

脉冲噪声下微弱信号相似度检测方法及应用

祝海宁¹, 刘文红²

(1. 上海电机学院 资产与实验室管理处, 上海 201306; 2. 上海电机学院 电子信息学院, 上海 201306)

摘 要: 实际中采集的信号常常含有脉冲性噪声且信噪比偏低, 这时用相关函数来表示信号之间的相似度时, 会出现精度不高、鲁棒性不强的问题。提出了一种脉冲噪声下微弱信号的相似度检测方法, 即非线性变换法。该方法采用 Alpha 稳定分布描述脉冲噪声信号, 首先将采集的带噪信号进行 Sigmoid 映射, 削弱脉冲噪声对信号相似度检测的干扰; 接着对映射后的信号求取相关函数, 得到信号之间相似度的信息。该方法简洁、计算量小, 没有调整参数, 能较好地减弱脉冲噪声对信号相似度估计的不利影响。该方法可以应用于定位系统中信号到达时差的估计。比较脉冲噪声低信噪比条件下计算机仿真结果显示, 非线性变换相关法的估计精度高于共变法。实验结果表明: 非线性变换相关法不仅可以用于高斯噪声环境下微弱信号相似度的检测, 也可以用于强脉冲噪声环境下信号相似度的检测, 具有较宽的适用范围和较好的鲁棒性。

关键词: 相似度检测; 脉冲噪声; Alpha 稳定分布; 微弱信号; 非线性变换; 时差估计

中图分类号: TN 911.72

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.04.019

Method and Application of Similarity Detection for Weak Signals under Impulse Noise

ZHU Haining¹, LIU Wenhong²

(1. Assets and Laboratories Management Office, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. School of Electronic Information Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In practice, collected signals often contain impulse noise, and have low signal-to-noise ratio. In this case, when the correlation function is used to represent the similarity between signals, problems of low accuracy and robustness will occur. In terms of these problems, a similarity detection method for weaker signals with impulse noise is proposed, i.e., the nonlinear transformation correlation method. In this method, the Alpha stable distribution is adopted to describe the signals with impulse noise. First, Sigmoid mapping is performed on the collected signals with noise to reduce the interference of the pulse noise to the signal similarity detection. Then, the correlation function of the mapped signals is used to obtain the similarity information between the signals. This method is simple, requires a little computation, does not need to adjust parameters, and can effectively reduce the effect of impulse noise on the signal similarity estimation. The method can be applied to the estimation of time difference of arrival (TDOA) for signals in position system. With the comparison of the simulation results of signals at low signal-to-noise ratio with impulse noise, it is known that the estimation accuracy of the nonlinear transformation correlation method is higher than that of the co-variation method. The experimental results show that the nonlinear transform correlation method can be used to detect the weak signal similarity not only in the Gaussian noise environment but also in strong impulse noise environment. It has a wide range of applications and good robustness.

Key words: similarity detection; impulse noise; Alpha stable distribution; weak signal; nonlinear transformation; estimation of time difference

收稿日期: 2020-02-15; 修回日期: 2020-04-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(18AZ04)

作者简介: 祝海宁(1975—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为信息技术与应用。

通信作者: 刘文红(1967—), 女, 博士后, 教授, 主要研究方向为通信理论。

0 引言

导航、工业、通信和医学等诸多领域,都离不开信号处理技术。在信号处理中为了实现信号的检测、识别与提取等,经常要研究两个或多个信号之间的相似性,或一个信号经过传播或处理后与自身的相似性^[1]。相关函数是一种经典和基本的信号相似度的测度,是描述随机信号特征常用和重要的二阶统计量。当带噪信号可以用高斯分布描述时,在一定信噪比条件下,基于信号的相关函数,可以获得隐含在信号中的其他信息,如可以估计信号的到达时差、检测信号的周期性、确定未知参数的线性系统的频域响应、提取噪声中有用信号等^[2]。

