

一种改进的四阶累积量测向算法

陈华, 王安国, 姬雨初, 赵振新, 马宁, 陈彬

(天津大学电子信息工程学院, 300072, 天津)

摘要: 针对降维的四阶累积量矩阵因采样快拍数有限而存在估计误差的问题, 提出一种结合 Toeplitz 近似的四阶累积量旋转不变子空间 (ESPRIT) 测向算法 (TFOC-ESPRIT). 该算法在保持虚拟阵列有效孔径不变的同时, 通过去除原始四阶累积量矩阵中的冗余元素, 得到降维的四阶累积量矩阵, 再对降维矩阵进行 Toeplitz 操作, 恢复其 Toeplitz 结构, 最后利用 ESPRIT 算法估计到达信号的方向. 仿真实验表明: 与 MFOC-ESPRIT 算法相比, TFOC-ESPRIT 算法有效地提高了测向精度, 不仅在少阵元数下能实现多信号的估计, 而且当快拍数为 400 时, 在空间白噪声和空间色噪声环境中其归一化成功概率也较高, 分别达到了 0.996 和 0.788.

关键词: 测向; 四阶累积量; Toeplitz 近似; 虚拟阵列; 空间白噪声; 空间色噪声

中图分类号: TN914.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)12-0036-06

Improved Cumulant Direction Finding Algorithm with Fourth Order

CHEN Hua, WANG Anguo, JI Yuchu, ZHAO Zhenxin, MA Ning, CHEN Bin

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: An improved direction of arrival (DOA) estimation algorithm, called Toeplitz fourth-order cumulant ESPRIT (TFOC-ESPRIT) algorithm, is proposed to deal with the estimation error problem that exists in the reduced-rank fourth-order cumulant (FOC) matrix and is caused by finite sampling snapshots. A reduced-rank FOC matrix is obtained through removing the redundant information encompassed in the primary FOC matrix, while the effective aperture of the virtual array keeps unchanged. Then, the Toeplitz structure of the reduced-rank FOC matrix is recovered by applying the Toeplitz approximation. Finally, the direction of arrival signals is estimated using the ESPRIT algorithm. Simulation results and comparisons with the MFOC-ESPRIT algorithm show that the proposed TFOC-ESPRIT algorithm effectively improves direction-finding accuracy, and that it can not only estimate DOA of more targets with less antennas, but also have higher normalized probability of success — the probability reaches 0.996 and 0.788, respectively, in both the spatially-white noise and the spatially-color noise environments with 400 sampling snapshots.

Keywords: direction finding; fourth-order cumulant; Toeplitz approximation; virtual array; spatially-white noise; spatially-color noise

作为阵列信号处理的一个重要分支, DOA 估计已被广泛应用于各个领域, 如雷达、声纳、无线通信等^[1]. 对于 DOA 估计, 令人关注的方法之一是基于

协方差矩阵的子空间类算法^[2], 它突破了传统估计算法受瑞利限的限制, 实现了来波信号的超分辨率测向.

基于协方差矩阵特征分解的典型算法有 MUSIC(multiple signal classification)算法^[3]和 ESPRIT(estimation of signal parameters via rotational invariance techniques)算法^[4]. 与 MUSIC 算法相比,ESPRIT 算法不需要进行谱峰搜索,因而其在降低计算量方面有明显的优势. 然而,基于协方差矩阵的特征分解要求待估计的信号数应小于阵元数,且需要事先知道噪声的特性^[5],这些条件在一定程度上限制了其实际应用. 为解决该问题,文献[6]提出以四阶累积量矩阵代替协方差矩阵,并结合 ESPRIT 算法对信号来向进行估计的方法. 该方法利用四阶累积量具有抑制高斯噪声的特性和虚拟阵列孔径扩展的性能^[7],实现了色噪声背景下分辨信号的数目大于或等于阵元数. 然而,在四阶累积量矩阵中存在大量的冗余元素,这会造成测向算法的运算量过大,不利于实时处理. 针对此问题,文献[8-9]分别提出了一种减小四阶累积量计算量的方法,但文献[8]仅适用于均匀线阵,虽然文献[9]适用于所有线阵,但其估计精度仍有待于提高. 因在实际中无法得到真实的四阶累积量矩阵,所以文献[8-9]都用阵列接收数据来估计它. 然而,由于采样快拍数有限,估计的四阶累积量矩阵与理想矩阵之间存在着估计误差^[10],这导致基于四阶累积量矩阵测向算法的 DOA 估计性能下降. 为此,本文在文献[9]MFOC-ESPRIT 算法的基础上,结合 Toeplitz 近似,提出了一种改进的四阶累积量测向算法(TFOC-ESPRIT). 该算法旨在恢复由阵列接收数据得到的降维四阶累积量矩阵的 Toeplitz 结构,同时保持了降维矩阵所对应的有效阵列孔径不变,从而提高了 ESPRIT 算法的 DOA 估计性能,且在少阵元数下没有明显增加计算量.

