

脉冲噪声下基于广义类相关熵的 DOA 估计新方法

邱天爽 张金凤 宋爱民 唐 洪

(大连理工大学电子信息与电气工程学部, 大连 116024)

摘 要: 针对基于分数低阶统计量波达方向估计方法的局限性, 受相关熵概念的启发, 本文提出广义类相关熵 (GCAS) 的概念和相应的波达方向估计新方法。计算机仿真结果表明, 在 Alpha 稳定分布噪声环境下, 本文提出的基于 GCAS 的 MUSIC 波达方向估计方法比基于分数低阶统计量的 MUSIC 方法在抗噪声特性和多源信号分辨特性等方面具有更好的性能。

关键词: 广义类相关熵; 波达方向估计; 分数低阶统计量; MUSIC 算法

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)04-0463-04

The Generalized Correntropy-Analogous Statistics Based Direction of Arrival Estimation in Impulsive Noise Environments

QIU Tian-shuang ZHANG Jin-feng SONG Ai-min TANG Hong

(Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: According to the limitations of the FLOM based direction of arrival (DOA) methods, inspired by the concept of correntropy, this letter proposes a new class of statistics, namely, the generalized correntropy-analogous statistics (GCAS), and the corresponding new estimation for DOA in the Alpha stable noise conditions. The simulation results show that the proposed GCAS-MUSIC algorithm is much better than those of the fractional lower order statistics based FLOM-MUSIC and PFLOM-MUSIC algorithms under low SNR conditions and multi-source signals environment.

Key words: generalized correntropy-analogous; direction of arrival; fractional lower order statistics; MUSIC

1 引言

多信号分类 (MUSIC)^[1] 是一种用于估计信号波达方向 (DOA) 的经典方法。随着 Alpha 稳定分布^[2] 理论的研究进展, 学者们提出了多种基于分数低阶统计量 (FLOS) 的 DOA 估计算法, 例如 FLOM-MUSIC^[3], PFLOM-MUSIC^[4] 以及数据加权分数低阶 DOA 算法^[5] 等, 有效改善了经典 MUSIC 算法在脉冲噪声下的性能。然而, 上述基于 FLOS 的 MUSIC 算法的有效性, 在很大程度上依赖于对信号噪声的脉冲特性特别是对 Alpha 稳定分布 α 参数的先验知识。在实际应用中, 这种先验知识往往是难于得到的, 只能根据接收信号进行估计, 从而可能影响算法的性能。

受相关熵^[6] 理论的启发, 本文提出广义类相关熵 (简称为 GCAS) 的概念, 并在其基础上提出一种新的 MUSIC 算法 (简称为 GCAS-MUSIC)。该算法能够有效

抑制脉冲噪声的影响, 在较低信噪比条件下得到高精度的 DOA 估计, 且不依赖于对接收信号和噪声先验知识的了解。

2 类相关熵与广义类相关熵

设 X 与 Y 为服从独立同分布 (i.i.d.) 的对称 Alpha 稳定分布 ($S\alpha S$) 随机变量, 其特征指数满足 $1 < \alpha \leq 2$ 。 X 与 Y 的类相关熵统计量定义为:

$$R = E \left[\exp \left(-\frac{|X-Y|^\alpha}{2\sigma^\alpha} \right) XY \right] \quad (1)$$

式中, σ 为核长。可以证明, 类相关熵 R 是有界的。进一步地, 定义广义类相关熵为

$$R_c = E \left[\exp \left(-\frac{(aX-bY)^\alpha}{2\sigma^\alpha} \right) XY \right] \quad (2)$$

式中, a 和 b 为任意给定的正值常数。同样可以证明 R_c 是有界的。

3 基于GCAS的DOA估计:GCAS-MUSIC算法

3.1 问题描述

设均匀线性阵列天线,阵元数为 M ,相互独立的窄带信源数为 P ,方向角为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ 。阵列输出信号可表示为

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^P a(\theta_k) s_k(t) + n_m(t) \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

