

基于多分辨率复合阵列的未知信源数 波达方向估计

李伯达, 刘爱华, 施君南, 侯凯强, 姜艳娜, 蒋洁
(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘要:为解决信源数未知情况下的多分辨率复合阵列波达方向(DOA)估计问题,将未知信源数的相干信号 DOA 估计算法拓展到多分辨率复合阵列中。本文研究了基于子阵空间谱联合的 DOA 估计方法,首先构造各个子阵列的托普利兹矩阵,并进行未知信源数的相干信号 DOA 估计;然后利用多分辨率复合阵互质的特性,构建联合代价函数进行解模糊。针对全范围搜索计算量大的不足,文中提出了单个不模糊区搜索,反推全部模糊角度的改进方案。仿真结果验证了所提方法的有效性,相比于全空间搜索的 MUSIC 算法和 Capon 算法,该算法无需信源数先验信息,且在信噪比大于 15 dB 和快拍数大于 300 时,其 DOA 估计的均方根误差仅为传统方法的 1/2。

关键词:多分辨复合阵列;信源数;波达方向;相干信号;托普利兹矩阵;解模糊

中图分类号: TN 911.72

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.05.015

Direction-of-Arrival Estimation for Multi-resolution Composite Arrays with Unknown Source Number

LI Boda, LIU Aihua, SHI Junnan, HOU Kaiqiang, JIANG Yanna, JIANG Jie
(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to solve the direction-of-arrival (DOA) estimation problem when the source number is unknown, the DOA estimation algorithm of coherent signals with unknown source number is extended to multi-resolution composite arrays. The DOA estimation method based on sub-array spatial spectrum combination is studied in this paper. First, the Toeplitz matrix of each sub-array is constructed, and the DOA estimation of the coherent signals with unknown source number is performed. Then, the coprime character of the multi-resolution composite matrix is used to construct a joint cost function and solve the angle ambiguities. In order to overcome the shortage of large-scale searching calculation, an improved algorithm of searching single unambiguous area and deriving all ambiguous angles is proposed. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method. Compared with the multiple signal characterization (MUSIC) algorithm and the Capon algorithm for full-space search, the improved algorithm does not need the prior information of the source number. When the signal-to-noise ratio (SNR) is greater than 15 dB and the number of snapshots is larger than 300, the root mean square error (RMSE) of the DOA estimation is only half of that obtained by the traditional method.

Key words: multi-resolution composite arrays (MRCA); source number; direction-of-arrival (DOA); coherent signal; Toeplitz matrix; solving ambiguity

0 引言

多分辨率复合阵列(Multi-Resolution Composite Arrays, MRCA)是由数个阵元间距不同的均匀

线性子阵列(Uniform Linear Sub-Arrays, ULSA)组成的非均匀线阵(Non-uniform Linear Arrays, NLA)^[1-5]。相比于阵元数相同的均匀线阵,多分辨

收稿日期:2019-06-18; 修回日期:2019-08-29

基金项目:上海市自然科学基金(19ZR1453700)

作者简介:李伯达(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为雷达信号处理。

通信作者:刘爱华(1990—),男,博士,工程师,主要研究方向为阵列信号处理、压缩感知。

率复合阵列具有更大的有效孔径、更高的测向精度和角度分辨率,因而在波束形成与波达方向(Direction-of-Arrival,DOA)估计领域受到关注^[3]。

互质阵列可以看成仅有 2 个子阵的多分辨率复合阵列^[6-8],即两个子阵的阵元间距均大于半波长。目前基于互质阵的 DOA 估计主要利用解模糊的方法进行空间谱估计^[9-10]。文献[10]提出了一种联合 MUSIC 估计算法,该方法利用互质特性去除子阵 DOA 估计存在的角度模糊。由于仅有两个子阵,该算法仅能估计一个不模糊目标信号。在多目标信号情况下,基于解模糊的 DOA 估计方法需要通过多分辨率复合阵列实现。

基于解模糊的思想,本文将密集阵的 DOA 估计算法拓展至多分辨率复合阵列中,如多重信号分类(Multiple Signal Characterization, MUSIC)算法。然而,这些算法都需要有信源数目作为算法的先验信息,信源数的准确性影响 DOA 估计性能。虽然现有文献给出了信源数目估计方法^[11-14],但是这些方法无法解决信号相干的问题。为了解决这一问题,文献[15]提出一种基于未知信源数的相干信号 DOA 估计方法,但该方法直接运用于多分辨率复合阵列中将导致计算量过大的问题。