1 信号接收模型

假设空间存在 N 元均匀直线阵列,有 M 个远场窄带独立信号 $s_l(t)$ ($l=1,2,\dots,M$) 入射到阵列上,则阵列接收信号的模型可表示为

$$x_i(t) = \sum_{l=1}^M s_l(t) a_i(\theta_l) + n_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: $n_i(t)$ 为第 i 个阵元上均值为 0、方差为 σ^2 的高斯白噪声; $a_i(\theta_l)$ 表示第 i 个阵元对第 l 个信号的空间响应,其表达式为

$$a_i(\theta_l) = \exp[j2\pi\left(\frac{d}{\lambda}\right)i \sin\theta_l] \quad (2)$$

其中 d 为均匀直线阵元之间的间距, λ 为信号中心频率所对应的波长.

将接收到的数据组成一组列向量,则接收信号模型的矩阵形式为

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

式中: $\mathbf{X}(t)=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$ 为阵元接收的 $N \times 1$ 维数据矢量; $\mathbf{S}(t)=[s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$ 为 $M \times 1$ 维信号矢量; $\mathbf{N}(t)=[n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$ 为 $N \times 1$ 维噪声矢量; $\mathbf{A}=[\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_M)]$ 为 $N \times M$ 维入射信号对应的阵列流形矩阵.

对于零均值的信号源,阵列接收信号的协方差矩阵可表示为

$$\mathbf{R}_2 = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (4)$$

式中: E 表示数学期望; H 代表共轭转置操作; $\mathbf{R}_s = E[\mathbf{S}(t)\mathbf{S}^H(t)]$ 和 $\mathbf{I}$ 分别为入射信号的协方差矩阵和 N 阶单位矩阵.

基于协方差矩阵的估计方法都是建立在信号源为高斯信号、噪声为白噪声的基础上,但在实际通信环境中,接收到的信号往往是非高斯的,加性噪声是有色的高斯过程,所以该类方法只能取得次优的估计性能. 因为非高斯信源在四阶累积量中含有丰富的统计信息^[11],故基于四阶累积量矩阵的估计方法比协方差矩阵法有明显的优势,它可以从加性高斯噪声中分离出非高斯信源,且能扩展实际阵元的孔径,提高分辨率等. 阵列接收信号的四阶累积量定义如下

$$\begin{aligned} \text{cum}(k_1, k_2, k_3^*, k_4^*) &= E[x_{k_1}(t)x_{k_2}(t)x_{k_3}^*(t)x_{k_4}^*(t)] - \\ &E[x_{k_1}(t)x_{k_3}^*(t)]E[x_{k_2}(t)x_{k_4}^*(t)] - \\ &E[x_{k_1}(t)x_{k_4}^*(t)]E[x_{k_2}(t)x_{k_3}^*(t)] - \\ &E[x_{k_1}(t)x_{k_2}(t)]E[x_{k_3}^*(t)x_{k_4}^*(t)] \\ &k_1, k_2, k_3, k_4 \in [1, N] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: cum 表示求累积量;上角标 $*$ 表示复共轭. 显然,四阶累积量 $\text{cum}(k_1, k_2, k_3^*, k_4^*)$ 随着 k_1, k_2, k_3, k_4 的变化共有 N^4 个值. 为了方便操作,可以将四阶累积量的 N^4 个值存入如下定义的 $N^2 \times N^2$ 矩阵 $\mathbf{C}_4$ ^[9] 中,即

