doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.01.007
引用格式:马金全,葛临东,童莉.一种对称 α 稳定分布噪声环境下 DOA 估计新算法[J].电讯技术,2014,54(1):34-39.[MA Jin-quan,GE Lin-dong,TONG Li. A New DOA Algorithm Based on Nonlinear Compress Core Function in Symmetric α-stable Distribution Noise Environment[J].Telecommunication Engineering,2014,54(1):34-39.]

一种对称 α 稳定分布噪声环境下 DOA 估计新算法*

马金全**,葛临东,童 莉

(信息工程大学 信息系统工程学院,郑州 450002)

摘 要:脉冲噪声环境下波达方向(DOA)估计是阵列信号处理领域一个新兴研究方向。针对 α 稳定分布噪声环境下经典 MUSIC 算法性能退化的问题,提出了一种新的基于非线性压缩核函数(NCCF)的 DOA 估计算法。该算法利用基于 NCCF 的有界矩阵代替了 MUSIC 的协方差矩阵,通过对有界矩阵进行特征分解确定信号子空间和噪声子空间,借用 MUSIC 谱估计公式进行谱峰搜索,得到 DOA 的估计值。仿真结果表明,NCCF-MUSIC 算法运算复杂度较低,相比于基于分数低阶统计量(FLOS)的 MUSIC 方法和基于广义类相关熵(GCAS)的 MUSIC 算法,该方法具有更好的准确度和稳定性。

关键词:波达方向估计; α 稳定分布; 非线性压缩核函数; MUSIC 算法; 非高斯信号处理

中图分类号:TN911.23 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-893X(2014)01-0034-06

A New DOA Algorithm Based on Nonlinear Compress Core Function in Symmetric α-stable Distribution Noise Environment

MA Jin-quan,GE Lin-dong,TONG Li

(School of Information System Engineering,Information Engineering University,Zhengzhou 450002,China)

Abstract:Direction of arrival (DOA) estimation in the impulse noise environment is a new research direction in the array signal processing field. To solve the problem of performance degradation when applying classic MUSIC algorithm for DOA estimation in the α-stable distribution noise environment, a novel DOA estimation algorithm based on a nonlinear compress core function (NCCF) is provided and named as the NCCF-MUSIC. To obtain a DOA estimation, the NCCF-MUSIC method replaces the covariance matrix in MUSIC by a bounded matrix based on the NCCF, and then determines the signal subspace and the noise subspace by feature decomposition, and finally, introduces the MUSIC spectrum estimation algorithm to make a spectral peak searching. Simulation results show that the new NCCF-MUSIC method with a lower computation cost has the higher performance in accuracy and validity than the MUSIC methods based on fractional lower order statistics (FLOS) or based on generalized correntropy-analogous statistics (GCAS).

Key words:DOA; α-stable distribution; nonlinear compress core function; MUSIC algorithm; non-Gauss signal processing

1 引 言

波达方向(Direction Of Arrival, DOA)估计是阵列信号处理的重要研究内容之一,在雷达、声纳、通信等领域具有重要的应用价值。多重信号分类(MUSIC)算法在特定条件下具有较好的分辨力、估计精度和稳定性,现已成为一种 DOA 估计的经典方

* 收稿日期:2013-10-10;修回日期:2014-01-15 Received date:2013-10-10;Revised date:2014-01-15
基金项目:河南省基础与前沿计划项目(132300410049)
Foundation Item:The Basis and Advanced Program of Henan Province(No.132300410049)
** 通讯作者:ma7q@163.com Corresponding author:ma7q@163.com

法[1]。近年来，随着 α 稳定分布理论的研究进展，许多结果表明用 α 稳定分布来描述大气噪声和人为脉冲干扰优于采用高斯分布的模型[2]。为了提高脉冲噪声环境下 MUSIC 算法的估计性能，多种新算法被提出，例如 FLOM-MUSIC[3]、TF-FLOM-MUSIC[4]、GCAS-MUSIC[5]等。然而，上述算法要么依赖于对稳定分布噪声特性参数的先验知识，要么算法实现复杂度较高，从而影响了算法的实际应用。

