

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209169

冲击噪声背景下相干信号 DOA 估计*

单泽彪^{1,2,3} 王宇祥¹ 常立民¹ 刘小松¹(1. 长春理工大学电子信息工程学院 长春 130022; 2. 吉林大学通信工程学院 长春 130022;
3. 长春气象仪器研究所 长春 130102)

摘要: 针对冲击噪声背景下相干信号源的波达方向估计问题,提出了一种基于分数低阶矩的修正 MUSIC 算法。首先根据阵列接收数据,计算出分数低阶矩矩阵,从而抑制冲击噪声对阵列接收数据的影响;然后采用修正 MUSIC 算法基本原理,通过对矩阵的共轭重排,解决因相干信号的存在而导致的阵列协方差矩阵秩的亏损问题,并提高了算法的估计性能。通过对所提方法进行仿真实验验证以及相关理论性分析得知:所提算法能够有效抑制冲击噪声的影响,同时对相干信号进行解相干处理,并且与分数低阶奇异值分解算法及数据预处理后进行重构的自适应方法相比具有更高的估计精度和估计成功概率。

关键词: 波达方向估计;相干信号;冲击噪声;多传感器信号处理

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

DOA estimation of coherent signals in impulsive noise

Shan Zebiao^{1,2,3} Wang Yuxiang¹ Chang Limin¹ Liu Xiaosong¹(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;
3. Changchun Meteorological Instrument Research Institute, Changchun 130102, China)

Abstract: A modified MUSIC algorithm based on fractional low order moments is proposed to estimate the direction of arrival of coherent signal sources in the background of impulse noise. Firstly, the fractional low-order moment matrix is calculated according to the received data of the array, so as to suppress the impact of the impact noise on the received data of the array. Then, the basic principle of modified MUSIC algorithm is adopted to solve the rank loss of array covariance matrix caused by the existence of coherent signals by conjugate rearrangement of matrices, and the estimation performance of the algorithm is improved. The effectiveness of the proposed method is verified by computer simulation experiments. Experimental results show that: The proposed algorithm can effectively suppress the impact of the impact noise and de-coherently process the coherent signal, and has higher estimation accuracy and probability of success than the fractional low-order singular value decomposition algorithm and the adaptive reconstruction method after data preprocessing.

Keywords: DOA estimation; coherent signal; impulsive noise; multisensor signal processing

0 引 言

波达方向(direction of arrival, DOA)估计一直都是阵列信号处理中的一个重要研究方向,其被广泛应用在通信、雷达、航空航天和无线电通信等领域^[1-4]。传统的空间谱估计算法,如多重信号分类(multiple signal classification, MUSIC)算法^[5-6]、波束形成(conventional beam former,

CBF)算法^[7]、旋转不变子空间(estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, ESPRIT)算法、最大似然(maximum likelihood, ML)算法^[8]等等,在面对独立信号源时,可以进行有效的波达方向估计,但是在相干源或者强相关信号源下,这些算法便不能进行有效的波达方向估计。因此,如何解除相干源或强相关信号成为当前波达方向估计领域的一个研究热点。

收稿日期:2022-03-04

* 基金项目:国家自然科学基金(61571462)、吉林省教育厅科学技术项目(JJKH20190590KJ, JJKH20190591KJ)、长春理工大学青年科学基金(XQNJJ-2017-12)项目资助

常见的去相干处理方法主要分为两大类^[9],一类是降维类处理算法,另一类是非降维类处理算法。降维类处理算法主要包括空间平滑类算法^[10](spatial smoothing techniques, SST)和矩阵重构类算法,其中空间平滑类(spatial smoothing techniques, SST)算法最早是由 Shan 和 Wax 于 1985 年提出^[11],后来又衍生出后向平滑算法以及前后向平滑算法。非降维类处理算法主要包括 Toeplitz 矩阵重构法^[12]和子空间拟合算法,其中 Toeplitz 矩阵重构法和空间平滑类算法相比没有阵列孔径的损失,不需要进行降维处理。它的核心思想是在保护入射信号源信息的条件下,通过阵列接收到的数据,恢复原始协方差矩阵具有的特性,以此来达到解相干的效果,但是通过对于数据进行一系列处理后,它并没有显示出信号原有的信息,因此该算法在应用范围上会有一些局限性。