本文基于解模糊的思想和文献[15]中的方法,提出了一种改进的基于子阵空间谱联合的 DOA 估计算法,该算法将文献[15]中的算法拓展至多分辨率复合阵列的 DOA 估计中。通过对各子阵构造一个无需信源数的代价函数,免去信源数先验性信息的需求。考虑到各子阵进行全范围搜索计算量较大,提出了从单个不模糊区搜索,反推全部模糊角度的改进方案,并利用联合代价函数匹配的方法,获得真实的角度估计。该方法有效克服了传统全空间搜索算法需信源数先验性信息的缺点,同时通过不模糊区搜索的方式减少计算量。

1 信号模型

考虑由 Q 个阵元数为 $2M+1$ 的均匀直线阵构成的多分辨率复合阵列,子阵的阵元 m 依次为 $-M, \dots, 0, \dots, M$,其拓扑结构如图 1 所示。记第 q 个子阵的阵元间距为 $d_q = Z_q \cdot (\lambda/2)$,其中, λ 为载频波长,正整数 $Z_q > 1$,且两两互质。

假设存在 $K(K < Q$ 且 $K \leq M+1)$ 个远场窄带信号,其中前 K_c 个信号为相干信号,第 k 个信号的波达

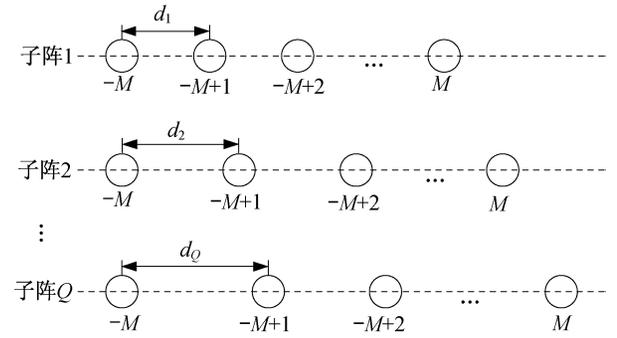


图 1 多分辨复合阵列模型

Fig. 1 Multi-resolution composite array model

方向记为 $\theta_k (\theta_k \in (-\pi/2, \pi/2), k=1, 2, \dots, K)$ 。对于相干信号,记第一个信号为 $s_1(t)$,则其余相干信号可表示为

$$s_k(t) = \beta_k s_1(t), k=2, \dots, K_c \quad (1)$$

式中: $\beta_k = \rho_k e^{-j\varphi_k}$; ρ_k 为幅度因子; φ_k 为相位变化。

第子阵 q 关于 θ_k 的导向矢量为

$$\mathbf{a}_q(\theta_k) = [e^{j2\pi M \sin(\theta_k) d_q / \lambda}, \dots, 1, \dots, e^{-j2\pi M \sin(\theta_k) d_q / \lambda}] \quad (2)$$

则第 q 个子阵接收到的信号可表示为

$$\mathbf{X}_q(t) = \sum_{k=1}^K \mathbf{a}_q(\theta_k) s_k(t) + \mathbf{N}_q(t) = \mathbf{A}_q \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}_q(t) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{N}_q(t)$ 为均值为 0 方差为 σ^2 的高斯白噪声矩阵; \mathbf{A}_q 为子阵 q 所有导向矢量构成矩阵; $\mathbf{S}(t)$ 为所有信号构成的信号矩阵。

2 基于子阵空间谱联合的 DOA 估计方法

基于子阵空间谱联合的 DOA 估计方法首先对各个子阵进行 DOA 估计得到所有的模糊角度,然后利用子阵互质的特性,联合子阵空间谱剔除虚假角度获得真实的 DOA 估计。

2.1 托普利兹变换

子阵 q 的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_q = E\{\mathbf{X}_q(t) \mathbf{X}_q^H(t)\} \quad (4)$$

基于信号相关的假设,协方差矩阵 \mathbf{R}_q 中的每一个元素可表示为

$$r_q(m, n) = \sum_{i=1}^K c_{m,i} e^{j2\pi n \sin(\theta_i) d_q / \lambda} + \sigma^2 \delta_{m,n}, \\ m, n = -M, \dots, 0, \dots, M \quad (5)$$