在对称 α 稳定分布噪声条件下，本文提出了一种新的基于压缩核函数的 MUSIC 算法（简称为 NCCF-MUSIC），该算法不依赖于对噪声先验知识的了解，并且算法复杂度低，具有良好的估计稳定性。

2　信号处理模型

2.1　均匀圆阵 MUSIC 算法

均匀圆阵阵列结构图如图 1 所示，圆阵半径为 r，阵元个数为 M。假设信号个数为 D，$s_k(t)$ 为波长 λ 的远场信号源（$k=1,2,\cdots,D$），入射方向分别为 (θ_k,β_k)，其中 θ_k 为信号方位角（$0\leqslant\theta_k\leqslant 2\pi$），$\beta_k$ 为信号俯仰角（$0\leqslant\beta_k\leqslant\pi/2$）；假定信号互不相关，各阵元噪声 $n_i(t)$ 为相互独立（$i=1,2,\cdots,M$）的高斯噪声，并与信号不相关，则阵列输出为

$$\boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{s}(t)+\boldsymbol{n}(t) \tag{1}$$

其中：

$$\boldsymbol{x}(t)=[x_1(t)\quad x_2(t)\quad\cdots\quad x_M(t)]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{s}(t)=[s_1(t)\quad s_2(t)\quad\cdots\quad s_D(t)]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{n}(t)=[n_1(t)\quad n_2(t)\quad\cdots\quad n_M(t)]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{A}=[\boldsymbol{a}(\theta_1,\beta_1)\quad\boldsymbol{a}(\theta_2,\beta_2)\quad\cdots\quad\boldsymbol{a}(\theta_D,\beta_D)]$$

且 $\boldsymbol{a}(\theta_i,\beta_i)\quad(i=1,2,\cdots,D)$ 定义为

$$\boldsymbol{a}(\theta_i,\beta_i)=\begin{bmatrix}\exp[\mathrm{j}\mu_i\cos(\theta_i-\gamma_1)]\\ \exp[\mathrm{j}\mu_i\cos(\theta_i-\gamma_2)]\\ \vdots\\ \exp[\mathrm{j}\mu_i\cos(\theta_i-\gamma_M)]\end{bmatrix} \tag{2}$$

其中，$\mu_i=\sin\beta_i(2\pi r/\lambda)$，$\gamma_n=2\pi(n-1)/M$，$(n=1,2,\cdots,M)$。此时接收信号的协方差矩阵为

$$\boldsymbol{R}=E[\boldsymbol{x}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}]=\boldsymbol{A}\boldsymbol{S}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}+\sigma^2\boldsymbol{I} \tag{3}$$

式中，σ^2 为噪声方差，$\boldsymbol{S}=E[\boldsymbol{s}\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}]$，$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

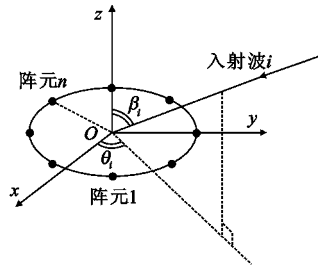


图 1　均匀圆阵阵列结构图
Fig. 1 Structure of uniform circular array

对 $\boldsymbol{R}$ 作特征分解，可得特征值 $\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant\cdots\geqslant\lambda_D\geqslant\lambda_{D+1}=\cdots=\lambda_M$。其中，小特征值是由噪声贡献的，由其对应的特征向量张成了噪声子空间 $\boldsymbol{E}_N$；由前 D 个大特征值对应的特征向量张成了信号子空间 $\boldsymbol{E}_S$。

由于信号子空间 $\boldsymbol{E}_S$ 与噪声子空间 $\boldsymbol{E}_N$ 正交，可得标准 MUSIC 算法谱函数公式为

$$P(\theta,\beta)=\frac{1}{\|\boldsymbol{E}_N^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta,\beta)\|_2^2} \tag{4}$$