另外在实际的环境当中,所遇到的环境噪声往往不都是高斯噪声,比如海杂波、大气雷电噪声、无线信道噪声等^[13],这些信号的脉冲特性相比于高斯信号的脉冲特性较为明显,用传统的基于二阶及二阶以上统计量的方法进行处理^[14],通常得不到令人满意的效果,甚至出现错误的结果。研究发现,Alpha 稳定(S α S)分布可以很好地描述上述所提到的具有脉冲冲击特性的非高斯噪声。并且由于 S α S 分布噪声即冲击噪声不存在二阶或者二阶以上的矩^[15],故传统的基于二阶统计量或者高阶统计量的方法便不再适用。因此对于冲击噪声背景下相干信号的波达方向估计有基于分数低阶矩的奇异值分解算法、基于空间平滑技术的分数低阶矩算法和共变系数矩阵算法等^[15],上述算法估计精度较高,但均存在阵列孔径损失的问题。刁鸣等^[16]提出了一种数据预处理后进行重构的自适应算法,该算法可以对相干信号和独立信号进行同时估计,且具有不错的估计精度,但在低信噪比和小快拍情况下,估计性能较差。姚林宏等^[17]提出了基于虚拟空间平滑共变系数矩阵的 DOA 估计算法,该算法通过对原本的共变系数矩阵进行重构,得到一个新的矩阵,使得新构建矩阵的处于满秩状态。因此,阵列孔径得到有效的利用,但该算法只适用于具有实值性质的信号。

针对该问题,本文提出了一种冲击噪声背景下针对相干信号 DOA 估计的基于分数低阶矩的修正 MUSIC (fractional lower order moment modify multiple signal classification, FLOM-MMUSIC)算法。该算法首先通过接收到的数据定义出分数低阶矩矩阵,用分数低阶矩矩阵来抑制冲击噪声;然后采用修正 MUSIC 算法对数据进行处理,即对有限次快拍的数据进行共轭重排;最后根据多重分类算法的基本原理对相关目标信息进行估计即可。通过将所提算法与数据预处理后进行重构的自适应方法以及基于分数低阶矩的奇异值分解算法进行相关仿真实验,验证了所提算法的优越性。

1 阵列信号及噪声模型

1.1 阵列结构和信号模型

采用均匀线阵列, M 个阵元等间距排列,阵元间的距离为半波长。同时有 N 个相干的远场窄带信号以平面波的形式入射到阵列上,其中波长为 λ , 信号个数 $N < M$, 入射角度分别为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ 。则在 t 时刻阵列接收数据的矢量 $\mathbf{X}(t)$ 如式(1)所示。

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}(t)$ 是阵列的 $M \times 1$ 维输出数据矢量; \mathbf{A} 是导向矢量所构成的 $M \times N$ 维导向矢量阵; $\mathbf{S}(t)$ 为 $N \times 1$ 维信号矢量; $\mathbf{n}(t)$ 为 $M \times 1$ 维噪声矢量。

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_N)] \quad (3)$$

$$a(\theta_i) = [1, e^{-jL}, \dots, e^{-j(M-1)L}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T \quad (5)$$

式中: $L = 2\pi d \sin(\theta_i) / \lambda$ 表示信号到达相邻阵元的相位差, $a(\theta_i)$ 为阵列对第 i 个信号的导向矢量。

1.2 相干信号数学模型

在现实环境中,由于反射和折射的存在,或者人为干扰,经常会碰到信源为相干源的情况。因此,对于任意两个平稳信号 $s_i(t)$ 和 $s_j(t)$, 它们之间的的相关系数表达式如式(6)所示。

$$\rho_{ij} = \frac{E[s_i(t)s_j^*(t)]}{\sqrt{E[|s_i(t)|^2]E[|s_j(t)|^2]}} \quad (6)$$

