DOI: 10. 13382/j. jemi. B2307042

基于二次分数低阶协方差的时延估计方法*

刘小松[1]　徐再祥[1]　单泽彪[1,2]　徐恩达[1]　吕　悦[1]
(1. 长春理工大学电子信息工程学院　长春　130022;2. 长春气象仪器研究所　长春　130102)

摘　要:针对强脉冲噪声背景下基于分数低阶统计量时延估计方法性能退化且需要噪声先验知识的问题,提出了一种基于二次分数低阶协方差的时延估计新方法。所提方法首先利用有界非线性 Sigmoid 函数对含有脉冲噪声的信号进行预处理,使其在不影响有用信号时延信息的基础上对附加脉冲噪声进行充分压缩;然后对处理后的收发信号进行二次分数低阶协方差运算,即求得发射信号的自分数低阶协方差和收发信号的互分数低阶协方差之后,再次计算二者的互分数低阶协方差,以期更大程度上抑制脉冲噪声的影响。通过模拟仿真实验对所提方法进行了有效性验证,结果表明所提方法突破了分数低阶矩阶次需小于 Alpha 稳定分布噪声特征指数的限制,并且比分数低阶协方差方法具有更高的估计精度。仿真实验结果表明在广义信噪比-10 dB 情况下,时延估计用时为 0. 056 0 s,准确率达到 97. 76%。

关键词: 时延估计;脉冲噪声;二次分数低阶协方差;有界非线性函数
中图分类号: TN911　　**文献标识码**: A　　**国家标准学科分类代码**: 460. 40

Time delay estimation method based on second-order fraction low-order covariance

Liu Xiaosong[1]　Xu Zaixiang[1]　Shan Zebiao[1,2]　Xu Enda[1]　Lyu Yue[1]
(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Changchun Meteorological Instrument Research Institute, Changchun 130102, China)

Abstract: In the background of strong impulse noise, the performance of fractional low-order statistics delay estimation method is degraded and the prior knowledge of noise is required. In order to solve the problem, a new time delay estimation method based on second-order fractional low-order covariance is proposed. Firstly, the bounded nonlinear sigmoid function is used to process the signal with impulse noise, so that the additional impulse noise can be fully compressed without affecting the time delay information carried by useful signals. Then, the second-order fractional low-order covariance operation is carried out on the processed signals of receival and transmission, that is, after obtaining the self-fractional low-order covariance of the transmitted signals and the mutual fractional low-order covariance of the received and transmitted signals, the mutual fractional low-order covariance of the two is calculated again, thus, the effect of impulse noise can be further suppressed. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation experiments. The results show that the proposed method is free from the restriction that the fractional low-order covariance index is less than the characteristic index of Alpha stable distribution noise, and has higher estimation accuracy than the fractional low-order covariance method. The simulation experiment results show that under the generalized signal-to-noise ratio of − 10 dB, the delay estimation takes 0. 056 0 s and the accuracy reaches 97. 76%.

Keywords: time delay estimation; impulse noise; second-order fraction low-order covariance; bounded nonlinear function

收稿日期: 2023-11-13　　Received Date: 2023-11-13
* 基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC220390)、吉林省自然科学基金项目(YDZJ202301ZYTS412)、吉林省教育厅科学技术项目(JJKH20240938KJ)、吉林省教育厅产业化培育项目(JJKH20240940CY)资助

0 引　言

时间延迟估计即是确定收发信号之间的传输时间，其是信号处理中一项重要的研究内容，广泛应用于雷达、声纳、无线通信以及各类测距、测风等领域[1-3]。由于环境背景的复杂性接收信号往往被不同程度或类型的噪声及干扰所淹没[4]。因此，时间延迟估计的关键问题就是在抑制背景噪声的前提下对信号的传输时间进行更高精度的估计。

时间延迟估计算法主要有自适应滤波、基于互相关和高阶统计量的时延估计、基于分数低阶统计量的时延估计[5]、基于相关熵的时延估计[6-7]、压缩感知时延估计[8-9]以及采用多重信号分类(multiple signal classification，MUSIC)算法、基于旋转不变技术的信号参数估计(estimating signal parameters via rotational invariance techniques，ESPRIT)算法和加权傅立叶变换与松弛(weighted Fourier transform and relaxation，WRELAX)算法等[10]。常规应用场合进行时延估计时一般假设背景环境噪声服从高斯分布，如文献[11]在超声波测风领域中假设背景噪声为高斯白噪声，采用相关法对超声波信号的传播时间进行测量。理论上相关法对高斯噪声具有较好的抑制效果，但在实际测量过程中发现相关法的时延估计精度还有待提高。于是在高斯噪声背景假设条件下，文献[12-13]在相关法的基础上采用二次相关的时延估计算法并在超声测风领域进行了应用研究。二次相关是在相关法的基础上再次对互相关函数和自相关函数进行互相关处理，进一步对噪声进行了抑制，提高了时间延迟估计的精度。