其中, $a(\theta_k) = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d\sin(\theta_k)}$ 为第 m 个阵元指向 θ_k 方向的方向系数, λ 为载波波长, d 为相邻两阵元的间隔, $s_k(t)$ 接收的第 k 个纯净信号, $n_m(t)$ 表示接收信号 $x_m(t)$ 中的噪声。

3.2 基于GCAS阵列信号的矩阵

本文提出一种基于GCAS的有界矩阵 $\mathbf{C}_{M \times M}$,其 i 行 j 列元素 C_{ij} 表示为:

$$C_{ij} = E \left\{ \exp\left(-\frac{|ax_i(t) - bx_j^*(t)|^2}{2\sigma^2}\right) x_i(t)x_j^*(t) \right\} \quad (4)$$

式中, x_i 和 x_j 分别表示接收信号矢量的第 i 个和第 j 个信号。

类似于MUSIC算法中的协方差矩阵,基于GCAS的矩阵 $\mathbf{C}_{M \times M}$ 可以分解为信号子空间和噪声子空间,从而可以应用于DOA估计。

3.3 GCAS-MUSIC波达方向估计算法

表1给出了GCAS-MUSIC波达方向估计算法的流程。

表1 GCAS-MUSIC波达方向估计算法流程

Tab. 1 The GCAS-MUSIC algorithm for direction of arrival

步骤1:以时间平均替代统计平均,依据式(4)计算 N 点数据的 \hat{C}_{ij} 估计值。参数 a, b 和 σ 的选取结合后续仿真实验介绍。

步骤2:对 $\hat{\mathbf{C}}_{M \times M}$ 做奇异值分解(SVD),构造 $M \times (M-P)$ 矩阵 $\hat{\mathbf{E}}_n \triangleq [\hat{\mathbf{e}}_{p+1}, \hat{\mathbf{e}}_{p+2}, \dots, \hat{\mathbf{e}}_M]$,其中 $\hat{\mathbf{e}}_{p+1}, \hat{\mathbf{e}}_{p+2}, \dots, \hat{\mathbf{e}}_M$ 为对应于矩阵 $\hat{\mathbf{C}}_{M \times M}$ 的 $M-P$ 个最小的奇异矢量。

步骤3:按照式(5)计算GCAS-MUSIC谱(\mathbf{E}_n 以其估计值 $\hat{\mathbf{E}}_n$ 替代):

$$P_{\text{GCAS-MUSIC}}(\phi) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\phi) \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H \mathbf{a}(\phi)}, \quad -90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \quad (5)$$

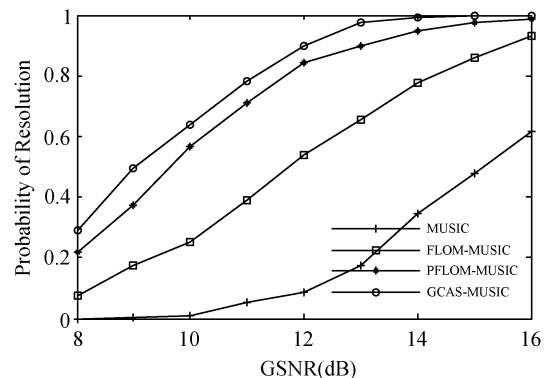
式中, $\mathbf{a}^H(\phi) = [1 \ e^{-j2\pi(d/\lambda)\sin\phi} \ \dots \ e^{-j2\pi((M-1)d/\lambda)\sin\phi}]^T$ 为 $M \times 1$ 维线性阵列方向矢量。

步骤4:选择 $P_{\text{GCAS-MUSIC}}(\phi)$ 中的 P 个局部峰值 $\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_P$ 作为DOA估计值。