由相关理论可知 $|\rho_{ij}| \leq 1$, 因此,任意两个信号间的相关性如式(7)所示。

$$\begin{cases} \text{当 } \rho_{ij} = 0 \text{ 时,} \\ \text{当 } 0 < |\rho_{ij}| < 1 \text{ 时,} \\ \text{当 } |\rho_{ij}| = 1 \text{ 时,} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知,当任意两个信号源之间存在相关或相干关系时,它们满足式(8)。

$$s_i(t) = b_i s_j(t) \quad (8)$$

其中, b_i 为一个复常数, $s_j(t)$ 可称为生成信源。同时,假设有 n 个相关或相干信号入射到均匀线阵上,得到的相关或相干信号源的模型如式(9)所示。

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) = \mathbf{A} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_n(t) \end{bmatrix} + \mathbf{N}(t) = \mathbf{A} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} s_0(t) + \mathbf{N}(t) = \mathbf{A}\mathbf{B}s_0(t) + \mathbf{N}(t) \quad (9)$$

式中: \mathbf{B} 为一组复常数组成的 $n \times 1$ 维矢量。

1.3 Alpha 稳定分布噪声模型

S α S 分布是唯一一种满足广义中心极限定理的分布,

它不仅描述了出现环境下脉冲噪声产生的机理,还可以精确刻画脉冲噪声的拖尾分布。由于一般情况下 $S_{\alpha}S$ 分布没有明确的概率密度函数表达式,因此通常用特征函数来代替概率密度函数。 $S_{\alpha}S$ 分布随机变量 X 的特征函数如式(10)所示。

$$\phi(t) = \exp\{j\delta t - \gamma |t|^{\alpha} [1 + j\beta \operatorname{sgn}(t)\omega(t, \alpha)]\} \quad (10)$$

式中:

$$\omega(t, \alpha) = \begin{cases} \tan(\pi\alpha/2), & \alpha \neq 1 \\ (2/\pi)\log |t|, & \alpha = 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\operatorname{sgn}(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t = 0 \\ -1, & t < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: α 为特征函数的特征指数 ($0 < \alpha < 2$), 常常用来表示噪声的异常程度。 β 是特征函数的对称参数 ($-1 \leq \beta \leq 1$), 一般用来描述概率密度的倾斜程度, 当 $\beta > 0$ 时为向右倾斜分布, $\beta = 0$ 时为对称分布, $\beta < 0$ 时为向左倾斜分布。 γ 是特征函数的尺度参数 ($\gamma \geq 0$), 它和高斯噪声模型中的方差类似。 δ 是特征函数的位移参数。当 $S_{\alpha}S$ 分布称之为标准 $S_{\alpha}S$ 分布时, $\delta = 0, \gamma = 1$ 。

2 分数低阶修正 MUSIC 算法

由于 Alpha 稳定分布只在 $1 < \alpha < 2$ 时有意义, 因此, 用传统的基于二阶统计量或者高阶统计量来估计 DOA 的方法在冲击噪声背景下便不再适用。

2.1 分数低阶矩

当噪声服从 $S_{\alpha}S$ 分布时, 由于 $S_{\alpha}S$ 分布不存在二阶及二阶以上统计量, 因此, 此时阵列接收数据的统计特性不能被正确表示出来。针对这个问题, 根据阵列接收数据 $x(t)$, 分数低阶矩矩阵可以定义为 C , 则其第 i 行第 k 列的元素如式(13)所示。

$$C_{ik} = E\{x_i(t) |x_k(t)|^{p-2} x_k^*(t)\}, 1 < p < \alpha \leq 2 \quad (13)$$

式中: $x_i(t)$ 和 $x_k(t)$ 是阵列的输出, C_{ik} 又可表示为

$$C_{ik} = \sum_{m=1}^N A_{im} A_{km} A_{km}^* + \gamma \delta_{ik} \quad (14)$$

式中:

$$A_{mk} = \delta_{mk} E\left\{s_m(t) \cdot \left|\sum_{q=1}^N s_q(t) + n_m(t)\right|^{p-2} \cdot \left(\sum_{q=1}^N s_q(t) + n_m(t)\right)\right\} \quad (15)$$

$$\gamma = E\left\{n_m(t) \cdot \left|\sum_{q=1}^N s_q(t) + n_m(t)\right|^{p-2} \cdot \left(\sum_{q=1}^N s_q(t) + n_m(t)\right)^*\right\} \quad (16)$$