尽管基于高斯假定的时间延迟估计方法得到了广泛的重视和应用，但在诸如海洋声纳、地震勘探、环境声学、生物医学工程等领域所遇到的背景噪声，往往是非高斯分布的，且伴有显著的尖峰脉冲特性，这种具有脉冲特性的噪声一般称为 Alpha 稳定分布噪声。该类噪声干扰情况下包括二次相关的相关方法或高阶累积量等时延估计方法无法有效的工作、或会出现显著的退化，甚至会导出错误的结果。因此，分数低阶统计量和相关熵类方法成为 Alpha 稳定分布噪声背景下时间延迟估计的两类重要方法[14]。相关熵是通过非线性映射原理，将信号映射到再生核希尔伯特空间(reproducing kemel hibert space，RKHS)进行处理，它具有能够同时反映信号的时间结构和统计特性的特点。经研究表明相关熵对脉冲噪声具有较好的抑制能力，因此，针对相关熵的时延估计人们对其进行了深入的研究，并在基本相关熵理论的基础上进行了拓展，提出了许多改进方法，如循环相关熵[15]、广义相关熵[16]、复相关熵[17]、基于相关熵的自适应滤波[18]等。

分数低阶统计量方法是处理 Alpha 稳定分布噪声背景下时间延迟估计最早且应用最为广泛的一类方法，它具有多种形式，如分数低阶矩、共变和分数低阶相关即分数低阶协方差等方法[14]。其中分数低阶协方差方法比分数低阶矩和共变类方法具有更加优越的性能以及应用过程中更大的灵活性和广泛性，使其成为了分数低级统计量类方法中进行时延估计应用最广的方法。但分数低阶统计量方法的最大问题就是分数低阶矩的阶次需小于 Alpha 稳定分布噪声特征指数的限制，这就要求提前确知 Alpha 稳定分布噪声特征指数这一先验信息。文献[19]提出一种在分数低阶协方差基础上，进行幂变换、白化处理及匹配滤波的时延估计方法。该方法提高了信噪比、降低了时延估计误差，但是在 Alpha 稳定分布噪声特征指数较低时其性能有所不足。文献[20]提出一种在分数低阶协方差谱的基础上加入经验参数的时延估计方法。该方法虽然提高了时延估计的精度，但同样存在强脉冲噪声情况下性能恶化的问题。文献[21]提出将有界非线性 Sigmoid 函数与分数阶傅里叶变换相结合的一种可调 Sigmoid 分数阶功率谱密度参数估计方法。该方法通过引入有界非线性 Sigmoid 函数对接收信号进行预处理，有效提高了脉冲噪声背景下线性调频信号的参数估计精度。

为解决分数低阶矩阶次需小于 Alpha 稳定分布噪声特征指数的限制问题，并进一步提高低信噪比或噪声冲击特性较强时时延估计的精度，本文提出了一种 Alpha 稳定分布噪声背景下基于二次分数低阶协方差的时延估计方法。所提方法首先利用有界非线性 Sigmoid 函数对含有 Alpha 稳定分布噪声的信号进行处理，使其在不影响有用信号携带信息的基础上对附加 Alpha 稳定分布噪声进行充分压缩；然后对处理后的收发信号进行二次分数低阶协方差运算，即求得发射信号的自分数低阶协方差和收发信号的互分数低阶协方差之后，再次计算二者的互分数低阶协方差，得到二次分数低阶协方差函数，对其进行峰值检测即可求得延迟时间。文中最后通过模拟仿真实验对所提方法的有效性进行了验证。

1 时延估计信号模型

在超声波测距、测风等领域实质上是对超声波传播时间进行测量。超声波发射信号模型可表示为：

$$x(t) = s(t) + n_x(t) = A\mathrm{e}^{-kt^2}\cos[\omega(t) + \varphi] + n_x(t) \tag{1}$$

式中：A 表示发射信号幅度，k 表示高斯系数，ω 表示角频率，φ 表示初始相位，$n_x(t)$ 表示发射信号附加噪声。

超声波接收信号表示为：

$$y(t)=s(t-D)+n_y(t)=B\mathrm{e}^{-k(t-D)^2}\cos[\omega(t-D)+\varphi]+n_y(t) \tag{2}$$

式中：B 表示接收信号幅度，D 表示为待估计的延迟时间，$n_y(t)$ 表示接收信号附加噪声。

2 有界非线性 Sigmoid 函数变换特性分析

有界非线性函数(bounded nonlinear function, BNF)是能够抑制 Alpha 稳定分布噪声的一类非线性函数[22]，其数学表达式为：

$$g(x)=\begin{cases}f(x),x \geqslant x_0\\ l(x),-x_0<x<x_0\\ f(x),x \leqslant -x_0\end{cases} \tag{3}$$