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_4[(k_1-1)N+k_2, (k_3-1)N+k_4] &= \\ \text{cum}(k_1, k_2, k_3^*, k_4^*) &= \mathbf{B}\mathbf{C}_s\mathbf{B}^H \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{C}_s$ 为信号的四阶累积量矩阵; $\mathbf{B}$ 为扩展的阵列流形矩阵,其表达式为

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \otimes \mathbf{A} \quad (7)$$

其中 $\otimes$ 为 Kronecker 积, $\mathbf{B}$ 的每一列可表示为

$$\mathbf{b}(\theta) = \mathbf{a}(\theta) \otimes \mathbf{a}(\theta) \quad (8)$$

$\mathbf{b}(\theta)$ 称为扩展的阵列流形,由 Kronecker 积的性质可知, $\mathbf{b}(\theta)$ 为 $N^2 \times 1$ 维矢量,相对于 $\mathbf{a}(\theta)$ 来讲,它的维数扩展了 N 倍,这使得可估计的信源数能大于等于阵元数。

2 算法描述

在无噪声的条件下,式(4)与式(6)具有相似的数学表达式,因此 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别对 $\mathbf{R}_2$ 和 $\mathbf{C}_4$ 起相同的作用。若直接对式(6)中的 $\mathbf{C}_4$ 进行特征值分解,则随着阵元数 N 增加,计算量将非常繁重。此外,在实际的通信环境中,真实的 $\mathbf{C}_4$ 无法得到,往往是用接收数据来估计 $\hat{\mathbf{C}}_4$,但由于采样快拍数有限,估计的 $\hat{\mathbf{C}}_4$ 较真实的 $\mathbf{C}_4$ 存在着估计误差,这将导致 DOA 的性能估计产生偏差。鉴于这些原因,本文提出一种结合 Toeplitz 近似的四阶累积量 ESPRIT 算法来提高 DOA 估计性能。算法的基本思想是先去除原始四阶累积量矩阵 $\mathbf{C}_4$ 中的冗余元素,得到降维的四阶累积量矩阵,记为 $\mathbf{R}_4$,接着对 $\mathbf{R}_4$ 进行 Toeplitz 操作,使其恢复原有的 Toeplitz 结构,最后利用 ESPRIT 算法来估计到达信号的方向。

2.1 有效阵列孔径扩展

为了得到 $\mathbf{R}_4$,首先需要分析虚拟扩展的有效阵列孔径。为便于分析,取均匀阵元个数为 3,其间距为半波长,将式(8)展开可得

$$\mathbf{b}(\theta) = [1, p, p^2, p, p^2, p^3, p^2, p^3, p^4]^T \quad (9)$$

而 $\mathbf{a}(\theta)$ 的表达式为

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, p, p^2]^T \quad (10)$$

式中: $p = \exp(j\pi \sin \theta)$ 。从式(9)和式(10)比较中可以看出, $\mathbf{b}(\theta)$ 的有效扩展只有 2 项(第 6 项和第 9 项),推广到 N 元均匀线阵, $\mathbf{b}(\theta)$ 中只有第 1 到第 N 项以及所有第 kN ($k=2, \dots, N$)项(共 $2N-1$ 项)是有效的,其他均为冗余项。同理,由式(6)可知, $\mathbf{C}_4$ 中必然也存在大量重复值。为此,现将矩阵 $\mathbf{C}_4$ 的第 1 到第 N 行以及所有第 kN 行取出,并按原顺序排列,再取出矩阵相应的列,并按原顺序排列,接着定义一个新的 $(2N-1) \times (2N-1)$ 维矩阵 $\mathbf{R}_4$,并将从原矩阵 $\mathbf{C}_4$ 中取出的行、列按顺序分别存入其中,这样即可得到一个不含冗余数据的四阶累积量矩阵。新构造的矩阵 $\mathbf{R}_4$ 中包含了虚拟阵列扩展的全部信息,这不仅能保证与 $\mathbf{C}_4$ 所对应的虚拟阵列有相同的扩展功能,而且降低了计算复杂度。与式(6)相似, $\mathbf{R}_4$ 可表示为

$$\mathbf{R}_4 = \mathbf{D}\mathbf{C}_s\mathbf{D}^H \quad (11)$$

式中: $\mathbf{D}$ 为有效扩展阵列流形矩阵,它的每一列表达式为 $\mathbf{d}(\theta) = [1, p, \dots, p^{2N-2}]^T$ 。