在实际中采集的信号总会夹杂一些干扰和/或噪声,有时信噪比也较低。如何削弱干扰或噪声对信号处理方法估计性能的不良影响,在低信噪比条件下提高估计方法的可用性和精确性,是进行信号处理时需要考虑的主要问题之一^[3]。在诸多领域中,采集的信号(如无线电定位信号、设备故障信号、通信信号、诱发电位信号)常常会含有一类具有明显脉冲性的非高斯噪声,此时如果直接采用基于二阶统计量相关函数的传统信号处理方法,算法的估计性能显著退化,甚至不能使用^[4]。为了提高信号相似度检测的精度和鲁棒性,一种思路是对信号进行预处理,如去除异常值(或称为野值)的方法,去掉一些极大值和极小值,但去除多少,去除到什么程度,难以把握,从而影响了其适用范围;还有利用奇异值分解,首先提高信号信噪比的方法,但该方法的计算量开销较大^[5]。另一种思路是在算法本身中,蕴含着对脉冲噪声的抑制作用,如利用共变函数,可以检测含有脉冲噪声的信号的相似度,但这种方法中参数的选取需要估计噪声的脉冲程度或有其先验知识,且在信号比较微弱、信噪比偏低时,算法的鲁棒性变弱^[6]。因此,有必要研究适用范围大、计算量小、较少参数选择的脉冲噪声下微弱信号的相似度估计方法。

本文根据脉冲噪声的特点,用一种广义的高斯分布——Alpha 稳定分布建模,结合神经网络中常用的 Sigmoid 函数的特性,提出一种非线性变换相关法,并应用于定位系统中信号到达时差的估计。理论分析和计算机仿真实验结果表明,该方法具有简洁、计算量小,不需要调整参数,较好地削弱脉冲噪声对信号相似度估计的不利影响等优点。在脉

冲噪声低信噪条件下,与共变法相比,本文提出的方法估计精度更高。该方法不仅可以用于高斯噪声环境下,也可以用于强脉冲噪声环境下的微弱信号相似度的检测,具有较宽的使用范围和较好的鲁棒性。

1 脉冲噪声及 Sigmoid 函数

1.1 脉冲噪声

脉冲噪声指持续时间短、幅度大的不规则尖峰状噪声,通常是突然爆发又很快消失。脉冲噪声一般可分为两类:一类是大气中雷暴产生的电磁脉冲辐射等,是自然噪声;另一类是由高频电器设备如电孤焊、火花系统、电器开关和高压传输线等产生,属于人为噪声。脉冲噪声的主要特点是突发性、幅度大、单个突发脉冲持续期短且相邻突发脉冲间隔较长。脉冲噪声通常具有较宽的频谱,一般从甚低频一直延续到高频。典型的脉冲噪声的时域波形如图 1 所示。

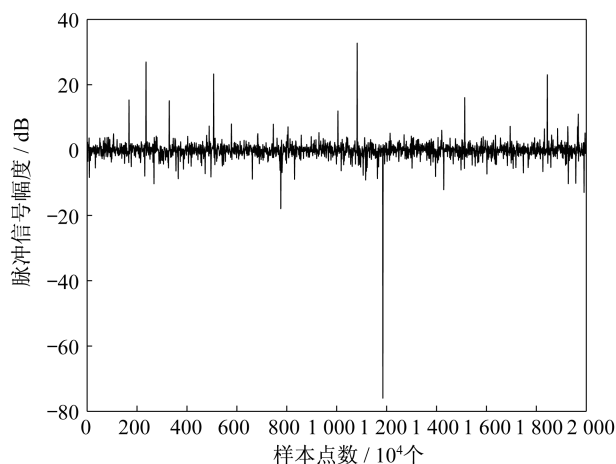


图 1 典型的脉冲噪声的时域波形

Fig.1 Time domain waveform of typical impulse noise

经典的高斯分布不能很好地描述脉冲噪声信号。近年来,一种广义的高斯分布——Alpha 稳定分布被广泛关注和研究,并用于对脉冲噪声信号建模^[7]。根据广义中心极限定理,Alpha 稳定分布是唯一的一类构成独立同分布随机变量之和的极限分布,统计特性可以由其特征函数来描述:

$$\varphi(t) = \exp\{j\mu t - \gamma|t|^\alpha[1 + j\beta\text{sign}(t)\omega(t, \alpha)]\} \quad (1)$$

式中: $\omega(t, \alpha) = \tan(\alpha\pi/2)$, $\alpha \neq 1$; $\omega(t, \alpha) = (2/\pi) \cdot \lg|t|$; $\alpha = 1$ 。