式中：x_0 为任意正值；$f(x)$ 和 $l(x)$ 为奇函数且 $f(x)$ 有界。

常用的有界非线性函数为 Sigmoid 函数，其定义如式(4)所示。

$$\mathrm{Sigmoid}[x(t)]=\frac{2}{1+\mathrm{e}^{[-\lambda x(t)]}}-1 \tag{4}$$

式中：λ 表示倾斜系数。

针对 $S\alpha S$ (symmetric α stable)分布噪声，Sigmoid 变换具有如下性质：

性质 1：当信号 $x(t)$ 为 $S\alpha S$ 分布，且其位置参数 $a=0$ 时，Sigmoid$[x(t)]$ 仍为 0 均值的对称分布。

性质 2：当信号 $x(t)$ 为 $S\alpha S$ 分布，其位置参数 $a=0$ 且分散系数 $\gamma>0$ 时，$\|\mathrm{Sigmoid}[x(t)]\|_\alpha>0$ 且，Sigmoid$[x(t)]$ 的均值为 0。

性质 3：当信号 $x(t)$ 为 $S\alpha S$ 分布，且其位置参数 $a=0$ 时，Sigmoid$[x(t)]$ 均值为 0 且具有有限的二阶统计量。

根据上述性质，可得出在进行时延估计时采用 Sigmoid 变换的如下定理。

定理：令 $X(t)=\mathrm{Sigmoid}[x(t)]$，则 $X(t)$ 具有与信号 $x(t)$ 相同的时间延迟。

证明：令 $y(t)=x(t-\tau)$，则：

$$X(t-\tau)=\mathrm{Sigmoid}[x(t-\tau)]=\frac{2}{1+\mathrm{e}^{[-\lambda x_1(t-\tau)]}}-1=\frac{2}{1+\mathrm{e}^{[-\lambda y(t)]}}-1=Y(t) \tag{5}$$

即知 $x(t)$ 与 $y(t)=x(t-\tau)$ 的时间延迟和 $X(t)$ 与 $Y(t)=X(t-\tau)$ 的时间延迟相同，说明 Sigmoid 变换未改变信号的时延信息。

3 时延估计算法描述与分析

3.1 分数低阶协方差时延估计

信号 $x(t)$ 与 $y(t)$ 之间的分数低阶协方差定义为：

$$R_d(\tau)=\mathrm{E}[(x(t))^{\langle P_1\rangle}(y(t+\tau))^{\langle P_2\rangle}] \\ 0 \leqslant P_1<\alpha/2, 0 \leqslant P_2<\alpha/2 \tag{6}$$

式中：P_1, P_2 分别为 $x(t)$ 和 $y(t+\tau)$ 的分数低阶阶次。

实际应用中常使用的是分数低阶协方差的样本估计式为

$$\hat{R}_d(m)=\frac{\sum_{n=L_1+1}^{L_2}|y(n)|^{P_1}|x(n+m)|^{P_2}\mathrm{sgn}(y(n)x(n+m))}{L_2-L_1} \tag{7}$$

式中：L_2-L_1 表示离散样本数量。$\mathrm{E}\{\hat{R}_d(m)\}=C_d\delta(m+D)$，其中 C_d 为非负常数，则时延信息可通过下式求解得到

$$\hat{D}=-\arg\max_m \hat{R}_d(m) \tag{8}$$

3.2 二次分数低阶协方差时延估计

基于二次分数低阶协方差的时延估计算法流程图如图 1 所示。即首先利用有界非线性 Sigmoid 函数对含有 Alpha 稳定分布噪声的信号进行预处理，然后对得到的自分数低阶协方差函数和互分数低阶协方差函数再次进行互分数低阶协方差计算，最后经峰值检测即可获得信号时延信息。

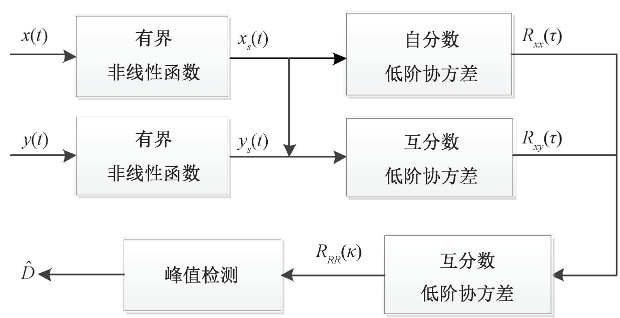


图 1 二次分数低阶协方差时延估计流程图

Fig. 1 Flow chart for time delay estimation based on quadratic fraction low-order covariance

对发射信号 $x(t)$ 进行 Sigmoid 函数变换处理，得

$$x_s(t)=\mathrm{Sigmoid}[x(t)]=\frac{2}{1+\mathrm{e}^{[-\lambda x(t)]}}-1 \tag{9}$$