2.2 TFOC-ESPRIT 算法

因为在实际中无法得到真实的 $\mathbf{C}_4$,故用接收数据来估计统计值 $\hat{\mathbf{C}}_4$,同理用 $\hat{\mathbf{R}}_4$ 来代替 $\mathbf{R}_4$ 。当信源相互独立时,理想的协方差矩阵 $\mathbf{R}_2$ 具有 Toeplitz 结构^[12]。由于式(4)与式(6)、式(11)具有相似的数学表达式,因此理想的 $\mathbf{C}_4$ 、 $\mathbf{R}_4$ 也具有 Toeplitz 结构。但是,由于采用快拍数有限,因而估计的 $\hat{\mathbf{C}}_4$ 较真实的 $\mathbf{C}_4$ 存在着估计误差,这也将导致 $\hat{\mathbf{R}}_4$ 偏离 $\mathbf{R}_4$ 。为了恢复 $\hat{\mathbf{R}}_4$ 的 Toeplitz 结构,即得到 Toeplitz 矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{4T}$,可通过求解式(12)使得 Toeplitz 矩阵 $\mathbf{R}_{4T}$ 接近真实的降维四阶累积量矩阵 $\mathbf{R}_4$,即

$$\min_{\mathbf{R}_{4T} \in \mathbf{S}_T} \|\mathbf{R}_{4T} - \mathbf{R}_4\| \quad (12)$$

式中: $\mathbf{S}_T$ 为 Toeplitz 矩阵集; $\|\cdot\|$ 为度量距离。由 Toeplitz 近似法的原理可知 $\mathbf{R}_{4T}$ 的最优解为

$$\hat{\mathbf{R}}_{4T} = \text{toep}(\hat{\mathbf{R}}_4) \quad (13)$$

式中:toep 表示 Toeplitz 运算。 $\hat{\mathbf{R}}_{4T}$ 的基本项由下式给出

$$\hat{z}_h = (2N-1-h+1)^{-1} \sum_{p=1}^{2N-1-h+1} \hat{r}_{p(p+h-1)} \quad (14)$$

式中: $\hat{r}_{p(p+h-1)}$ 为 $\hat{\mathbf{R}}_4$ 第 p 行第 $(p+h-1)$ 列。然后,通过对这些基本项组成向量进行 Toeplitz 操作,得

$$\hat{\mathbf{R}}_{4T} = \text{toep}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, \dots, \hat{z}_{2N-1}) \quad (15)$$

接着对矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{4T}$ 进行特征值分解,并运用 ESPRIT 算法,即可得到入射信号的方向。 $\hat{\mathbf{R}}_{4T}$ 的特征分解表示为

$$\hat{\mathbf{R}}_{4T} = \sum_{q=1}^{2N-1} \hat{\lambda}_q \hat{\mathbf{e}}_q \hat{\mathbf{e}}_q^H = \hat{\mathbf{U}}_s \hat{\mathbf{\Sigma}}_s \hat{\mathbf{U}}_s^H + \hat{\mathbf{U}}_n \hat{\mathbf{\Sigma}}_n \hat{\mathbf{U}}_n^H \quad (16)$$

式中: $\hat{\mathbf{\Sigma}}_s$ 、 $\hat{\mathbf{\Sigma}}_n$ 分别为由 $\hat{\mathbf{R}}_{4T}$ 的大、小特征值组成的对角阵; $\hat{\mathbf{U}}_s$ 、 $\hat{\mathbf{U}}_n$ 分别为由大、小特征值所对应的特征向量张成的信号子空间和噪声子空间。把得到的信号子空间 $\hat{\mathbf{U}}_s$ 划分为 2 个维数相同的子空间 $\hat{\mathbf{U}}_{s1}$ 、 $\hat{\mathbf{U}}_{s2}$,然后求出 $\hat{\mathbf{U}}_{s1}$ 、 $\hat{\mathbf{U}}_{s2}$ 子空间的旋转关系矩阵 $\hat{\Phi}$,再对 $\hat{\Phi}$ 进行特征值分解,得到其特征值对角阵 $\hat{\Omega}$ ($\hat{\Omega}$ 是由 M 个特征值组成的对角阵),最后对这 M 个特征值分别取其幅角,便可得到相应的 M 个入射角。