式中:

$$c_{m,i} = \begin{cases} P_{1,1} \beta_i^* \sum_{l=1}^{K_c} \beta_l e^{-j2\pi m \sin(\theta_l) d_q / \lambda}, & i = 1, 2, \dots, K_c \\ P_{i,i} e^{-j2\pi m \sin(\theta_i) d_q / \lambda}, & i = K_c + 1, \dots, K \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{k,i} = E \{ s_k(t) s_i(t)^H \}, k, i = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

$$\delta_{m,n} = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases} \quad (8)$$

选取协方差矩阵 R_q 的第 m 行, 构造如下形式的托普利兹矩阵:

$$R_{qm} = \begin{bmatrix} r_q(m, 0) & r_q(m, 1) & \cdots & r_q(m, M) \\ r_q(m, -1) & r_q(m, 0) & \cdots & r_q(m, M-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_q(m, -M) & r_q(m, -M+1) & \cdots & r_q(m, 0) \end{bmatrix} = \bar{A}_q S_{qm} \bar{A}_q^H + \sigma^2 D = \sum_{k=1}^K c_{m,i} \bar{a}_q(\theta_k) \bar{a}_q(\theta_k)^H + \sigma^2 D \quad (9)$$

式中: $\bar{A}_q = [\bar{a}_q(\theta_1), \dots, \bar{a}_q(\theta_K)]$ 为新的导向矢量矩阵; $S_{qm} = \text{diag}\{c_{m,1}, \dots, c_{m,K}\}$ 为伪信号协方差矩阵; D 为 $(M+1) \times (M+1)$ 的矩阵, 其中仅对角线的第 m 个元素为 1, 剩余元素全为 0; $\bar{a}_q(\theta_k) = [1, \dots, e^{-j2\pi M \sin(\theta_k) d_q / \lambda}]^T$ 为新的导向矢量。

2.2 未知信源数的 DOA 估计

当子阵 q 不存在模糊时, 即 $Z_q=1$, 对于子阵 q 构成的 $2M+1$ 个托普利兹矩阵, 仅有 $M+1$ 个矩阵包含不同的统计信息。由于 S_{qm} 为满秩矩阵, 因此, 可利用这 $M+1$ 个托普利兹矩阵进行 DOA 估计。在对于第 k 个信号, 总存在矢量 $\mathbf{b}_k \in C^{(M+1) \times 1}$, 使得 \mathbf{b}_k 与剩余 $K-1$ 个信号新导向矢量构成的空间相互垂直, 可得到

$$\bar{a}_q^H(\theta_i) \mathbf{b}_k = \begin{cases} \bar{a}_q^H(\theta_i) \mathbf{b}_k, & k = i \\ 0, & k \neq i \end{cases} \quad (10)$$

联立式(9)和式(10)可得

$$R_{qm} \mathbf{b}_k = \sum_{i=1}^K c_{m,i} \bar{a}_q(\theta_i) \bar{a}_q(\theta_i)^H \mathbf{b}_k + \sigma^2 D \mathbf{b}_k = g_{qm} \bar{a}_q(\theta_k) + \sigma^2 D \mathbf{b}_k \quad (11)$$

根据式(11)可以假设在不考虑噪声的条件下, 若真实的波达方向为 θ_k , 则存在一个尺度因子 g_{qm} 使得

$$R_{qm} \mathbf{b}_k = g_{qm} \bar{a}_q(\theta_k) \quad (12)$$

再考虑噪声影响, 从而有以下优化问题:

$$\min_{\theta} J_q(\theta, \mathbf{g}_q, \mathbf{b}_k) = \sum_{m=-M}^0 \|R_{qm} \mathbf{b}_k - g_{qm} \bar{a}_q(\theta_k)\|^2 \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{g}_q\| = 1 \quad (13)$$

式中: $\bar{a}_q(\theta_k)$ 为 θ 待优化的导向矢量; $\mathbf{g}_q =$

$[g_{q,(-M)}, g_{q,(-M+1)}, \dots, g_{q,0}]^T$ 。

由于 g_q 和 \mathbf{b}_k 未知, 无法通过直接搜索 DOA 优化式(13)。因此, 需要对式(13)进行简化, 基于文献[15]的结论, 最终可简化为

$$\min_{\theta} J_q(\theta_k) \quad (14)$$

式中:

$$J_q(\theta_k) = M+1 - \max \{ \text{eig} [G_q^H(\theta_k) F_q^+ G_q(\theta_k)] \},$$

$$F_q = \sum_{m=-M}^0 R_{qm}^H R_{qm}, F_q^+ \text{ 为 } F_q \text{ 的广义逆矩阵,}$$

$$G_q(\theta_k) =$$

$$[R_{q(-M)}^H \bar{a}_q(\theta_k), R_{q(-M+1)}^H \bar{a}_q(\theta_k), \dots, R_{q0}^H \bar{a}_q(\theta_k)],$$