对接收信号 $y(t)$ 进行 Sigmoid 函数变换处理，得

$$y_s(t)=\mathrm{Sigmoid}[y(t)]=\frac{2}{1+\mathrm{e}^{[-\lambda y(t)]}}-1 \tag{10}$$

图 2 所示为未加噪声和附加 Alpha 稳定分布噪声时的超声波收发信号以及经过有界非线性 Sigmoid 函数变换处理后的信号，为了更加清晰的看出收发信号的时延信息，将广义信噪比设置为 5 dB。从图 2 中可明确的看

出经有界非线性 Sigmoid 函数变换前后，超声波信号的时延信息未发生变化，而附加的 Alpha 稳定分布噪声的冲击特性得到了明显的抑制和压缩。

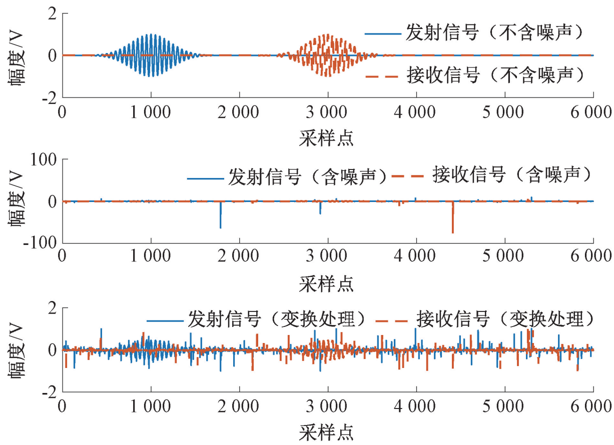


图 2　经非线性 Sigmoid 函数变换前后超声波信号

Fig. 2　Ultrasonic signals before and after nonlinear sigmoid function transformation

进而对经有界非线性 Sigmoid 函数变换处理后的发射信号 $x_s(t)$ 进行自分数低阶协方差运算，得：

$$R_{xx}(\tau)=\mathrm{E}[(x_s(t))^{\langle P_1\rangle}(x_s(t+\tau))^{\langle P_2\rangle}]\quad 0\leqslant P_1<2,0\leqslant P_2<2 \tag{11}$$

同时对经有界非线性 Sigmoid 函数变换处理后的收发信号 $x_s(t)$ 和 $y_s(t)$ 进行互分数低阶协方差运算，得：

$$R_{xy}(\tau)=\mathrm{E}[(x_s(t))^{\langle P_1\rangle}(y_s(t+\tau))^{\langle P_2\rangle}]\quad 0\leqslant P_1<2,0\leqslant P_2<2 \tag{12}$$

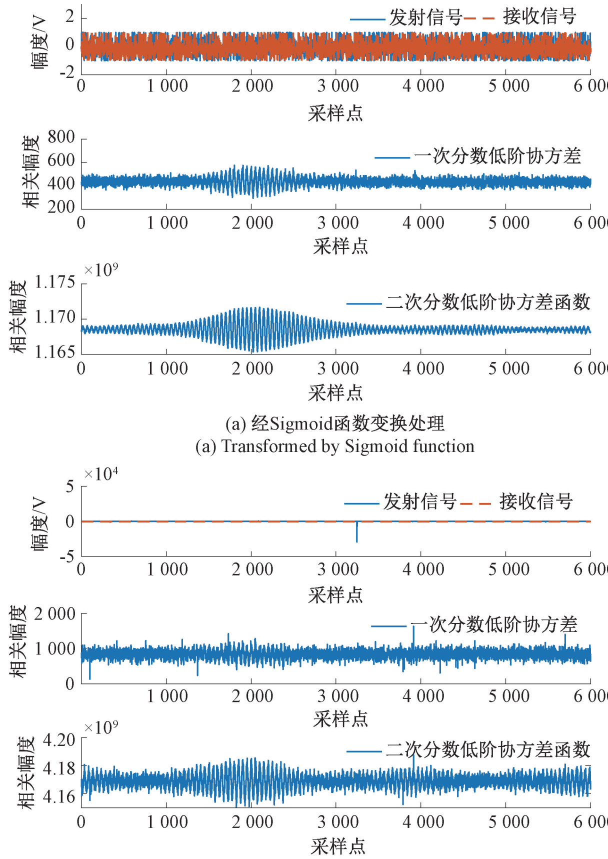
观察式(13)和(14)可知，自分数低阶协方差函数 $R_{xx}(\tau)$ 和互分数低阶协方差函数 $R_{xy}(\tau)$ 均是时延 τ 的函数，可将其看作新的函数，故可再次对其进行分数低阶协方差运算，得二次分数低阶协方差函数为：

$$R_{RR}(\kappa)=\mathrm{E}[(R_{xx}(\tau))^{\langle P_1\rangle}(R_{xy}(\tau+\kappa))^{\langle P_2\rangle}]\quad 0\leqslant P_1<2,0\leqslant P_2<2 \tag{13}$$