因大特征值所对应的特征向量张成的信号子空间 $\hat{\mathbf{U}}_s$ 与有效扩展阵列流形张成的信号子空间 $\mathbf{D}$ 是近似相等的,故由 ESPRIT 算法原理有

$$\hat{\mathbf{U}}_{s1} = \hat{\mathbf{U}}_{s2} \hat{\Phi} \quad (17)$$

式(17)两边同左乘 $\hat{\mathbf{U}}_{s2}^H$ 的伪逆得

$$\hat{\Phi} = \hat{\mathbf{U}}_{s2}^H \hat{\mathbf{U}}_{s1} \quad (18)$$

式中: $\#$ 表示矩阵的伪逆. 对式(18)求得的 $\hat{\Phi}$ 进行特征分解得

$$\hat{\Phi} = \hat{E}\hat{\Omega}\hat{E}^H \quad (19)$$

式中: $\hat{\Omega}$ 表示由 $\hat{\Phi}$ 的特征值组成的对角阵; $\hat{E}$ 为 $\hat{\Phi}$ 的特征向量张成的特征矩阵. 取出特征值对角阵 $\hat{\Omega}$ 中的每一个对角线元素 $\hat{\delta}_l$, 则 M 个来波方向可由下式得到

$$\hat{\theta}_l = -\frac{180}{\pi} \arcsin\left(\frac{\arg(\hat{\delta}_l)}{\pi}\right), \quad l = 1, 2, \dots, M \quad (20)$$

式中: $\arg$ 表示求复数的幅角.

综上所述, 本文算法可描述为:

- (1) 按式(5)、式(6)估计四阶累积量矩阵 $\hat{C}_4$;
- (2) 由 $\hat{C}_4$ 和有效阵列扩展的定义求出降维的四阶累积量矩阵 $\hat{R}_4$;
- (3) 按式(14)、式(15)构造 Toeplitz 化的降维矩阵 $\hat{R}_{4T}$;
- (4) 按式(16)对 $\hat{R}_{4T}$ 作特征分解求出其信号子空间 $\hat{U}_s$, 并将 $\hat{U}_s$ 划分为 2 个维数相等的子空间 $\hat{U}_{s1}$ 、 $\hat{U}_{s2}$;
- (5) 根据式(18)~式(20)求出 M 个信号来向.

由 TFOC-ESPRIT 算法原理可知, 在相同条件下, 与 MFOC-ESPRIT 算法相比, 它需要多进行 $2(2N-1)-1$ 次求均值、 $2(2N-1)^2-(2N-1)$ 次加法和 $2(2N-1)-1$ 次求共轭的运算, 但 TFOC-ESPRIT 算法采用较少阵元数即能估计出信源, 因此在 N 较小时, 可以认为 TFOC-ESPRIT 算法与 MFOC-ESPRIT 算法的计算量相当.

3 性能仿真

基于以上 TFOC-ESPRIT 算法的理论推导, 为了更好说明本文算法的性能, 在白噪声和色噪声环境下, 分别进行了性能仿真, 同时也给出了与文献[9]MFOC-ESPRIT 算法比较的仿真结果.

在 2 个仿真实验中, 共同的仿真参数为均匀直线阵个数 $N=3$, 入射的独立非高斯信号个数 $M=3$, 阵元间距 $d=\frac{\lambda}{2}$, 3 个独立信号分别从 -30° 、 4° 、 35° 入射, 并且具有相同的功率. 噪声独立于入射信号, 分别为高斯白噪声和色噪声. 用归一化成功概率、平均最大估计误差、平均估计方差作为性能度量准则. 仿真中, 归一化成功概率定义为成功估计 3 个信源的次数与总实验次数间的比值(实验 1 和实验

2 中分别设定信源估计值与真实值间绝对偏差在 0.8° 和 1.8° 以内为估计成功).

实验 1 主要测试本文 TFOC-ESPRIT 算法随着信噪比变化的性能. 本实验中, 白噪声和色噪声背景下均设定采样快拍长度为 1 500, 输入信噪比从 5 dB 变至 30 dB, 步长为 5 dB, 对每次估计值取 500 次蒙特卡罗仿真. 仿真结果如图 1~图 3 所示.