$P(\theta,\beta)$ 的峰值对应的方向即为信号源方向。

2.2　稳定分布与几何信噪比（Geometric SNR）

稳定分布一般由其特征函数 $E[\mathrm{e}^{i\theta X}]$ 给出[6]：

$$E[\mathrm{e}^{i\theta X}]=\exp\{i\mu\theta-\gamma\ |\theta|^{\alpha}[1-i\beta\mathrm{sgn}(\theta)\omega(t,\alpha)]\} \tag{5}$$

式中，α 为特性参数（$0<\alpha\leqslant 2$），决定分布的拖尾程度，$\alpha=1$ 时 $\omega(t,\alpha)=(2\ln|\theta|)/\pi$，$\alpha\neq 1$ 时 $\omega(t,\alpha)=\tan(\alpha\pi/2)$；$\mu$ 为位置参数（$-\infty<\mu<\infty$），表示分布的中值或均值；γ 为尺度参数（$\gamma>0$），描述分布的分散程度；β 为对称参数（$-1\leqslant\beta\leqslant 1$），确定分布的斜度，当 $\beta=0$ 时称为对称 α 稳定分布（简记为 SαS）。

对于任意服从 α 稳定分布的随机变量 X，当 $0<\alpha<2$ 时，满足

$$E[\ |X|^p]<\infty,\quad 0\leqslant p<\alpha \tag{6}$$
$$E[\ |X|^p]=\infty,\quad \alpha\leqslant p \tag{7}$$

当 $\alpha=2$ 时，SαS 分布为高斯分布，此时有

$$E[\ |X|^p]<\infty,\quad 0\leqslant p \tag{8}$$

由于 α 稳定分布噪声不存在有限的二阶矩，因此通常采用几何信噪比（GSNR）设定信号与噪声的功率比[7]：

$$GSNR=\sigma_s^2/(C_g S_0^2) \tag{9}$$

式中 $C_g=\exp\{C_e\}\approx 1.78$，$\sigma_s^2$ 是信号功率，$S_0=\exp\{E[\lg|X|]\}$ 是 SαS 噪声的几何功率。

2.3　稳定分布噪声环境下的 DOA 估计

对于服从 α 稳定分布的随机变量（$0<\alpha<2$），一般不具有有限方差，因而不能用基于方差或二阶统计量有限的假设进行信号处理，故而基于二阶统计量的 MUSIC 算法不再适用，通常利用分数低阶矩（FLOM）进行分析处理。

定义：对于联合 SαS 分布的随机变量 X 和 Y，其特征指数（$0<\alpha\leqslant 2$），则定义 X 和 Y 的分数低阶协方差（FLOC）为[8]

$$\mathrm{FLOC}(X,Y)=E[X^{<a>}Y^{<b>}],0\leqslant a\leqslant\frac{\alpha}{2},0\leqslant b\leqslant\frac{\alpha}{2} \tag{10}$$

式中运算< · >的含义为

$$z^{<p>}=|z|^{p-1}z^{*} \tag{11}$$

文献[3]提出的 FLOM-MUSIC 算法用 FLOM 矩阵代替 MUSIC 算法的协方差矩阵进行 DOA 估计,取得了较好的效果。在此基础上,其他学者又提出了 PFLOM-MUSIC[9]、数据加权分数低阶 DOA[10]等算法,有效改善了经典 MUSIC 算法的性能。但由于这些算法必须先估计出特性参数 α,故而影响了其应用。

文献[4]提出了一种空间时频多重信号分类 TF-FLOM-MUSIC 算法,该算法在 Wigner-Ville 分布(WVD)的基础上,定义了 $x(t)$ 的分数低阶矩空间时频分布矩阵(FLOM-STFDM)$\boldsymbol{Z}(t,f)=\{\boldsymbol{Z}_{ij}(t,f)\}$ $(i,j=1,2,\cdots,M)$,其中,

$$\boldsymbol{Z}_{ij}(t,f)=\sum_{\tau=-(N-1)/2}^{(N-1)/2}[x_i(t+\tau)]^{<P>}[x_j(t-\tau)]^{-<P>}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}4\pi f\tau} \tag{12}$$