同一次分数低阶协方差相类似，式(13)在 $\kappa=D$ 时同样取最大值，故通过求取其最大值即可获得时延估计值，即：

$$D=-\underset{\kappa}{\operatorname{argmax}}R_{RR}(\kappa) \tag{14}$$

图 3 所示为超声波收发信号以及发射信号与接收信号的一次分数低阶协方差和二次分数低阶协方差函数，其中广义信噪比为 -10 dB。其中图 3(a)中的收发信号是经过有界非线性 Sigmoid 函数变换处理后及其进行的一次和二次分数低阶协方差运算，图 3(b)中的收发信号是未经有界非线性 Sigmoid 函数变换处理及其进行的一次和二次分数低阶协方差运算，此为凸显二次分数低阶协方差运算的优越性。



(a) 经Sigmoid函数变换处理
(a) Transformed by Sigmoid function

(b) 未经Sigmoid函数变换处理
(b) Not transformed by Sigmoid function

图 3　二次分数低阶协方差运算

Fig. 3　Quadratic fraction low-order covariance operations

从图 3 中可明显的看出经二次分数低阶协方差运算处理后收发信号的波形比一次分数低阶协方差的更加显著，因此可更加容易的进行峰值检测进而获得时延信息。通过图 3(a)和图 3(b)对照比较，可发现经有界非线性函数处理后的一次及二次分数低阶协方差函数波形比未经有界非线性函数处理后的更加陡峭，说明其抑制噪声的能力较强，进而峰值检测更加容易以致时延估计精度可以更高。

4　仿真验证与分析

采用超声波时延估计高斯信号模型，超声波中心频率为 40 kHz，高斯系数 $k=1\times10^9$，收发信号幅度为 $B=0.8A$。附加噪声为 Alpha 稳定分布噪声，信噪比为信号功率与噪声分散系数之比的广义信噪比，即：

$$G_{\mathrm{SNR}}=10\lg(\sigma_s^2/\gamma) \tag{15}$$

式中：σ_s^2 表示信号平均功率，γ 表示分散系数。

时延估计均方根误差(root mean square error,

RMSE)与时延估计准确率分别定义为:

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{N_0}\sum_{n=1}^{N_0}\left[\hat{D}(n)-D\right]^2} \tag{16}$$

$$P=\left[1-\frac{1}{N_0}\sum_{n=1}^{N_0}\left(\frac{|\hat{D}(n)-D|}{D}\right)\right]\times 100\% \tag{17}$$

式中:N_0 为估计总次数,$\hat{D}$ 为第 n 次时延估计值。

实验 1:可行性验证实验。设置超声波信号传播时间即时间延迟为 0.2 ms,附加噪声为 Alpha 稳定分布噪声,其特征指数为 $\alpha=1$,分数低阶协方差阶次为 $P_1=P_2=1.2$,倾斜系数分别设置为 $\lambda=0.5$,$\lambda=1$,$\lambda=1.5$。在广义信噪比 $G_{\mathrm{SNR}}=0$ dB 条件下针对不同倾斜系数 λ 分别进行 25 次独立实验的结果如图 4 所示。观察图 4 可知,针对不同倾斜系数 λ,时间延迟估计的偏差均较小,估计值与实际值基本吻合,说明估计结果对倾斜系数并不敏感,在以下仿真实验中倾斜系数均设置为 $\lambda=1$。

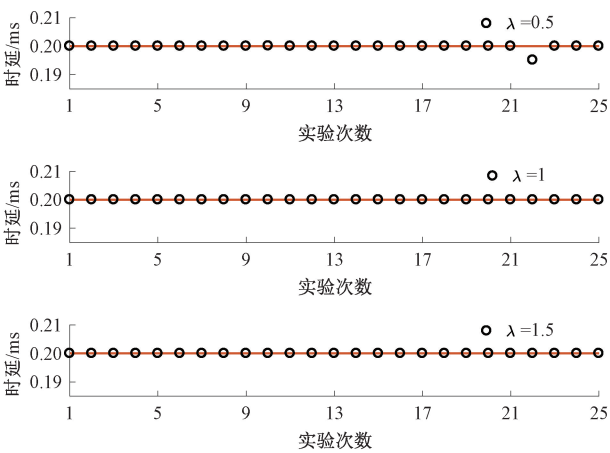


图 4　时间延迟估计结果

Fig. 4　Time delay estimation results

实验 2:不同信噪比条件下本文研究方法时延估计均方根误差对比实验。将本文所研究算法:经有界非线性 Sigmoid 函数变换处理的一次分数低阶协方差方法(简称一次算法)、经有界非线性 Sigmoid 函数变换处理的二次分数低阶协方差方法(简称二次算法)以及未经有界非线性 Sigmoid 函数变换处理的一次和二次分数低阶协方差方法进行性能对比,验证所提方法的优越性。实验条件如同实验 1,其中广义信噪比设置为-15~5 dB,通过 1 000 次蒙特卡罗实验得到的时延估计均方根误差曲线如图 5 所示。