4 计算机仿真

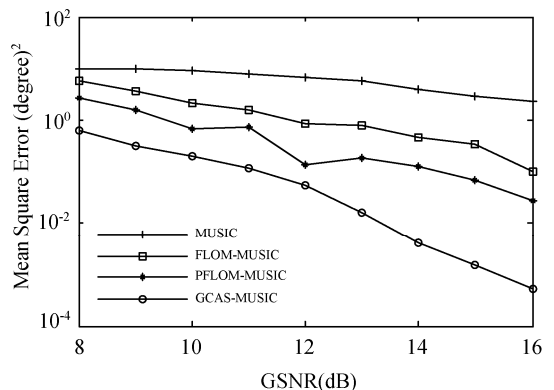
采用本文的GCAS-MUSIC算法进行了DOA估计的计算机仿真,并与FLOM-MUSIC^[3]和PFLOM-MUSIC^[4]算法进行了对比。仿真中,采用2个具有相同功率的独立QAM信号作为接收信号,接收阵列阵元数 $M=5$,阵元间隔为 $d=\lambda/2$,信源的方向分别为 $\theta_1=-5^\circ$ 和 $\theta_2=5^\circ$,加性噪声服从 $S\alpha S$ 分布。每个仿真均独立进行500次蒙特卡罗实验。采用广义信噪比GSNR^[2]对信号噪声进行设置,采用可分辨概率和均方误差来评价DOA估计的性能。

实验1 信噪比的影响。采用 $\alpha=1.6$ 的 $S\alpha S$ 噪声,GSNR为8dB—16dB,对于FLOM-MUSIC算法和PFLOM-MUSIC算法,设定 $p=1$ ^[3,4]。图1给出了计算机仿真的结果。



(a) 可分辨概率

(a) Probability of resolution



(b) 均方误差

(b) Mean square error

图1 $S\alpha S$ 噪声下算法性能随GSNR的变化

Fig. 1 The performance of the algorithms versus GSNR

实验 2 特征指数 α 的影响。 α 值设定为 1.1—1.8, GSNR = 15dB。图 2 给出了仿真结果。

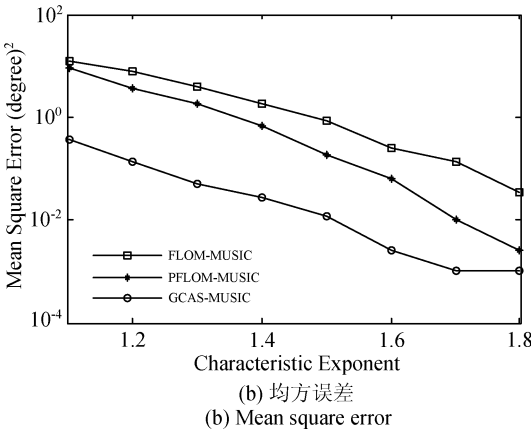
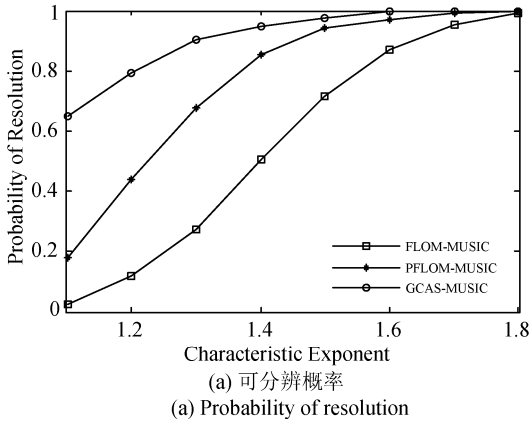