式中,$x_i(t)$ 和 $x_j(t)$ 表示第 i 个和第 j 个接收信号,N 为数据矩形窗的长度,$0<P<\alpha\leqslant 2$。TF-FLOM-MUSIC 算法用 FLOM-STFDM 代替协方差矩阵进行 DOA 估计,取得了比 FLOM-MUSIC 等算法更好的估计效果。但是该算法不仅需要估计出特性参数 α,而且计算复杂度较高,限制了其实际应用。

为了克服特性参数估计带来的不利影响,文献[5]提出了一种基于广义类相关熵的 MUSIC 算法,该算法定义了 SαS 分布随机变量 X 和 Y 的广义类相关熵(GCAS)

$$R_G=E\left\{\exp\left[-\frac{(aX-bY)^2}{2\sigma^2}\right]XY\right\} \tag{13}$$

式中,σ 为核长,a、b 为正常数。

GCAS-MUSIC 算法用基于 GCAS 的矩阵代替协方差矩阵进行 DOA 估计,在较低信噪比条件下得到高精度的 DOA 估计,但是该算法仍然存在计算复杂度较高的问题。

3 基于非线性压缩核函数的 DOA 估计

3.1 非线性压缩核函数及其性质

随机变量 X 和 Y 同服从参数为 α 的 SαS 分布 $(1<\alpha\leqslant 2)$ 且 $\mu=0$,定义其非线性压缩核(Nonlinear Compress Core,NCC)函数

$$f(X,Y)=\frac{XY^*}{|XY|+\sigma^2} \tag{14}$$

式中,Y^* 为 Y 的共轭,实常数 $\sigma\geqslant 1$ 为尺度因子。

命题 1:基于 NCCF 的二阶统计量是有界的,且

$$E\left|\frac{XY^*}{|XY|+\sigma^2}\right|\leqslant E|X^{<1/2>}Y^{<1/2>}| \tag{15}$$

式中,符号 $X^{<p>}=|X|^{p-1}X^*$。

证明:假设随机变量 X 和 Y 的联合概率密度函数为 $p(x,y)$,则

$$E\left[\frac{XY^*}{|XY|+\sigma^2}\right]=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{xy^*}{|xy|+\sigma^2}p(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{16}$$

$$E[X^{<1/2>}Y^{<1/2>}]=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{x|x|^{1/2}}{|x|}\frac{y|y|^{1/2}}{|y|}p(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{17}$$

由于联合概率密度函数 $p(x,y)\geqslant 0$,若在定义域 $-\infty<x,y<\infty$ 内

$$w(x,y)\triangleq\frac{xy}{|xy|+\sigma^2}\leqslant\frac{x|x|^{1/2}y|y|^{1/2}}{|x|\quad|y|}\triangleq v(x,y) \tag{18}$$

不难发现,函数 $w(x,y)$ 和 $v(x,y)$ 具有如下对称特性:

$$w(-x,y)=w(x,-y)=-w(x,y)$$
$$v(-x,y)=v(x,-y)=-v(x,y) \tag{19}$$

$$w(x,y)=w(-x,-y),\quad v(x,y)=v(-x,-y) \tag{20}$$

又由于

$$v(x,y)=\frac{x}{|x|}|x|^{1/2}\frac{y}{|y|}|y|^{1/2}=\frac{xy}{|xy|^{1/2}} \tag{21}$$

根据函数 $w(x,y)$ 和 $v(x,y)$ 的对称特性,若要式(18)成立,仅需证明 $0\leqslant x,y<\infty$ 时下式成立:

$$\frac{xy}{|xy|+\sigma^2}\leqslant\frac{xy}{|xy|^{1/2}} \tag{22}$$

显然,$x=y=0$ 时等号成立;$0<x,y<\infty$ 时上式等价于

$$\frac{xy}{xy+\sigma^2}<(xy)^{1/2}\Leftrightarrow\frac{(xy)^{1/2}}{xy+\sigma^2}<1 \tag{23}$$

又由于

$$\frac{(xy)^{1/2}}{xy+\sigma^2}<\frac{(xy)^{1/2}}{xy+1}=\frac{1}{(xy)^{1/2}+(xy)^{-1/2}}<1 \tag{24}$$