式(14)的矩阵形式如式(17)所示。

$$C = A \Lambda A^H + \gamma I \quad (17)$$

2.2 修正 MUSIC 算法

用分数低阶矩矩阵 C 来取代接收信号的协方差矩阵 R_{xx} , 即 $C = R_{xx}$, 令

$$Y(t) = JX^*(t) \quad (18)$$

式中: $X^*(t)$ 是 $X(t)$ 的复共轭 ($X(t)$ 是阵列接收数据的矢量), J 是 $M \times M$ 阶置换矩阵, 其矩阵形式可表示为如式(19)所示。

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

且由计算可得 $J^* J = I$, 则 $Y(t)$ 的协方差矩阵如式(20)所示。

$$R_{yy} = E[Y(t)Y^H(t)] = JA^* R_{xx}^* (A^*)^H J + \sigma^2 I = JR_{xx}^* J = JC^* J \quad (20)$$

令 $R = R_{xx} + R_{yy} = C + JC^* J$, 对 R 进行奇异值分解, 如式(21)所示。

$$[U, S, V] = \operatorname{svd}[R] \quad (21)$$

令 $S_1 = S, V_1 = U(:, N+1:M)$ 为噪声特征值对应的特征向量, 即噪声子空间, 同时取信号的协方差矩阵 S 主对角线上的第 $M-N+1$ 个元素到第 M 个元素为 0, 即如式(22)所示。

$$\begin{aligned} S(M-N+1, M-N+1) &= 0, \dots \\ S(M-1, M-1) &= 0, S(M, M) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

然后采用相关方法, 用一个秩亏矩阵 R_1 取代满秩矩阵 R , 得到新的协方差矩阵如式(23)所示。

$$R_1 = US_1V^* \quad (23)$$

将新得到的协方差矩阵 R_1 进行 SVD 分解, 分解后如式(24)所示。

$$[U_n, S_n, V_n] = \operatorname{svd}(R_1) \quad (24)$$

得到新矩阵噪声特征值对应的特征向量, 即噪声子空间, 如式(25)所示。

$$V_2 = U_n(:, N+1:M) \quad (25)$$

将两次 SVD 分解得到的噪声子空间相加求和取平均后, 得到新的噪声子空间如式(26)所示。

$$V_3 = 1/2(V_1 + V_2) \quad (26)$$

构造空间谱函数如式(27)所示。

$$P_{\text{FLOM-MMUSIC}} = \frac{1}{a^H(\theta)V_3V_3^H a(\theta)} \quad (27)$$

最后通过对式(27)进行谱峰搜索, 即可得到待测信号的相关信息。

2.3 算法步骤

1) 根据阵列接收数据 $x(t)$, 由式(13)算出分数低阶矩 (FLOM) 矩阵的估计值 C 。

2) 用矩阵 C 代替接收信号的协方差矩阵 R_{xx} , 并令 $Y(t) = JX^*(t)$ 。

3) 计算出 $Y(t)$ 的协方差矩阵 R_{yy} , 令 $R = R_{xx} + R_{yy}$, 并对构造出的矩阵 R 进行 SVD 分解, 即 $[U, S, V] = svd[R]$, 得到 U, S, V 3 个向量。

4) 接着用一个秩亏矩阵 R_1 取代满秩矩阵 R , 得到新的协方差矩阵 $R_1 = US_1V^*$, 并对 R_1 进行奇异值分解 $[U_n, S_s, V_n] = svd(R_1)$ 。

5) 将两次奇异值分解得到的噪声子空间进行平均, 即 $V_3 = 1/2(V_1 + V_2)$ 。

6) 构造空间谱函数如式(27)所示, 最后通过谱峰搜索来获得 DOA 的估计值。

3 仿真验证与分析

设定实验在冲击噪声背景下, 选取远场窄带信号作为信号源。由于特征指数和分散系数 γ 决定了 Alpha 稳定分布的特性, 且当 $\alpha \in (0, 2]$ 时, 它的方差是无穷的, 因此用广义信噪比来代替一般信噪比。广义信噪比可表示为如式(28)所示。

$$G\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{1}{\gamma L} \sum_{n=1}^L |s(n)|^2 \right) \quad (28)$$