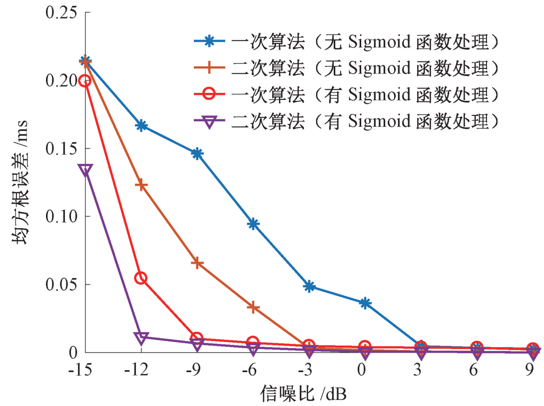


图 5　不同信噪比条件下时延估计均方根误差

Fig. 5　RMSE of time delay estimation versus SNR

由图 5 可知,经有界非线性 Sigmoid 函数变换处理后的一次或二次分数低阶协方差方法的均方根误差均比未经有界非线性 Sigmoid 函数变换处理的要小,说明通过有界非线性 Sigmoid 函数变换处理有效压制了 Alpha 稳定分布噪声的冲击特性,提高了后续的一次或二次分数低阶协方差的韧性和估计精度。同时,在经有界非线性 Sigmoid 函数变换处理与否的前提下,二次分数低阶协方差方法比一次分数低阶协方差方法的均方根误差要小,尤其是信噪比较低时,同样说明了二次分数低阶协方差方法比一次分数低阶协方差算法具有更高的噪声抑制能力和时延估计精度。

实验 3:本文研究方法运算时间及准确率对比实验。将本文所研究算法:经有界非线性 Sigmoid 函数变换处理的一次和二次分数低阶协方差方法、未经有界非线性 Sigmoid 函数变换处理的一次和二次分数低阶协方差方法进行运算时间和时延估计准确率对比实验。实验条件如同实验 1,其中广义信噪比为-10 dB。实验电脑为 i7-10750H CPU@ 2.60 GHz,内存为 16 G,Win10 64 位操作系统,MATLAB2020a 版本运行环境。实验结果如表 1 所示。

表 1　运算时间及时延估计准确率

Table 1　Calculation time and time delay estimation accuracy

不同算法	二次算法	一次算法	二次算法	一次算法
	经 Sigmoid 函数变换处理		未经 Sigmoid 函数变换处理	
平均运算时间/s	0.056 0	0.054 6	0.054 9	0.054 1
准确率/%	97.78	93.16	88.76	45.20

从表 1 中可知,是否经有界非线性 Sigmoid 函数变换处理对算法的运算时间影响不大,故在未来工程应用中实时性的影响可忽略不计,但对时延估计的准确率影响较大,说明通过增加 Sigmoid 函数变换处理可有效提高算法的估计精度。同时可知,二次分数低阶协方差方法与一次分数低阶协方差方法相比,运算时间基本相当,即未显著增加算法的计算复杂度,但其有效提高了时延估计

的准确率,说明其对噪声具有更强的抑制能力,充分验证了所提方法的优越性。

实验 4:不同信噪比条件下不同方法时延估计准确率对比实验。将本文所提方法分别与基于相关熵最大值时延估计算法、预白化处理后的加权相关熵谱密度时延估计算法[6]和基于分数低阶统计量的鲁棒时延估计算法进行比较,验证所提方法在不同信噪比条件时的优越性。实验条件如同实验 1,其中广义信噪比设置为-15~5 dB,通过 1 000 次蒙特卡罗实验得到的时延估计成功率对比结果如图 6 所示。

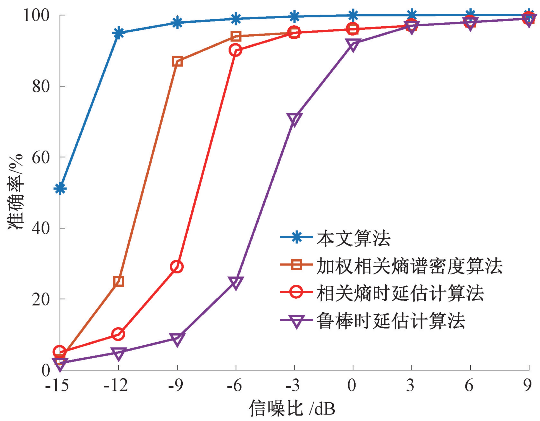


图 6　不同信噪比条件下时延估计准确率

Fig. 6　Accuracy of time delay estimation versus SNR

从图 6 中可以看出,与其他方法相比,所提方法在不同信噪比下均具有更高的估计准确率,尤其是在较低信噪比条件下,所提方法与其他算法相比具有明显的优势,说明所提方法对 Alpha 稳定分布噪声的抑制能力更强,可在更低的信噪比条件下对时间延迟的进行更准确的估计。