故而命题得证。

3.2 基于 NCCF 的 DOA 估计:NCCF-MUSIC 算法

根据式(14)的定义,对于均匀圆阵输出信号 $x(t)$,本文构建了类似于协方差矩阵的基于 NCCF 的有界矩阵 $\boldsymbol{C}_{M\times M}$,其第 i 行第 j 列元素 C_{ij} 可表示为

$$C_{ij}=E\left[\frac{x_i(t)x_j^*(t)}{|x_i(t)x_j^*(t)|+\sigma^2}\right] \tag{25}$$

式中 $x_i(t)$ 和 $x_j(t)$ 分别表示接收信号矢量的第 i 个和第 j 个信号,则其估计值为

$$\hat{C}_{ij}=\frac{1}{L}\sum_{k=1}^{L}\frac{x_i(k)x_j^*(k)}{|x_i(k)x_j^*(k)|+\sigma^2} \tag{26}$$

其中,$x_i(k)$ 和 $x_j(k)$ 分别为 $x_i(t)$ 和 $x_j(t)$ 的采样数据,L 为快拍数。

根据命题 1 的证明可知,$\boldsymbol{C}_{M\times M}$是有界的。因此,类似于 MUSIC 算法中的协方差矩阵,基于 NCCF 的矩阵$\boldsymbol{C}_{M\times M}$同样可进行特征值分解(EVD),形成信号子空间和噪声子空间,从而可以应用于 DOA 估计。NCCF-MUSIC 波达方向估计算法流程如下:

步骤 1:根据式(22),以时间平均替代统计平均,计算 L 点数据的估计值 $\hat{C}_{ij}$,形成矩阵$\hat{\boldsymbol{C}}_{M\times M}$;

步骤 2:对$\hat{C}_{M\times M}$做特征值分解(EVD),构造 $M\times(M-P)$ 矩阵 $\hat{\boldsymbol{E}}_N \triangleq [\hat{\boldsymbol{e}}_{P+1} \quad \hat{\boldsymbol{e}}_{P+2} \quad \cdots \quad \hat{\boldsymbol{e}}_M]$,其中$\hat{\boldsymbol{e}}_{P+1}$,$\hat{\boldsymbol{e}}_{P+2}$,…,$\hat{\boldsymbol{e}}_M$ 为对应于矩阵$\hat{\boldsymbol{C}}_{M\times M}$的$(M-P)$个最小的奇异向量;

步骤 3:按照式(9),计算 NCCF-MUSIC 谱(其中$\boldsymbol{E}_N$ 以估计值$\hat{\boldsymbol{E}}_N$ 替代):

$$\hat{P}_{\text{NCCF-MUSIC}}(\theta,\beta)=\frac{1}{\|\hat{\boldsymbol{E}}_N^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta,\beta)\|_2^2}$$

式中,$0\leqslant\theta\leqslant 2\pi$,$0\leqslant\beta\leqslant\pi/2$;

步骤 4:选择 $\hat{P}_{\text{NCCF-MUSIC}}(\theta,\beta)$ 的局部峰值 $\hat{p}_1$,$\hat{p}_2$,…,$\hat{p}_P$ 作为 DOA 估计值。

4　仿真实验与结果对比

设定接收阵列为阵元个数 $M=8$ 的均匀圆阵,阵元半径为 $r=\lambda/2(\lambda=c/f_c)$。利用 MATLAB,设定几何信噪比 $GSNR=20$ dB,快拍数 $L=2\,048$,尺度因子 $\sigma^2=64$,SαS 噪声的特性参数 $\alpha=1.5$;产生 4 路发送信号 $s_i(t)=\cos(\omega_c t+\sin\omega_i t)$,其中载波频率为 $f_c=7$ MHz,$f_1=100$ kHz,$f_2=200$ kHz,$f_3=300$ kHz和 $f_4=500$ kHz。将 4 路信号分别从不同的方向$(\theta_1,\beta_1)=(50°,15°)$,$(\theta_2,\beta_2)=(130°,40°)$,$(\theta_3,\beta_3)=(200°,55°)$和$(\theta_4,\beta_4)=(315°,70°)$进入阵列,图 2 给出了 NCCF-MUSIC 算法的仿真结果。