从图 1 中可以看出, 在白噪声和色噪声环境中, 低信噪比(5~10 dB)下 TFOC-ESPRIT 算法估计信号的归一化成功概率均优于文献[9]的 MFOC-ESPRIT 算法, 且随着信噪比的增加, 它们估计角度的成功概率都有所提高, 在 15 dB 以后估计的成功概率为 1. 由图 2 和图 3 可知, 在白噪声和色噪声环境中, 低信噪比下 TFOC-ESPRIT 算法的估计精度均明显优于 MFOC-ESPRIT 算法, 且随着信噪比的增加, 2 种算法估计的角度均趋于理论值. 低信噪比下 TFOC-ESPRIT 算法较 MFOC-ESPRIT 算法的性能优势在于其运用了 Toeplitz 化技术, 恢复了降维四阶累积量估计矩阵 $\hat{R}_4$ 的 Toeplitz 结构, 提高了算法的鲁棒性.

实验 2 主要测试 TFOC-ESPRIT 算法随着快拍数

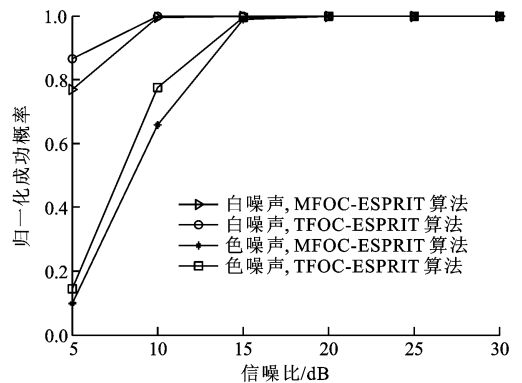


图 1 2 种算法的归一化成功概率随信噪比变化的曲线

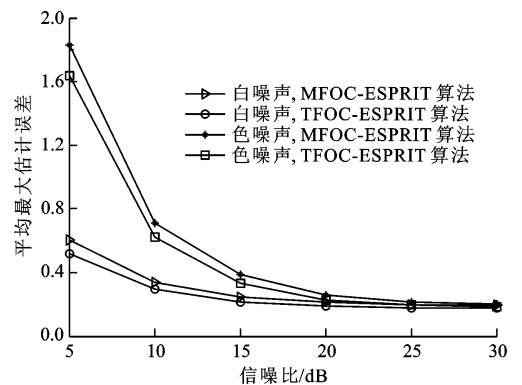


图 2 2 种算法的平均最大估计误差随信噪比变化的曲线

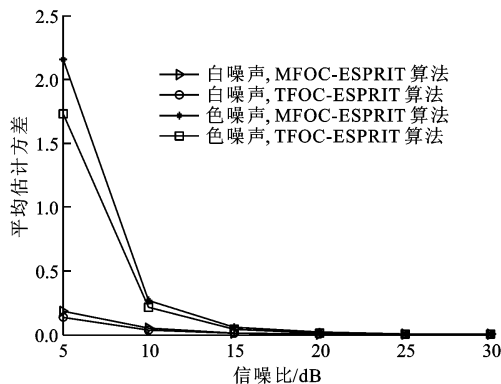


图3 2种算法的平均估计方差随信噪比变化的曲线

变化的性能. 本实验中, 在白噪声和色噪声背景下均设定每个信源的信噪比为 10 dB, 采样快拍数由 400 变化到 2 000, 同样对每次估计值取 500 次蒙特卡罗仿真. 仿真结果如图 4、图 5 和图 6 所示.

