J]. Proceedings of IEEE, 1969, 57(8): 1408–1418.
- [15] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [16] MOGHADDAMJOO A. Application of spatial filters to DOA estimation of coherent sources[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1991, 39(1): 221–224.
- [17] MELVIN W L. A STAP overview[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2004, 19(1): 19–35.

[作者简介]

宗佳虹 1999 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为通信信号处理与应用。

戴旭初 1963 年生, 博士, 教授, 主要研究方向为宽带无线通信和智能信号处理。

(本文编辑: 潘三英)