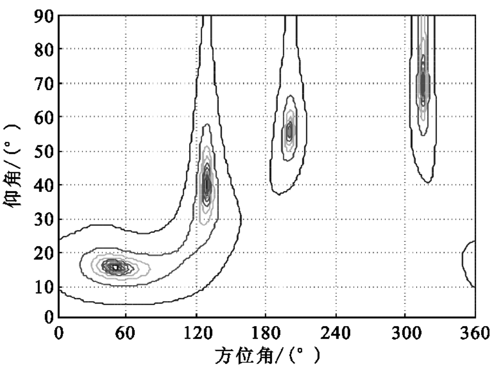


图 2　基于 NCCF-MUSIC 算法的谱估计
Fig. 2 Spectrum estimation based on NCCF-MUSIC method

4.1　不同噪声特性对算法的影响

定义 DOA 估计的准确匹配率为

$$\text{准确匹配率}(\%)=\frac{\text{正确识别 DOA 次数}}{\text{总仿真实验次数}}\times 100\% \qquad (27)$$

在发射信号和阵列结构不变的情况下,设定 $L=2\,048$,$\sigma^2=64$,改变 SαS 脉冲噪声的特性参数($\alpha=1.0\sim2.0$),在 $GSNR=10$ dB和20 dB条件下,利用 MATLAB 对 NCCF-MUSIC、GCAS-MUSIC、FLOM-MUSIC 和 TF- FLOM-MUSIC 算法独立进行 400 次蒙特卡罗仿真实验,各种算法的匹配分值结果如图 3 所示。

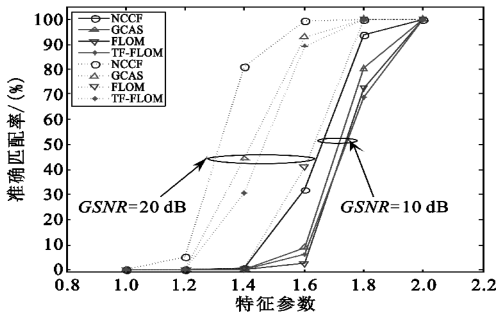


图 3　不同噪声特性与几何信噪比下各种 DOA 估计匹配率比较
Fig. 3 Comparison of the matching scores among different DOA methods under different noises and GSNR

定义多个信号 DOA 估计的混合均方误差为

$$\sigma_{\text{MSE}}^2=\frac{1}{2D}\left[\sum_{i=1}^{D}\hat{\sigma}_{\theta_i}^2+\sum_{i=1}^{D}\hat{\sigma}_{\beta_i}^2\right] \qquad (28)$$

$$\hat{\sigma}_{\theta_i}^2=\frac{1}{M}\left[\sum_{k=1}^{M}(\hat{\theta}_{i,k}-\theta_i)^2\right] \qquad (29)$$

$$\hat{\sigma}_{\beta_i}^2=\frac{1}{M}\left[\sum_{k=1}^{M}(\hat{\beta}_{i,k}-\beta_i)^2\right] \qquad (30)$$

式中,D 为信源个数,M 为仿真实验次数;$\hat{\theta}_{i,k}$为第 i 个信源第 k 次关于方位角 θ_i 的估计值,$\hat{\sigma}_{\theta_i}^2$为 θ_i 的均方误差估计值;$\hat{\beta}_{i,k}$为第 i 个信源第 k 次关于俯仰角 β_i 的估计值,$\hat{\sigma}_{\beta_i}^2$为 β_i 的均方误差估计值。

根据式(23)计算 DOA 估计的混合均方误差,进而可得其标准方差 $\sigma_{\text{MSE}}=\sqrt{\sigma_{\text{MSE}}^2}$,图 4 给出不同了条件下各种算法的标准方差 σ_{MSE}。