$\max \{ \text{eig} [\cdot] \}$ 为最大特征值。从而可得空间谱为

$$P_q(\theta_k) = \frac{1}{M+1 - \max \{ \text{eig} [G_q^H(\theta_k) F_q^+ G_q(\theta_k)] \}} \quad (15)$$

通过谱峰搜索的方式即可获得各个子阵的 DOA 估计, 然而在多分辨率复合阵列中 $Z_q > 1$, 使之存在角度模糊问题。

2.3 子阵空间谱联合

当子阵的阵元间距大于半波长时, 即 $Z_q > 1$ 时, 通过子阵得到的波达方向估计值有角度模糊。如果真实角度为 θ , 模糊角度为 θ^a , 则两者之间存在如下关系:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta) d_q - \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta^a) d_q = 2k\pi,$$

$$q = 1, 2, \dots, Q \quad (16)$$

将 $d_q = Z_q \cdot (\lambda/2)$ 带入式(16)进一步化简得

$$\sin(\theta) - \sin(\theta^a) = \frac{2k}{Z_q}, q = 1, 2, \dots, Q \quad (17)$$

当搜索一维角度范围为 $(-\pi/2, \pi/2)$, $|\sin(\theta) - \sin(\theta_f^a)| < 2$, 从而推导出 $k \in [-(Z_q-1), \dots, (Z_q-1)]$ 。又由于正弦函数取值范围的约束, k 仅能取包含 0 在内的 Z_q 个连续值。假设除了 K 个真实 DOA 外, 还存在一个角度 θ_f^a , 同时为 Q 个子阵的估计值。显然 θ_f^a 满足式(16), 即 θ_f^a 与一个真实 DOA 相对应。又考虑到 $K < Q$, 则至少在两个子阵中 θ_f^a 对应于同一个真实 DOA, 不失一般性, 假设为第 1 和第 2 个子阵, 该真实 DOA 为 θ , 则 θ 与 θ_f^a 满足

$$\sin(\theta) - \sin(\theta_f^a) = \frac{2k_1}{Z_1}, k_1 \in [-(Z_q-1), \dots, -1, 1, \dots, (Z_q-1)] \quad (18)$$

$$\sin(\theta) - \sin(\theta_f^a) = \frac{2k_2}{Z_2}, k_2 \in [-(Z_q-1), \dots, -1, 1, \dots, (Z_q-1)] \quad (19)$$

联立式(18)和式(19)可得

$$\frac{k_1}{Z_1} = \frac{k_2}{Z_2} \quad (20)$$

在多分辨率复合阵列中 Z_q 两两互质, 因而不存在 k_1, k_2 使得等式(19), 即仅有 K 个真实 DOA 可同时为 Q 个子阵的估计值。如图 2 所示, 给出了 $K=2, Q=3$ 时各子阵的空间谱, 其中 3 种不同颜色的曲线分别表示 3 个子阵全空间搜索得到的空间谱, 虚线表示真实波达方向。可看出仅在真实角度的区间内才存在 3 个子阵空间谱谱峰的重叠, 且谱峰周期性出现, 重复次数为 Z_q 。

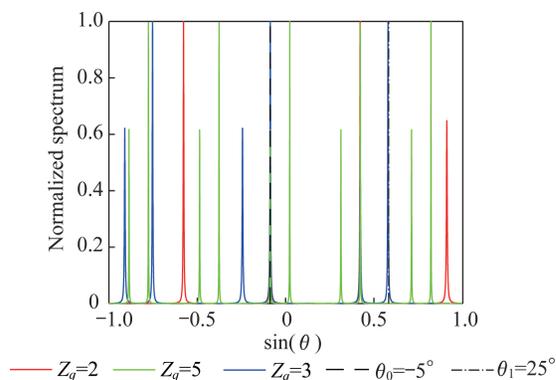


图 2 各子阵的空间谱

Fig. 2 Spectra of subarrays

而采用 MUSIC 算法对 3 个子阵全空间搜索时, 若信源数估计错误, 各子阵的空间谱无法对所有波

达方向进行准确估计。此处设置为 1, MUSIC 算法各子阵的空间谱如图 3 所示。从图 3 中可看出, 谱峰虽周期性出现, 但其重复次数不为 Z_q , 且真实角度的区间内 3 个子阵空间谱谱峰并未出现重叠, 因此, 无法准确估计波达方向。