实验 5:不同特征指数条件下不同方法时延估计准确率对比实验。将本文所提方法分别与基于相关熵最大值时延估计算法、加权相关熵谱密度算法和基于分数低阶统计量的鲁棒时延估计算法进行比较,验证所提方法在不同 Alpha 稳定分布噪声特征指数条件时的优越性。实验条件如同实验 1,其中广义信噪比为-5 dB,特征指数变化范围从 0~2。时延估计准确率对比结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,与其他方法相比,所提方法在不同特征指数条件下均具有更高的估计准确率,尤其是在特征指数较低时,所提方法的优势更加加明显。此时噪声的特征指数已小于分数低阶矩阶次,说明所提方法不受分数低阶矩阶次需小于噪声特征指数的限制,即说明所提方法无需在噪声先验知识的前提下即可实现对噪声的充分抑制以及获得较高的时延估计精度。当特征指数为 2 时,Alpha 稳定分布噪声退化为高斯噪声,此时所提

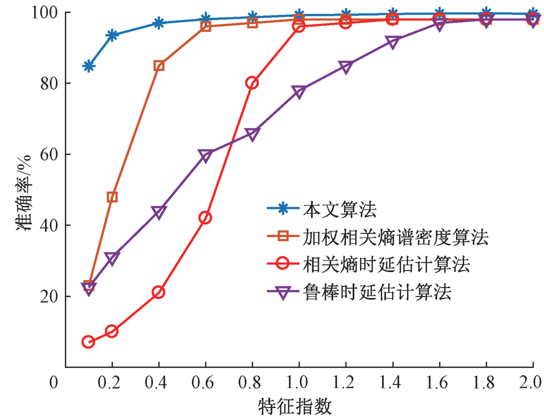


图 7　不同特征指数条件下时延估计准确率

Fig. 7　Accuracy of time delay estimation versus different characteristic parameter

方法的估计准确率接近 100%,说明所提方法在高斯噪声背景下同样是有效的。

5　结　论

针对强脉冲噪声背景下基于分数低阶统计量时延估计方法性能退化且需要噪声先验知识的问题,提出了一种基于二次分数低阶协方差的时延估计新方法。所提方法首先利用有界非线性 Sigmoid 函数对含有脉冲噪声的信号进行处理,然后对处理后的收发信号进行二次分数低阶协方差运算,无需提前确知 Alpha 稳定分布噪声的特征指数,即在分数低阶矩阶次大于或等于特征指数的条件下,仍可实现时延信息的高精度估计。文中首先对二次分数低阶协方差方法进行了详细描述,并通过模拟仿真实验对其进行了有效性和优越性验证,所提出的二次分数低阶协方差与一次分数低阶协方差方法相比运算时间增加有限,但估计精度得到了较大程度的提高。仿真实验结果表明在广义信噪比为-10 dB 情况下,时延估计用时为 0.056 0 s,准确率达到 97.76%,表明所提方法具有较强的噪声抑制能力。

参考文献

[1] WANG W, YANG C H, HAN J, et al. A soft sensor modeling method with dynamic time-delay estimation and its application in wastewater treatment plant [J]. Biochemical Engineering Journal, 2021, 172: 1-9.

[2] 单泽彪, 解晓冉, 刘小松, 等. 互射式三阵元超声波传感器的二次相关测风方法[J]. 电子学报, 2023, 51(9): 2428-2436.

SHAN Z B, XIE X R, LIU X S, et al. Wind measurement with three mutually transmitting ultrasonic sensors based on quadratic correlation method [J]. Acta

Electronica Sinica, 2023, 51(9): 2428-2436.

[3] CANDIDATE M, SETAREHDAN S K. A robust time delay estimation method for ultrasonic echo signals and elastography[J]. Computers in Biology and Medicine, 2021, 136: 1-9.

[4] 单泽彪, 鲁胜麟, 刘小松, 等. 基于高阶累积量的阵列式超声波传感器风速风向测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 279-286.
SHAN Z B, LU SH L, LIU X S, et al. Wind speed and direction measurement of array ultrasonic sensors based on high-order cumulant[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 279-286.

[5] MA X Y, NIKIAS C L. Joint estimation of time delay and frequency delay in impulsive noise using fractional lower order statistics[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(11): 2669-2687.

[6] YU L, QIU T S, SONG A M. A time delay estimation algorithm based on the weighted correntropy spectral density[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2017, 36: 1115-1128.