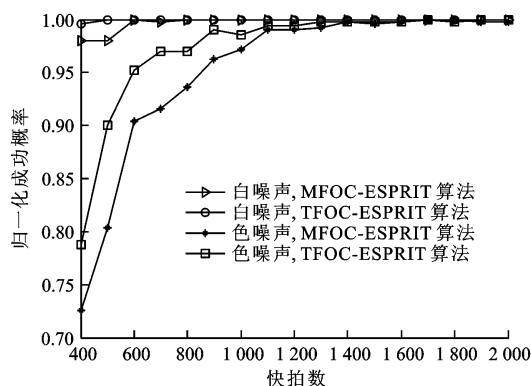


图4 2种算法的归一化成功概率随快拍数变化的曲线

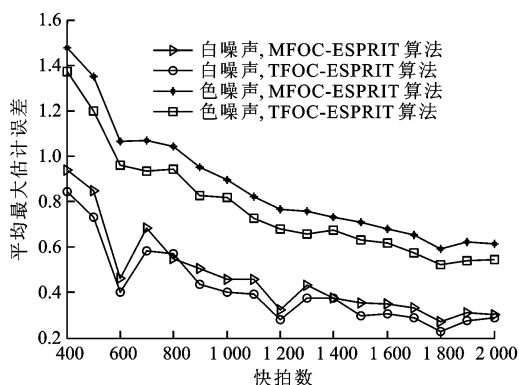


图5 2种算法的平均最大估计误差随快拍数变化的曲线

从图 4、图 5 和图 6 可以看出: 在小快拍数 (400 ~ 800) 下的白噪声和色噪声环境中, TFOC-ESPRIT 算法的估计性能均优于 MFOC-ESPRIT 算法; 当采样快拍长度介于 400 ~ 800 之间时, 在色噪声背景下, 3 幅图中 2 种算法的曲线都出现明显的

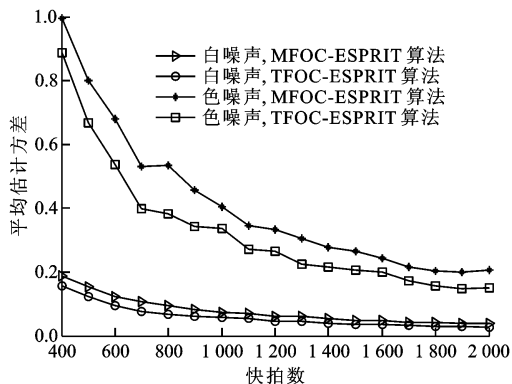


图6 2种算法的平均估计方差随快拍数变化的曲线

波动, 而在白噪声下, 只有图 5 的 2 条曲线出现明显波动, 这说明 2 种算法在色噪声背景下的误差会比白噪声下稍大. 产生波动的原因是精确估计四阶累积量矩阵对采样快拍数的要求很高, 因此在小快拍数下, 算法的性能将会下降, 曲线出现波动. 随着快拍数的增加, 2 种算法估计的成功概率和估计的精度都随之提高, 3 幅图中的所有性能曲线最终都趋于稳定.

由此可以得出结论: 当快拍数取无穷大时, TFOC-ESPRIT 算法和 MFOC-ESPRIT 算法中信号的估计值都将收敛于理论值, 但 TFOC-ESPRIT 算法收敛速度快于 MFOC-ESPRIT 算法, 这是因为 TFOC-ESPRIT 算法中的降维四阶累积量估计矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{4T}$ 较 MFOC-ESPRIT 算法中的 $\hat{\mathbf{R}}_4$ 更接近于理想矩阵 $\mathbf{R}_4$.

4 结 论

结合 Toeplitz 近似方法, 本文提出了一种新的 DOA 估计算法——TFOC-ESPRIT 算法. 该算法保证了虚拟阵列孔径的有效扩展不变, 待估计的信源数可大于或等于阵元数. 此外, 对于非高斯信源的测向, 该算法较 MFOC-ESPRIT 算法具有更低的平均最大估计误差、平均估计方差和更高的归一化成功概率, 并且在一定程度上降低了对采样快拍数据的要求. 仿真结果表明了本文算法的有效性和正确性. 今后需进一步深入研究减少四阶累积量方法的计算量问题.

参考文献:

- [1] 徐元欣, 王安国, 聂仲尔. 基于四阶累积量的近远场源多参数联合估计算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1379-1384.