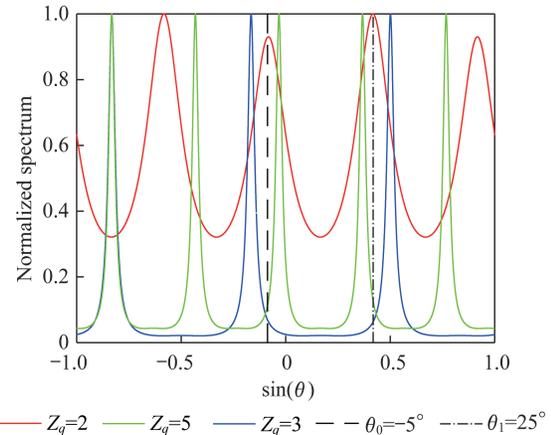


图 3 MUSIC 算法的各子阵空间谱

Fig. 3 Spectra of subarrays obtained by the MUSIC algorithm

对于子阵 q 在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 范围内进行未知信源数的 DOA 估计, 可得其全部模糊角度, 假设为 $N_q (N_q < Z_q \cdot K)$ 个。基于上述结论, 其中仅有 K 个 DOA 估计值带入其余子阵代价函数和式中取小值, 公式为

$$\bar{J}_q(\theta_{qn}) = \sum_{i \neq q} J_i(\theta_{qn}), n = 1, 2, \dots, N_q \quad (21)$$

式中: θ_{qn} 为子阵 q 的第 n 个 DOA 估计值。

然而在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 范围内, 对各子阵进行未知信源数的 DOA 估计计算量较大, 因此, 需要对其进行改进。

3 改进的快速 DOA 估计方法

考虑到角度模糊的存在, 将 $(-\pi/2, \pi/2)$ 范围划分为 Z_q 个不模糊区间, 分别为

$$\left(\arcsin((-Z_q + 2(i-1))/Z_q), \arcsin((-Z_q + 2i)/Z_q) \right], i = 1, 2, \dots, Z_q$$

在不模糊区间中进行 DOA 估计, 仅有与信源数一致的 K 个波达方向估计值。利用式(16)可推出剩余模糊角度, 减少角度搜索范围, 从而降低计算量。此外, 不模糊区域的角度范围相对于全范围有所缩减, 导致部分子阵中模糊角度间距更近。受

信噪比和阵元数影响,算法分辨率较低无法将其区分,使得该子阵不模糊区域内的谱峰数目小于信源数 K 。因而需要剔除谱峰数量较小子阵,避免影响后续匹配。改进后的未知信源数的 DOA 估计算法步骤大致如下:

步骤 1 利用 $\hat{R}_q = \left[\sum_{t=1}^L X_q(t) X_q^H(t) \right] / L$ 估计

子阵的协方差矩阵, L 为快拍数。

步骤 2 选择协方差矩阵 \hat{R}_q 的前 $M+1$ 行构造如式(9)的托普利兹矩阵。

步骤 3 选择不模糊区域,计算 F_q 、 $G_q(\theta)$,并利用式(15)求解该不模糊区域的空间谱 $P_q(\theta)$ 。

步骤 4 对 $P_q(\theta)$ 进行谱峰搜索,得到对应的模糊角度,利用式(17)可推出剩余模糊角度。

步骤 5 选择不模糊区域内谱峰数量最大且相等子阵的模糊角度,利用式(21)获得真实的 DOA。

步骤 6 对各子阵求得 DOA 进行排序和平均,得到最终的 DOA。

未知信源数 DOA 估计单个角度搜索的计算量为 $O[(2M+1)^2 N + (M+1)^4 + 5(M+1)^3]$,若假设快拍数为 L ,在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 范围内角度步长为 Step 所对应的搜索次数为 N_{step} ,则该算法的计算量接近 $O\left\{N_{\text{step}} \left(\sum_{q=1}^Q 1/Z_q \right) [(2M+1)^2 N + (M+1)^4 + 5(M+1)^3] \right\}$ 。由于 $N_{\text{step}} \left(\sum_{q=1}^Q 1/Z_q \right) \ll N_{\text{step}}$,因此,改进后算法计算量得到较大的降低。