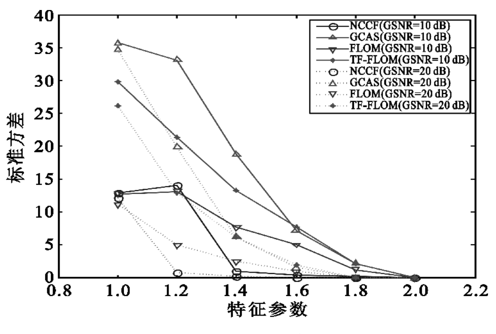


图 4　不同噪声特性下 DOA 估计误差的性能比较
Fig. 4 Comparison of the standard deviation among different DOA methods under different noises and GSNR

从仿真结果可以看出,在不同信噪比和噪声环境下,NCCF-MUSIC 算法的 DOA 估计在准确率和稳定性方面都明显优于其他算法。

4.2 快拍数对算法的影响

设定 SαS 脉冲噪声的特性参数 $\alpha=1.6$,$GSNR=20$ dB,在不同的快拍数下对各种 DOA 算法性能进行了比较。其中,各种算法的匹配分值结果如图 5 所示,估计值的标准方差如图 6 所示。结果显示,随着快拍数的增加,NCCF-MUSIC 算法具有更好的稳定性。

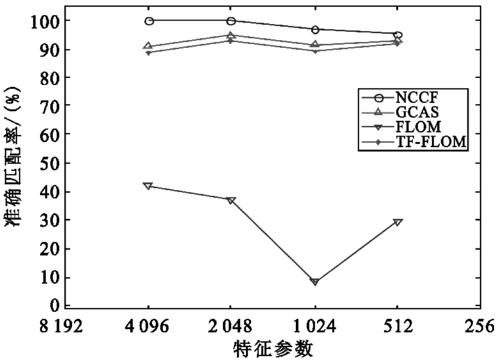


图 5　不同快拍数下各算法的估计准确率

Fig. 5 Comparison of the matching scores among different DOA methods with different number of snapshots

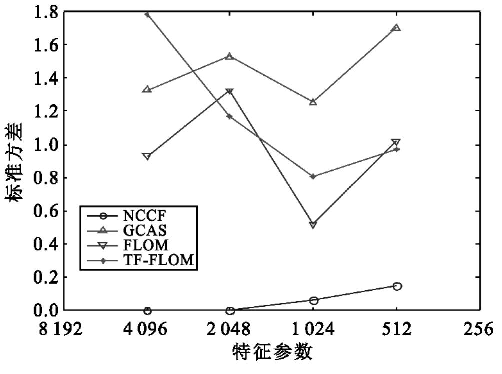


图 6　不同快拍数下各算法估计值的标准方差

Fig. 6 Comparison of the standard deviation among different DOA methods with different number of snapshots

5 总　结

针对脉冲噪声环境下 GCAS-MUSIC、FLOM-MUSIC 和 TF-FLOM-MUSIC 算法中存在的问题,本文提出了一种基于非线性压缩核函数 MUSIC(NCCF-MUSIC)算法。该算法所采用的非线性压缩核函数表达形式简单,易于实现,非常适合实际应用。计算机仿真实验结果表明,NCCF-MUSIC 算法的 DOA 估计准确率优于上述算法,并且具有更好的稳定性,具有进一步实用化的潜力。

参考文献:

[1] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,1986,34(3):276-280.

[2] Song A,Tong Z,Qiu T. A new correntropy based TDE method under α-stable distribution noise environment[J]. Journal of Electronics (China),2011,28(3):284-288.

[3] LIU T H,Mendel J M. A subspace-based direction finding algorithm using fractional lower order statistics[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2001,49(8):1605-1613.