Alpha 稳定分布的特征函数中有 4 个参数: α ($0 < \alpha \leq 2$) 为特征指数, 决定概率密度函数拖尾的厚度, α 值越小, 其拖尾越厚; β ($-1 < \beta < 1$) 为对称参数, 确定概率密度函数的偏斜程度, 当 $\beta = 0$ 时, 称为对称 α 稳定分布, 记为 SaS; γ ($\gamma > 0$) 为分散系数, 度量样本的分散程度; μ ($-\infty < \mu < +\infty$) 为位置参数, 对于 SaS 分布, μ 表示分布的均值或中值。这些参数中, 最重要的为特征指数 $\alpha \in (0, 2]$, 它是脉冲性强弱的一个指示, 其值越小, 信号或噪声的脉冲性越强。当 $\alpha = 2$ 时, Alpha 稳定分布与高斯分布完全相同。因此, 认为高斯分布为 Alpha 稳定分布的特例, Alpha 稳定分布是一种广义的高斯分布, $0 < \alpha < 2$ 的情况称为分数低阶 Alpha 稳定分布。在信号处理中, 使用最多的为参数 $\beta = 0$ 的 SaS, 本文对脉冲噪声用 SaS 建模。信号的信噪比按照 $M_{\text{SNR}} = 10 \lg(\sigma_s^2 / \gamma_v)$ 设定, 其中 σ_s^2 表示源信号的方差, γ_v 表示噪声的分散系数, 高斯噪声时, 分散系数是方差的一半^[6]。

1.2 Sigmoid 函数

Sigmoid 函数是神经网络中一种常用的非线性函数, 它具有光滑、单调有界的特性^[8]。根据含有脉冲噪声的信号的幅度特点, 本文采用如下形式的 Sigmoid 函数:

$$f(x(n)) = \frac{2}{1 + \exp(-x(n))} - 1 \quad (2)$$

该函数具有奇对称性, 可以将任意一个实数映射到 $(-1, 1)$ 的区间, 对较大的值是非线性抑制关系, 对较小的值是线性变换关系。Sigmoid 函数的图像如图 2 所示。

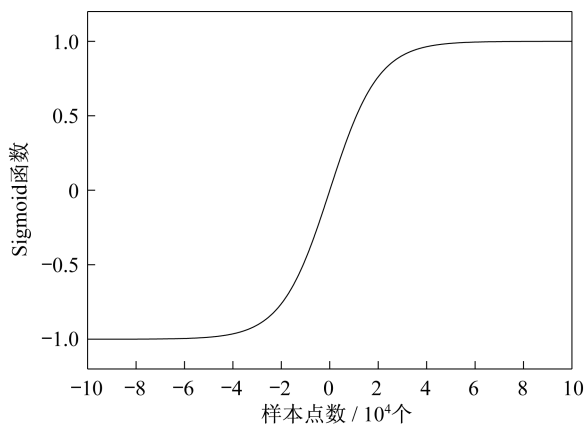


图 2 Sigmoid 函数图像

Fig.2 Graph of the Sigmoid function

在实际中采集到的信号常常会含有脉冲噪声, 对其进行 Sigmoid 映射, 这样不但可以抑制脉冲噪声的干扰, 而且能够保留需要检测信号的原始信息。然后, 再对映射后的信号计算相关函数, 从而得到信号的相似度信息。

2 非线性变换相关法及时差的估计

2.1 非线性变换相关法

本文提出了非线性变换相关法。首先, 基于

$$f(x(n)) = \frac{2}{1 + \exp(-x(n))} - 1$$

函数, 对带噪信号进行 Sigmoid 映射, 这样不但可以抑制脉冲噪声的干扰, 而且能够保留需要检测信号的原始信息。接着再对映射后的信号计算相关函数, 从相关函数的峰值信息得到信号的相似度信息。从统计量的角度考虑, 原始的含有脉冲噪声的信号的二阶矩不存在, 相关函数峰值不能指示信号的相似度, 通过 Sigmoid 非线性映射, 使其变为二阶矩过程, 同时再利用传统的相关函数检测信号的相似度。

对于 $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ 两个信号相似性的检测, 步骤如下:

步骤 1 进行 Sigmoid 映射:

$$\begin{aligned} f(x_1(n)) &= \frac{2}{1 + \exp(-x_1(n))} - 1 \\ f(x_2(n)) &= \frac{2}{1 + \exp(-x_2(n))} - 1 \end{aligned} \quad (3)$$