4 仿真试验及结果分析

本节通过仿真试验验证本文所提算法的性能,同时与采用全空间搜索的多重信号分类算法(TSS-MUSIC)和采用全空间搜索的 Capon 算法(TSS-Capon)进行性能对比。在使用 TSS-MUSIC 算法及 TSS-Capon 算法时,假设信源数目已知。仿真实验采用多分辨率复合阵列结构,如图 1 所示,子阵数 Q 为 4,子阵阵元数 $2M+1$ 为 9,各子阵的阵元间距依次为 $2 \cdot (\lambda/2)$ 、 $3 \cdot (\lambda/2)$ 、 $5 \cdot (\lambda/2)$ 、 $7 \cdot (\lambda/2)$,即 $Z_1=2$ 、 $Z_2=3$ 、 $Z_3=5$ 、 $Z_4=7$ 。设置 3 个远场窄带信号,其中前 2 个为相干信号,DOA 依次为 $\theta_1=-5^\circ$ 、 $\theta_2=3^\circ$ 、 $\theta_3=25^\circ$ 。设置搜索步长为 0.05° 。

实验一 固定快拍数 L 为 300,基于 1 000 次独

立的蒙特卡洛仿真,给出了 DOA 估计值的均方根误差(RMSE)随信噪比(SNR)变化曲线,如图 4 所示。由图可知,在 SNR 较小时(<0 dB),本文所提出的算法的 RMSE 大于其他 2 种算法。但当 SNR 大于 6 dB 时,该算法的 RMSE 则明显低于其他 2 种算法。当 SNR 大于 15 dB 时,该算法的 RMSE 仅为 TSS-MUSIC 算法和 TSS-Capon 算法 1/2。

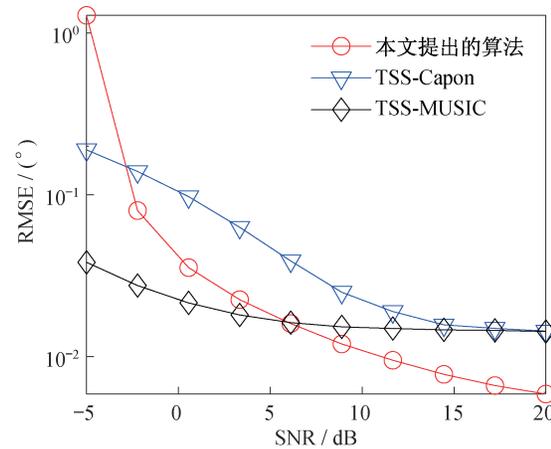


图 4 DOA 估计的均方根误差与 SNR 关系

Fig. 4 Relation between the RMSE estimated by the DOA and the SNR

实验二 固定快拍数 L 为 300,基于 1 000 次独立的蒙特卡洛仿真,以搜索步长的一半,即 0.025° 作为 DOA 估计的分辨成功率,给出了 DOA 估计的分辨成功率(Success Rate)随信噪比(SNR)变化曲线,如图 5 所示。由图 5 可以看出,本文提出的算法在 SNR 为 -5 dB 到 0 dB 时,分辨成功率均较低,当 SNR 大于 0 dB 时,则分辨成功率均快速提高。在分辨成功率为 98% 时,相比于 TSS-Capon 算法,本文提出的算法 SNR 改善了 5 dB 以上。虽然相对于 TSS-MUSIC 算法 SNR 无改善,但需要注意的是, TSS-MUSIC 算法是在信源数目估计正确的情况下达到 98% 的分辨成功率,而本文提出的算法无需信源数目先验信息。

实验三 固定 SNR 为 10 dB,快拍数 $L=[40, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 500, 900]$,基于 1 000 次独立的蒙特卡洛仿真,给出 DOA 估计值的均方根误差(RMSE)随快拍数变化,如图 6 所示。由图 6 可看出,快拍数 $L < 60$ 时,本文所提出算法的 RMSE 大于其他 2 种算法,但随着快拍数的增加该算法的 RMSE 逐渐降低,而 TSS-Capon 算法和 TSS-MU-