式中: L 为样本快拍数, $|s(t)|^2$ 为信号功率, 当 $\alpha = 2$ 时, 广义信噪比等同于一般信噪比。设估计的信号角度与真实角度的绝对值之差小于等于 2° 时, 判定为估计成功。到达方向角的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 可表示为如式(29)所示。

$$\theta_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{\theta}_i - \theta_i)^2} \quad (29)$$

式中: N 为 Monte Carlo 独立实验的总次数, θ_i 为在第 i 次实验时 DOA 的实际值, $\hat{\theta}_i$ 为在第 i 次实验中对 θ_i 的估计值。

实验 1 有效性验证实验。在冲击噪声背景下, 采用 16 阵元的均匀线阵, 入射信号源由以下两部分组成, 其中两个为相干信号源, 入射角度为 0° 和 30° , 另一个为非相干信号源, 入射角度为 60° , 阵元间的间距为半波长, 分数低阶矩参数 p 为 1.2, 快拍数为 500, 广义信噪比为 5 dB, 噪声为 $\alpha = 1.6, \beta = 0, \gamma = 1, \mu = 0$ 的标准 Alpha 稳定分布噪声。图 1 给出了所提算法的 DOA 估计空间谱。

由图 1 可以看出, 在 Alpha 噪声下, 所提出的 FLOM-MMUSIC 算法可以很好地对相干信号进行估计, 且得到的谱峰比较尖锐, 伪峰与主峰相比相差较大, 通过对其谱峰搜索可以较好的得到 DOA 估计值。

实验 2 不同算法估计性能对比实验。冲击噪声背景下, 在信噪比 -10、0 和 10 dB 处分别进行 100 次蒙特卡洛实验。其他参数与实验 1 的相同。表 1 给出了本文算法与基于分数低阶矩的奇异值分解算法以及文献[16]提出的数据预处理后进行重构的自适应算法 DOA 估计的均方根误差及成功率。

由表 1 可以看出, 在不同信噪比条件下, 本文算法的

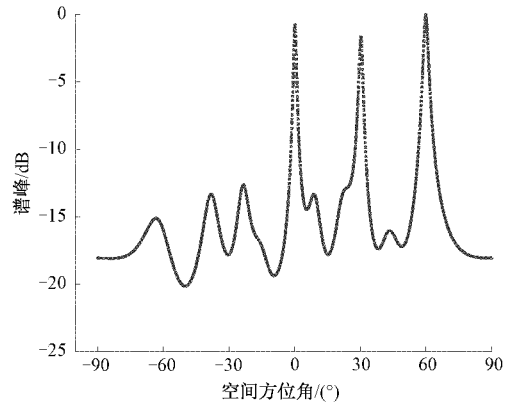


图 1 DOA 估计空间谱

表 1 不同算法 DOA 估计均方根误差及成功率

算法名称	信噪比/ dB	均方根误差/ (°)	成功率/ %
奇异值分解算法	-10	1.970 6	1.08
	0	1.183 4	14.30
	10	0.632 5	93.13
自适应算法	-10	1.543 2	50.13
	0	0.601 1	87.21
	10	0.430 3	93.97
本文算法	-10	1.117 1	56.73
	0	0.365 1	95.24
	10	0.303 5	97.76

DOA 估计均方根误差均要小于奇异值分解算法和自适应算法的均方根误差, 估计成功概率均要高于另外两种算法, 尤其是在较低信噪比时优势更加明显, 这表明本文方法在较低信噪比时, 具有更好的噪声抑制能力和更高的估计精度。

实验 3 不同快拍数下所提算法的性能比较。在冲击噪声背景下, 设定广义信噪比为 5 dB, 快拍数从 100 变化到 1 000, 分别进行 100 次 Monte Carlo 独立实验。其他参数同实验 1。图 2 和 3 分别给出了本文算法与基于分数低阶矩的奇异值分解算法以及文献[16]提出的自适应算法在不同快拍数下 DOA 估计的均方根误差及成功概率。