[7] 邱天爽, 刘浩, 张家成, 等. 一种改进的广义循环相关熵时延估计方法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(2): 255-262.
QIU T SH, LIU H, ZHANG J CH, et al. An improved time delay estimation method based on generalized cyclic correntropy[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2021, 43(2): 255-262.

[8] LI Y M, WANG R D, HU Y L, et al. Defensive compressive time delay estimation using information bottleneck[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2021, 28: 1968-1972.

[9] 强夕竹, 乔钢, 周锋. 一种改进的水声正交频分复用稀疏信道时延估计算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 817-825.
QIANG X ZH, QIAO G, ZHOU F. An improved delay estimation algorithm for underwater acoustic OFDM sparse channel [J] Journal of Electronics and Information Technology, 2021,43(3): 817-825.

[10] SUN M, WANG Y D, BASTARD C L, et al. Signal subspace smoothing technique for time delay estimation using MUSIC algorithm[J]. Sensors, 2017, 17(12): 1-12.

[11] 单泽彪, 刘小松, 鲁胜麟, 等. 基于双阵元超声波接收阵列的风矢量测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 228-234.
SHAN Z B, LIU X S, LU SH L, et al. Wind vector measurement based on double array ultrasonic reception array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 228-234.

[12] 单泽彪, 于渤力, 徐再祥, 等. 基于二次相关的超声波风速风向测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 322-329.
SHAN Z B, YU B L, XU Z X, et al. Ultrasonic wind speed and direction measurement method based on quadratic correlation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(4):322-329.

[13] 单泽彪, 韩明轩, 谢世娟, 等. 基于二次相关的双阵元接收阵列超声波风矢量测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(8): 113-119.
SHAN Z B, HAN M H, XIE SG J, et al. Quadratic correlation-based ultrasonic wind vector measurement of dual-array receiver arrays [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(8): 113-119.

[14] 邱天爽. 相关熵与循环相关熵信号处理研究进展[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 105-118.
QIU T SH. Development in signal processing based on correntropy and cyclic correntropy [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2020, 42(1): 105-118.

[15] FONTES A I R, REGO J B A, DE M MARTINS A, et al. Cyclostationary correntropy: Definition and applications [J]. Expert Systems with Applications, 2017, 69: 110-117.

[16] CHEN B D, XING L, ZHAO H Q, et al. Generalized correntropy for robust adaptive filtering [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(13): 3376-3387.

[17] GUIMARÃES J P F, FONTES A I R, REGO J B A, et al. Complex correntropy: Probabilistic interpretation and application to complex-valued data[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(1): 42-45.

[18] CHEN B D, LIU X, ZHAO H Q, et al. Maximum correntropy Kalman filter[J]. Automatica, 2017, 76: 70-77.

[19] 郑作虎, 王首勇. 复杂海杂波背景下分数低阶匹配滤波检测方法[J], 电子学报, 2016, 44(2): 319-326.
ZHENG Z H, WANG SH Y. Radar target detection method of fractional lower order matched filter in complex sea clutter background[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(2): 319-326.

[20] 黄健, 严胜刚. 分数低阶协方差谱用于改进的时延估计方法[J]. 应用声学, 2017, 36(5): 424-428.
HUANG J, YAN SH G. An improved time delay estimation algorithm based on fractional lower order covariance spectrum [J]. Journal of Applied Acoustics,

2017, 36(5): 424-428.

[21] LI L, YOUNAN N H, SHI X F. A novel parameter estimation method based on a tuneable sigmoid in alpha-stable distribution noise environments [J]. Sensors, 2018, 18(9): 1-25.

[22] 于玲. Alpha 稳定分布噪声环境下韧性时延估计新算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
YU L. Robust time delay estimation algorithms in the presence of Alpha stable distribution noise[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

作者简介

刘小松,2016 年于吉林大学获得博士学位,2022 年博士后出站,现为长春理工大学讲师、硕士生导师,主要研究方向为信息感知与先进控制技术、复杂系统建模、仿真与控制。

E-mail: liuxs@ cust. edu. cn

Liu Xiaosong received a Ph. D. degree from Jilin University in 2016 and a Post Ph. D. degree in 2022. Now she is a lecturer and master supervisor at Changchun University of Science and Technology. Her main research interests include information perception and advanced control technology, modeling, simulation and control of complex systems.

单泽彪(通信作者),2016 年于吉林大学获得博士学位,现为长春理工大学讲师、硕士生导师,长春气象仪器研究所博士后,主要研究方向为弱信号检测,阵列信号处理以及压缩感知技术。

E-mail: zbshan@ cust. edu. cn

Shan Zebiao (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Jilin University in 2016. Now he is a lecturer and master supervisor at Changchun University of Science and Technology, and a Post Ph. D. candidate at Changchun Institute of Meteorological Instruments. His main research interests include weak signal detection, array signal processing and compressed sensing technology.