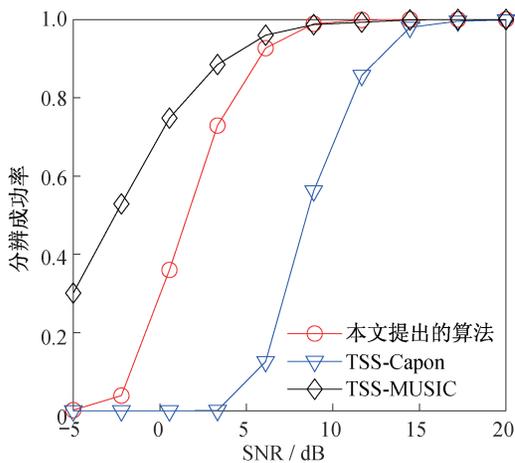


图 5 DOA 估计的分辨成功率与 SNR 关系

Fig. 5 Relation between the success rate estimated by the DOA and the SNR

SIC 算法则没有明显改善。当 $L > 150$ 时,本文提出算法的 RMSE 明显低于其他 2 种算法。

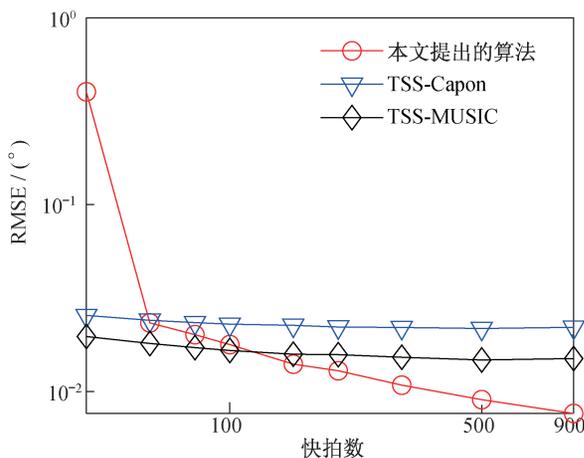


图 6 DOA 估计的均方根误差与快拍数关系

Fig. 6 Relation between the RMSE estimated by the DOA and the number of snapshots

实验四 固定 SNR 为 10 dB,快拍数 $L = [40, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 500, 900]$,基于 1 000 次独立的蒙特卡洛仿真,以搜索步长的一半,即 0.025° 作为 DOA 估计的分辨成功率,给出了 DOA 估计的分辨成功率随快拍数变化曲线,如图 7 所示。由图 7 可以看出,TSS-Capon 算法的 DOA 估计的分辨成功率均变化平缓,并逐渐趋于 72.4%,而本文提出的算法和 TSS-MUSIC 的 DOA 估计的分辨成功率均则随着快拍数的增加快速提高,当快拍数 L 为 300 时,2 种算法的分辨成功率达到 99.2%。

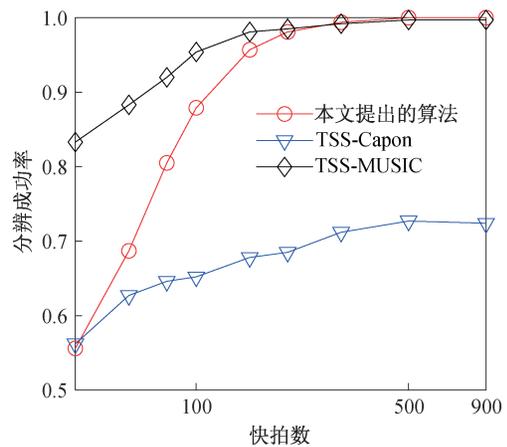


图 7 DOA 估计的分辨成功率与快拍数关系

Fig.7 Success rate of DOA estimation versus snapshots

从仿真结果可以看出,在高信噪比、多快拍数的条件下,本文所提出的算法 DOA 估计精度优于 TSS-MUSIC 算法和 TSS-Capon 算法。而在信噪比较低、快拍数较少的条件下,本文所提出的算法 DOA 估计略差于 TSS-MUSIC 算法和 TSS-Capon 算法。这是由于未知信源数相干信号 DOA 估计算法在信噪比较低、快拍数较少时分辨率较低,导致部分子阵列 DOA 估计中无法区分两相邻信号,在步骤 5 被剔除,信息未被使用,因而性能受到影响。

5 结束语

本文研究了基于多分辨率复合阵的未知信源数相干信号 DOA 估计问题。将未知信源数相干信号 DOA 估计方法扩展至多分辨率复合阵列中,针对多分辨率复合阵列的信号特点,通过各子阵的不模糊区间搜索,反推其余模糊角度的方式减少计算量,并利用匹配的方式实现未知信源数 DOA 估计。仿真结果表明,在高信噪比、多快拍数的条件下,本文所提出的算法 DOA 估计精度优于 TSS-MUSIC 算法和 TSS-Capon 算法。后续可尝试利用求根公式替代空间搜索,从而进一步减少计算量。

参考文献

- [1] TANG Y, LU Y. Multi-resolution composite array for digital beamforming with high angular-resolution [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(8): 4377-4380.
- [2] YUE T, TIAN M, BING J. Design and experiment of multi-resolution composite digital array antenna [J]. Journal of Radars, 2016, 5(3): 265-270.