由图 2、3 可以看出, 在快拍数变化的范围内, 本文所提算法的估计成功率以及均方根误差均要优于奇异值分解算法和自适应算法, 尤其是在小快拍数下, 所提算法的估计均方根误差以及估计成功率均优于上述两种算法, 其中在快拍数等于 100 时, 所提算法的均方根误差低于 0.5° 、成功率高于 85%, 表明本文算法在小快拍数条件下有较好的估计精度。随着快拍数的增大, 上述算法的均方根误差随快拍数的增多均有不同程度的减小、成功率均有不同程度的提高, 且所提的估计性能仍优于另外 2 种算法。

实验 4 不同冲击噪声特征指数 α 情况下的算法性能比

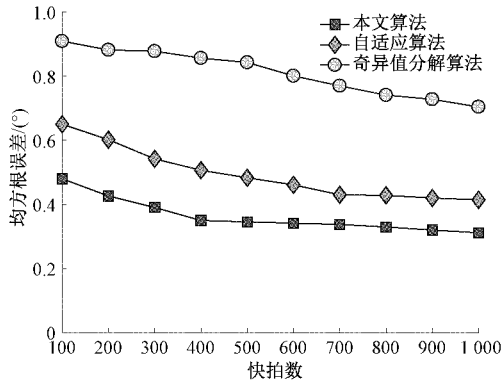


图 2 不同快拍数时的均方根误差

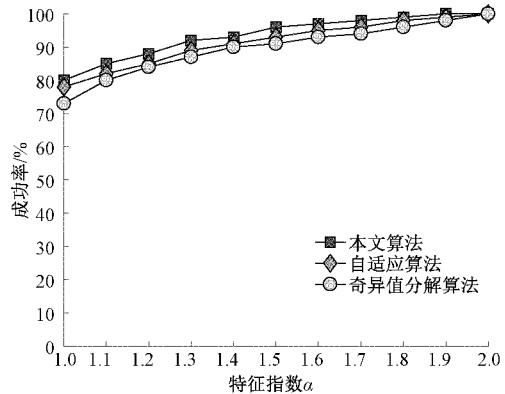


图 5 不同特征指数 α 条件下的成功率

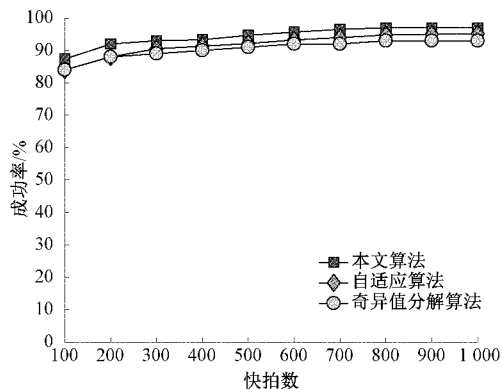


图 3 不同快拍数时的成功率

较。在 Alpha 噪声背景下,设定广义信噪比为 5 dB,特征指数 α 从 1.0 变化到 2.0,独立进行 100 次 Monte Carlo 实验。其他参数与实验 1 相同。图 4 和 5 分别给出了各种算法在不同特征指数 α 下 DOA 估计的均方根误差及成功率。

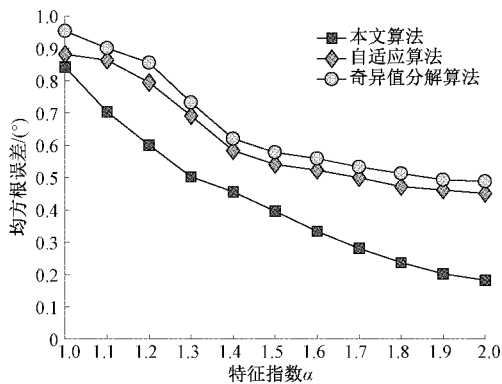


图 4 不同特征指数 α 条件下的均方根误差

由图 4、5 可以看出,在不同冲击噪声特征指数 α 条件下,与另外 2 种算法相比,本文所提算法具有更优的估计性能,表明所提算法对 Alpha 稳定分布噪声的冲击特性具有更强的抑制能力。同时,各种算法的均方根误差随特征指数 α 的增大都有不同程度的减小,成功率都有不同程度的