图 2 $S_{\alpha S}$ 噪声下算法性能随 α 值的变化

Fig. 2 The performance of the algorithms versus α values

实验 3 快拍数的影响。 α 值设定为 1.6, GSNR = 15dB。图 3 给出了仿真结果。

实验 4 多信号分辨性能。 α 值设定为 1.5, GSNR = 20dB。图 4 给出了仿真结果。

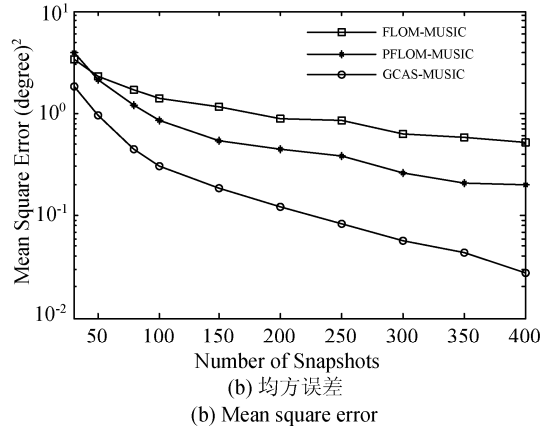
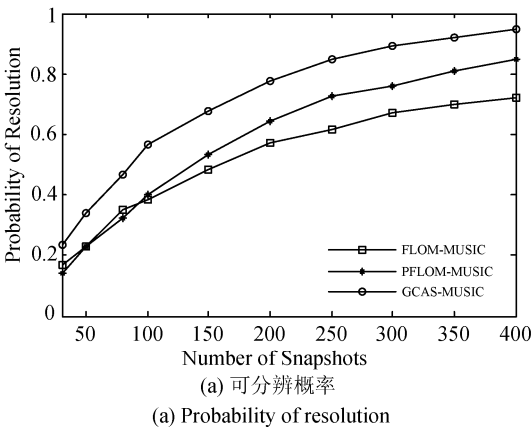


图 3 $S_{\alpha S}$ 噪声下算法性能随快拍数的变化

Fig. 3 The performance of the algorithms versus different snapshots under $S_{\alpha S}$ noise

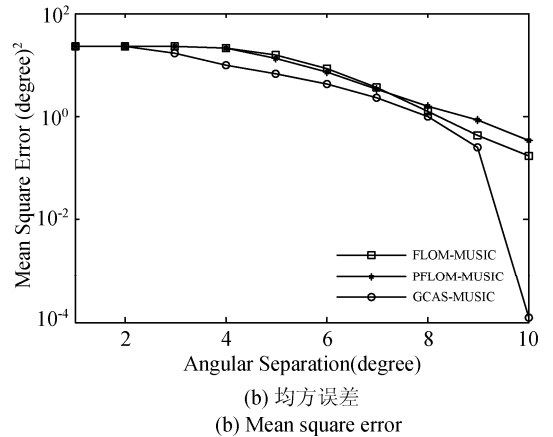
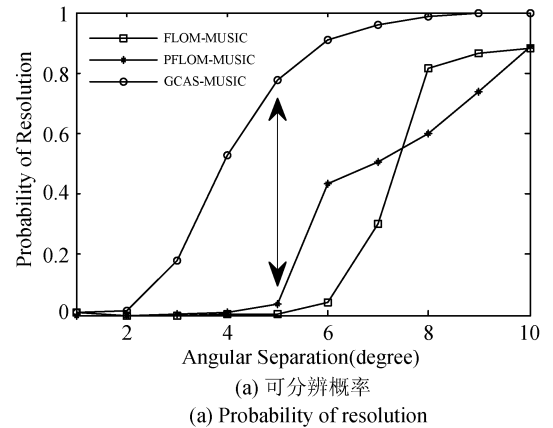


图 4 $S_{\alpha S}$ 噪声下算法分辨 2 个源信号的性能

Fig. 4 The performance of separating two angles

实验 5 GCAS-MUSIC 算法参数 a 、 b 和 σ 的选择。设定核长参数 $\sigma = 3$, 考察在不同信噪比条件下参数 a 和 b 对算法性能的影响。仿真结果如图 5 所示。另设定 a 和 b 参数分别为 0.25 和 1.0, 测试不同信噪比条件下核长参数 σ 对算法的影响。仿真结果如图 6

所示。

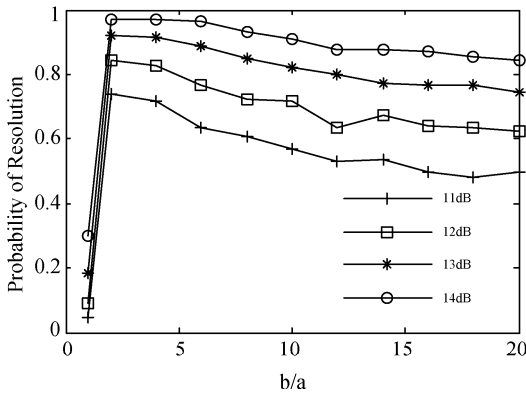


图5 a 和 b 参数对分辨率的影响 ($\alpha=1.5$)