- [3] LIU J, ZHANG Y, LU Y, et al. DOA estimation based on multi-resolution difference co-array perspective [J]. *Digital Signal Processing*, 2017, 62:187-196.
- [4] LIU A, ZHANG X, ZHANG J, et al. Enhanced root-MUSIC for coherent signals with multi-resolution composite arrays [C]// 2019 IEEE Radar Conference (RadarConf19). Washington D. C., USA: IEEE Press, 2019: 1-10.
- [5] 江冰. 多分辨率复合数字阵列天线的设计与实验[J]. *雷达学报*, 2016, 5(3):265-270.
- [6] VAIDYANATHAN P P, PAL P. Sparse sensing with co-prime samplers and arrays [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(2): 573-586.
- [7] QIN S, ZHANG Y D, AMIN M G. Generalized coprime array configurations for direction-of-arrival estimation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(6): 1377-1390.
- [8] 苏瑶. 基于压缩感知的互质阵列 DOA 估计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [9] 张小飞, 林新平, 郑旺, 等. 互质阵中空间谱估计研究进展[J]. *南京航空航天大学学报*, 2017, 49(5):635-644.
- [10] ZHOU C, SHI Z, GU Y, et al. DECOM: DOA estimation with combined MUSIC for coprime array [C]// *International Conference on Wireless Communications & Signal Processing*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 1-8.
- [11] HUANG L, WU S, LI X. Reduced-rank MDL method for source enumeration in high-resolution array processing [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(12): 5658-5667.
- [12] 谢纪岭, 司锡才. 基于协方差矩阵对角加载的信源数估计方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(1):46-49.
- [13] QIAN C, HUANG L, ZENG W J, et al. Direction-of-arrival estimation for coherent signals without knowledge of source number [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(9): 3267-3273.
- [14] 李春辉. 阵列信号处理中的信源数估计算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [15] HAN F M, ZHANG X D. An ESPRIT-like algorithm for coherent DOA estimation [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2005, 4(1): 443-446.

(上接第 97 页)

- [5] KIM H C, SON S, KIM Y H, et al. Remote sensing and water quality indicators in the Korean West coast: spatio-temporal structures of MODIS-derived chlorophyll-a and total suspended solids [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 121(1/2): 425-434.
- [6] 潘应阳, 国巧真, 孙金华. 水体叶绿素 a 浓度遥感反演方法研究进展[J]. *测绘科学*, 2017, 42(1):43-48.
- [7] 王雪蕾, 王新新, 朱利, 等. 巢湖流域氮磷面源污染与水华空间分布遥感解析[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(5): 1511-1519.
- [8] MATTHEWS M W. Eutrophication and cyanobacterial blooms in South African inland waters: 10 years of MERIS observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 155: 161-177.
- [9] HOU X J, FENG L, DUAN H T, et al. Fifteen-year monitoring of the turbidity dynamics in large lakes and reservoirs in the middle and lower basin of the Yangtze River, China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 107-121.
- [10] 臧友华. 基于多光谱遥感的渭河水质监测[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [11] 巩彩兰, 尹球, 匡定波. 黄浦江水质指标与反射光谱特征的关系分析[J]. *遥感学报*, 2006(6):910-916.
- [12] 孔令健, 王振龙, 王兵. 阜阳市主要河流水质评价及污染源解析[J]. *人民长江*, 2019(7):1-8.
- [13] SINGH K V, SETIA R, SAHOO S, et al. Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level [J]. *Geocarto International*, 2015, 30 (6) : 650-661.
- [14] 武文波, 刘正纲. 一种基于地物波谱特征的最佳波段组合选取方法[J]. *测绘工程*, 2007(6):22-24.
- [15] KAISER H F. An index of factorial simplicity [J]. *Psychometrika*, 1974, 39(1): 31-36.
- [16] GHOLIZADEH M H, MELESSE A M, REDDI L. Water quality assessment and apportionment of pollution sources using APCS-MLR and PMF receptor modeling techniques in three major rivers of South Florida [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566: 1552-1567.
- [17] SOLA I, GARCIA-MARTIN A, SANDONIS-POZO L, et al. Assessment of atmospheric correction methods for Sentinel-2 images in Mediterranean landscapes [J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2018, 73:63-76.