[4] 汪海滨,查代奉,龙俊波. α 稳定分布噪声下的空间时频 DOA 估计[J]. 计算机工程,2012,38(2):284-287.
WANG Hai-bing,ZHA Dai-feng,LONG Jun-bo. Spatial Time-frequency DOA Estimation Under α Stable Distribution Noise[J]. Computer Engineering,2012,38(2):284-287. (in Chinese)

[5] 邱天爽,张金凤,宋爱民,等. 脉冲噪声下基于广义类相关熵的 DOA 估计新方法[J]. 信号处理,2012,28(4):463-466.
QIU Tian-sang,ZHANG Jin-feng,SONG Ai-min,et al. The Generalized Correntropy-Analogous Statistics Based Direction of Arrival Estimation in Impulsive Noise Environments[J]. Journal of Signal Processing,2012,28(4):463-466. (in Chinese)

[6] 李旭涛,朱光喜,王首勇,等. Alpha 稳定分布的参数表征及仿真[J]. 信号处理,2007,23(6):814-817.
LI Xu-tao,ZHU Guang-xi,WANG Shou-yong,et al. Parameterizations and simulation of Alpha stable distribution[J]. Journal of Signal Processing,2007,23(6):814-817. (in Chinese)

[7] Gonzalez J G, Paredes J L, Arce G R. Zero-order statistics:a mathematical framework for the processing and characterization of very impulsive signals[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2006, 54(10):3839-3851.

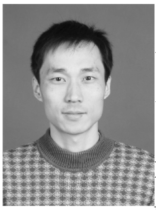
[8] 邱天爽,张旭秀,李小兵,等. 统计信号处理—非高斯信号处理及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,2004:144-145.
QIU Tian-sang,ZHANG Xu-xiu,LI Xiao-bing,et al. Statistics signal processing:non-gaussian signal processing and its application[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2004:144-145. (in Chinese)

[9] Liu Tsung-Hsien,Jerry M M. A Subspace-based Direction Finding Algorithm Using Fractional Lower Order Sta-

tistics [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001,49(8): 1605-1613.

[10] 周祎,冯大政,刘建强,等. 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 Yi, FENG Da-zheng, LIU Jian-qiang, et al. A New Method of DOA Estimation in Symmetric α-Stable Noise Environment [J]. Journal of Signal Processing, 2007,23(2):200-203. (in Chinese)

作者简介:



马金全(1975—),男,甘肃张掖人,2005 年于西安电子科技大学获硕士学位,现为副教授,主要研究方向为信号分析、软件无线电;

MA Jin-quan was born in Zhangye, Gansu Province, in 1975. He received the M. S. degree from Xidian University in 2005. He is now an associate professor. His research concerns signal analysis and software defined radio.

Email: ma7q@ 163. com

葛临东(1946—),男,山东临沂人,教授、博士生导师,主要研究方向为通信信号处理、软件无线电等;

GE Lin-dong was born in Linyi, Shandong Province, in 1946. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns communication signal processing and software defined radio.

Email: ge_lindong@ 163. com.

童　莉(1978—),女,湖北荆州人,博士,讲师,主要研究方向为信号分析与信息处理。

TONG Li was born in Jingzhou, Hubei Province, in 1978. She is now a lecturer with the Ph. D. degree. Her research interests signal analysis and information processing.

Email: tttocean@ 163. com.

本刊 2013 年度下载量前 10 位论文

序号	第一作者	论文题名	发表信息	下载量
1	刘天华	民用飞机数据链通信管理技术	2010,50(5):84-88	12886
2	刘红甫	MPEG-4 AAC 音频编码中量化模块的改进	2012,52(4):534-538	1413
3	郭　彬	八天线 TD-LTE 系统的波束赋形算法分析	2010,50(8):41-45	1100
4	李瑞欣	基于 SCPS 协议的快速自组织可重构天基信息网组网	2010,50(7):6-10	998
5	龚文斌	一种新型宽阻 2011,51(10):带管状带通滤波的设计	2011,51(10):99-103	932
6	樊　迅	TD-LTE 系统中基于奇异值分解的高效波束赋形方法	2010,50(8):46-51	895
7	赵国艳	电子战条件下航天遥测系统设计的思路与建议	2010,50(4):20-23	883
8	张　雷	TDD 系统中非理想互易条件下双流波束赋形的容量分析	2010,50(8):30-35	737
9	杨淑媚	基于承载网的 IEEE158 时间同步能力分析验证	2011,51(4):93-97	731
10	钟　杰	星载 AIS 接收冲突分析及仿真	2010,50(10):6-11	714

(数据来源:www. teleonline. cn,统计截止日期:2013 年 12 月 25 日)

本刊编辑部