Fig. 5 The Probability of resolution for different a and b under $\alpha=1.5$

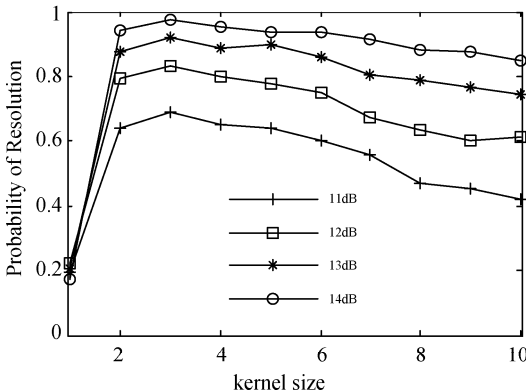


图6 核长参数 σ 对算法性能的影响 ($a=0.25$, $b=1$)

Fig. 6 The Probability of resolution for different kernel size under $a=0.25$, $b=1$

5 结论

针对 FLOS 波达方向估计算法尚存在的问题,本文提出广义类相关熵 (GCAS) 的概念和相应的波达方向估计新方法 (GCAS-MUSIC)。计算机仿真表明,相对于基于 FLOS 的 MUSIC 算法,本文的 GCAS-MUSIC 算法在抗噪声特性和多源信号分辨特性等技术指标上全面优于 FLOS-MUSIC 和 PFLOS-MUSIC 算法,是一种很有潜力的 DOA 估计新方法。

参考文献

- [1] R. O. Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat, 1986,34(3):276-280.
- [2] C. L. Nikias and M. Shao. Signal Processing with α -Stable Distribution and Applications[M]. John Wiley&Sons,1995: 1-153.

- [3] T. H. Liu and J. M. Mendel. A subspace-based direction finding algorithm using fractional lower order statistics [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49 (8):1605-1613.
- [4] H. Belkacemi and S. Marcos. Robust subspace-based algorithms for joint angle/Doppler estimation in non-Gaussian clutter[J]. Signal Processing, 2007, 87(7):1547-1558.
- [5] 周祎,冯大政,刘建强,郑春弟. 一种对称 α 稳定噪声中的 DOA 估计新方法[J]. 信号处理, 2007, 23(2): 200-203.
Zhou. Y, Feng. D Z, Liu. J Q, Zheng C D. A New Method of DOA Estimation in Symmetric α - Stable Noise Environment[J]. Signal Processing, 2007, 23(2): 200-203. (in Chinese)
- [6] W. F. Liu, P. P. Pokharel, and J. C. Principe. Correntropy: properties and applications in non-Gaussian signal processing [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2007, 55(11):5286-5298.

作者简介



邱天爽(1954-),男,江苏海门人,博士,大连理工大学教授、博士生导师。主要从事信号信息处理方面的教学与研究。在国内外学术期刊与会议上发表论文约 180 篇,曾获国家教育部科学技术二等奖等多项科技奖励。

E-mail: qtiutsh@dlut.edu.cn



张金凤(1979-),女,河北定州人,硕士,大连理工大学信号与信息处理专业博士生,在国内外重要学术期刊发表论文多篇,主要从事自适应信号处理和非高斯信号处理方面的研究工作。

E-mail: zhangjf@scz.edu.cn



宋爱民(1978-),男,辽宁大连人,硕士,大连理工大学信号与信息处理专业博士生,主要从事非高斯信号处理研究工作。E-mail: songaimin@djtu.edu.cn



唐洪(1977-),男,四川绵阳人,博士,大连理工大学电信学部副教授,在国内外学术期刊上发表论文 20 余篇,主要从事非高斯信号处理与射频信号处理,心音降噪方法与应用研究。

E-mail: tanghong@dlut.edu.cn