XU Yuanxin, WANG Anguo, NIE Zhonger. Joint

- multi-parameters estimation of near-field and far-field sources based on the fourth order cumulant [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(6): 1379-1384.
- [2] 石娟,邓科,殷勤业. 一种适合任意阵列流型的相干信号波达方向估计算法[J]. 西安交通大学学报,2009, 43(6): 72-75.
SHI Juan, DENG Ke, YIN Qinye. A method for estimating the direction of arrival of coherent signals on arbitrary antenna array in multi-path scenarios [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(6): 72-75.
- [3] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.
- [4] ROY R, KAILATH T. ESPRIT: estimation of signal parameters via rotational invariance techniques [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1989, 37(7): 984-995.
- [5] SHAN Zhilong, YUM T S P. A conjugate augmented approach to direction-of-arrival estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(11): 4104-4109.
- [6] YE Zhongfu, ZHANG Yufeng. DOA estimation for non-Gaussian signals using fourth-order cumulants [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2009, 3(7): 1069-1078.
- [7] 姚敏立,殷勤业. 累量域高分辨率二维波达方向估计算法[J]. 西安交通大学学报,1999,33(1):15-18.
YAO Minli, YIN Qingye. High-resolution algorithm for two dimensional direction finding of non-Gaussian sources [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(1): 15-18.
- [8] 刁鸣,吴小强,李晓刚. 基于四阶累积量的测向方法研究[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(2): 226-228.
DIAO Ming, WU Xiaoqiang, LI Xiaogang. Study on DOA estimation based on fourth-order cumulants[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(2): 226-228.
- [9] 唐建红,司锡才,彭巧乐. 快速四阶累积量旋转不变子空间算法[J]. 西安交通大学学报,2009,43(6): 88-92.
TANG Jianhong, SI Xicai, PENG Qiaole. Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques algorithm with speedy fourth-order cumulants [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(6): 88-92.
- [10] 黄蕾,张曙. 一种改进的四阶累积量波束形成算法[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(12): 2345-2348.
HUANG Lei, ZHANG Shu. New beamforming algorithm based on the fourth order cumulant [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(12): 2345-2348.
- [11] ZENG Wenjun, LI Xilin, ZHANG Xianda. Direction-of-arrival estimation based on the joint diagonalization structure of multiple fourth-order cumulant matrices [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(3): 164-167.
- [12] 王鼎,姚晖,吴瑛. 基于协方差匹配技术的互耦和幅相误差联合校正算法[J]. 电子学报,2012,40(3): 580-586.
WANG Ding, YAO Hui, WU Ying. The joint calibration algorithms of mutual coupling and gain-and-phase errors based on covariance matching technique [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(3): 580-586.

[本刊相关文献链接]

- 王静,黄建国,侯云山. 采用峰值平均功率比的低信噪比水下多目标检测方法. 2012, 46(2): 124-129.
- 刘阳,冯志勇,尉志清,等. Nakagami- m 信道下认知中继网络的中断概率上界闭式解模型. 2012, 46(10): 95-100.
- 张立峰,王彤,吴建新,等. 机载雷达目标空时参数快速估计方法. 2012, 46(2): 135-140.
- 张莹,殷勤业,穆鹏程. 利用均匀线阵实现高移动性通信系统中的多普勒补偿. 2011, 45(8): 73-77.
- 杨继波,李会勇,陈客松,等. 球面共形天线阵列的稀布优化方法. 2011, 45(4): 77-81.
- 陈志菲,孙进才,侯宏. 子阵和相位平滑的相位差方向估计方法. 2010, 44(10): 72-76.
- 穆鹏程,殷勤业,王文杰. 无线通信中使用随机天线阵列的物理层安全传输方法. 2010, 44(6): 62-66.
- 王文杰,张渭乐,殷勤业. 利用离去角度的无线传感器网络分布式节点定位方法. 2010, 44(2): 61-66.
- 侯云山,黄建国,金勇. 被动合成阵列极大似然参数估计的快速方法. 2009, 43(12): 106-110.
- 石娟,邓科,殷勤业. 一种适合任意阵列流型的相干信号波达方向估计算法. 2009, 43(6): 72-76.
- 唐建红,司锡才,彭巧乐. 快速四阶累积量旋转不变子空间算法. 2009, 43(6): 88-92.
- 聂卫科,冯大政,刘建强. 二维波达方向估计的非酉联合对角化方法. 2008, 42(6): 747-750.
- 罗铭,殷勤业,冯昂,等. 相关衰落多输入多输出系统的参数化信道估计. 2007, 41(12): 1431-1435.

(编辑 刘杨)