提高。当特征指数 $\alpha = 2$ 时,附加噪声已无冲击特性,已成为高斯噪声,而所提算法仍具有比另外 2 种算法更低的均方根误差及更高的成功率,表明所提算法并不影响高斯噪声条件时的 DOA 估计,说明所提算法具有良好的韧性以及较高的估计性能。

4 结 论

针对冲击噪声环境下相干信号源 DOA 估计问题,以分数低阶协方差为基础,结合修正 MUSIC 算法,提出了一种基于分数低阶矩的修正 MUSIC 算法。通过接收数据求得分数低阶矩矩阵,抑制冲击噪声对数据处理的影响,然后对分数低阶矩矩阵进行共轭重排构造相关矩阵,解决阵列协方差矩阵秩的亏损问题。文中首先对阵列信号模型及相干信号模型进行了介绍,并对 Alpha 稳定分布冲击噪声进行了详细分析,同时给出了抑制冲击噪声的分数低阶矩方法及用于处理相干信号的修正 MUSIC 算法。最后从信噪比、快拍数以及特征指数三个方面对所提算法进行了性能仿真实验及对比仿真验证,仿真结果验证了所提算法的有效性以及与基于分数低阶矩的奇异值分解算法和数据预处理后进行重构的自适应算法相比较的优越性。

参考文献

- [1] YAO B B, DONG Z, ZHANG W L, et al. Degree-of-freedom strengthened cascade array for DOD-DOA estimation in MIMO array systems [J]. Sensors, 2018, 18(5): 1-20.
- [2] 王薇,殷勤业,姚博彬,等. 结合快速傅里叶变换和线性调频变换的快速波达方向估计[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(12): 131-138,160.
- [3] SHU F, QIN Y L, LIU T T, et al. Low-complexity and high-resolution DOA estimation for hybrid analog and digital massive MIMO receive array [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 66(6): 2487-2501.
- [4] 陈金立,李巧雅,李家强,等. 基于协方差匹配 SI.0 算

- 法的 MIMO 雷达 DOA 估计[J]. 雷达科学与技术, 2019, 17(1):19-24.
- [5] 陈鹏, 陈志敏, 方兰婷, 等. 存在阵列误差时稀疏相关信号的 DOA 估计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 30(12):41-44.
- [6] 李蜀丰, 徐永绍, 刘秉政, 等. 基于改进 MUSIC 的声源定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 248(8): 212-219.
- [7] 梁涛, 杨波, 朱敏, 等. 基于波束形成的均匀方阵虚拟基元定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 266-274.
- [8] TANG Y T, XU S, WANG X, YU J Q. Direction of arrival estimation with antenna arrays based on fuzzy cerebellar model articulation controller neural network[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2020, 30(9):162-167.
- [9] PARK H R, LI J. Efficient sparse parameter estimation based methods for two-dimensional DOA estimation of coherent signals [J]. IET Signal Processing, 2020, 14(9):5-10.
- [10] 韦娟, 严世安, 宁方立. 基于互质阵虚拟阵列空间平滑的相干信号 DOA 估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(4):1069-1077.
- [11] 胡盈绮, 邓科, 殷勤业. 采用前向空间平滑分组的混合信号波达方向估计算法[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(9):164-172.
- [12] 唐晓杰, 赵迪, 何明浩, 等. 一种基于前后向 Toeplitz 矩阵重构的相干信号 DOA 估计算法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(8):823-829.
- [13] 安春莲, 杨古月, 杨延菊. 基于中值滤波预处理的强冲击噪声背景测向方法[J]. 电子学报, 2021, 49(6): 1159-1166.
- [14] 李帅, 陈辉. 冲击噪声背景下相干信号源的 DOA 估计方法[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(2):178-184.
- [15] SEN L, RONG X H, BIN L, et al. DOA estimation based on sparse representation of the fractional lower order statistics in impulsive noise [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 5(4):860-868.
- [16] 刁鸣, 刘磊, 安春莲. 冲击噪声背景下独立信号与相干信号并存的测向自适应新方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(1):108-113.
- [17] 姚林宏, 高鹰, 石宇, 等. 冲击噪声背景下的虚拟空间平滑算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2011, 29(1):47-50.

作者简介

单泽彪, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为光电检测与现代信号处理、雷达与阵列信号处理。
E-mail: zbshan@126.com