信号中的脉冲噪声被抑制, 变为二阶矩过程。

步骤 2 求它们的互相关函数:

$$R_{sc}(m) \triangleq E \{ f(x_2(n)) f(x_1(n+m)) \} \quad (4)$$

若给定 N 点信号 $\{x_i(1), \dots, x_i(N); i = 1, 2\}$,

Sigmoid 映射后的互相关函数可以由下式估计出:

$$\hat{R}_{sc}(m) = \frac{\sum_{n=1}^N f(x_2(n)) f(x_1(n+m))}{N} \quad (5)$$

若 $R_{sc}(m)$ 在 $m = D$ 处有明显的最大值, 说明 $x_1(n)$ 与 $x_2(n)$ 有很强的相似性, 而且 $x_2(n)$ 延后 $x_1(n)$ 的时间也可以由 $R_{sc}(m)$ 峰值的位置得到, 表示为

$$\hat{D} = \arg \max_m \hat{R}_{sc}(m) \quad (6)$$

式(6)可以在诸多领域得到应用。

2.2 定位系统中到达时差的估计

定位系统是指以确定空间位置为目标而构成的相互关联的一个集合体或装置(部件)。利用时间差进行定位是定位系统中最常用的一种方法。通过测量信号到达接收端的时间,可以确定信号源的距离。雷达系统根据雷达发射信号与接收到的飞机反射信号之间的时间差,得到飞机位置^[9]。目前,使用最广泛的全球定位系统的基本工作原理是根据测量出已知位置的卫星到用户接收机之间的距离,综合多颗卫星的数据解算出接收机的具体位置。卫星到用户接收机之间的距离是通过时间乘以光速得到的。可见,定位问题本质上是一个时差估计的问题^[10-13],时差估计的精度直接影响着定位的精度^[14]。

接收端接收到的无线电信号,会混入各种噪声,且这些噪声的综合表现往往呈现脉冲性,而且接收到的信号常常也是微弱的。本文提出的非线性变换相关法的使用条件,比较符合此应用场景情况,这是一个信号相似度在信号时延长度的测量中的应用。

下面给出基于非线性变换相关法对定位系统中到达时差的估计过程。

假设需要估计到达时差的两路接收信号的模型如下:

$$\begin{cases} y_1(n) = s(n - D_1) + n_1(n) \\ y_2(n) = gs(n - D_2) + n_2(n) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $s(n)$ 为源信号; D_1, D_2 为两个接收端接收到源信号需要的时间; $0 < g \leq 1$ 为衰减系数(为了简便,通常取 $g = 1$); $n_1(n), n_2(n)$ 分别为 $y_1(n)$ 与 $y_2(n)$ 中的背景噪声。用 SaS 描述背景噪声,信号与噪声是统计独立的,两路噪声也是统计独立的。

在定位系统中,关注的是两个接收端接收到源信号需要的时间差,即 $D = |D_1 - D_2|$ 。利用采集到的 N 信号,下式可以在估计相似度的同时得到时差信息:

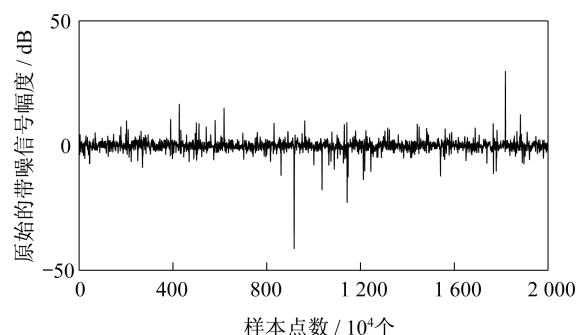
$$\hat{R}_{sc}(m) = \frac{\sum_{n=1}^N f(y_2(n)) f(y_1(n+m))}{N} \quad (8)$$

$\hat{R}_{sc}(m)$ 峰值的位置指示两个接收端接收到的信号 $y_1(n), y_2(n)$ 的到达时间差:

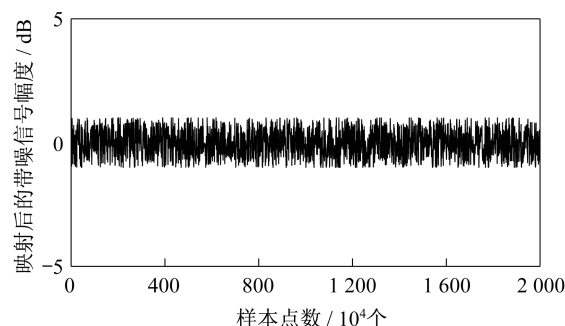
$$\hat{D} = \arg \max_m \hat{R}_{sc}(m)$$

3 计算机仿真实验结果与分析

含有脉冲噪声的信号(混合信噪比 MSNR 为 0)其脉冲特征指数 $\alpha = 1.6$, 归一化带宽为 0.3, 原始信号及其经过 Sigmoid 映射之后的波形如图 3 所示。



(a) 波形为原始带噪 $\alpha=1.6$ 的 SaS 信号



(b) 波形为其经过 Sigmoid 映射后的带噪声信号

图 3 原始信号及经 Sigmoid 映射之后的波形

Fig. 3 Waveforms of signals before and after sigmoid mapping

从图 3 中可以看出,带有脉冲噪声的信号经过 Sigmoid 映射后,去除或抑制了带噪声信号中的尖峰脉冲。

下面以定位系统中到达时差的估计为例,计算机仿真本文提出的非线性变换相关法的估计性能,并与基于共变函数的共变法进行比较。

按照式(6)设定两个接收器接收的信号, $s(n)$ 用白高斯过程信号, $n_1(n), n_2(n)$ 为 SaS 过程噪声,信号与噪声、噪声与噪声之间是不相关的。取样本点 $n = 2000$ 到达时差的真值设定为 $D = 10T_s$, T_s 为采样周期。根据共变函数的性质,在本仿真条件下,共变函数峰值的位置应该在 $n = 1990$ 处。

分别在 $\alpha = 2.0, \alpha = 1.8, \alpha = 1.6, \alpha = 1.4$ 不同脉冲噪声强度情况下,设定混合信噪比 $M_{SNR} = 0$ dB,采用共变法(根据经验取参数 $p = \alpha - 1$)的估计结果(50 次独立的实验),如图 4 所示。

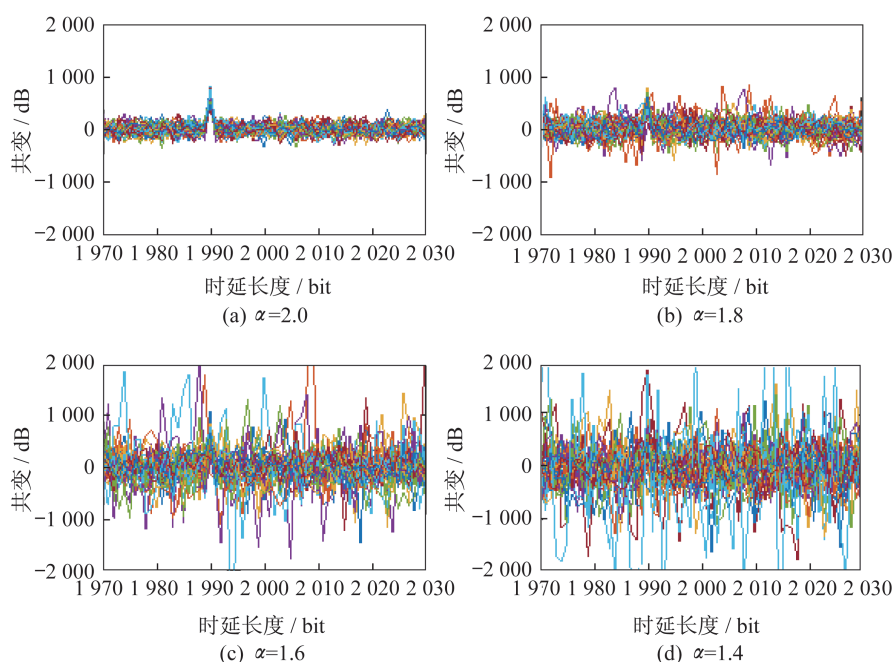


图 4 $M_{\text{SNR}}=0$ dB 条件下共变方法对信号相似度检测结果

Fig.4 Detection results of the similarity of signals by the co-variation method when $M_{\text{SNR}}=0$ dB

从图 4 中可以看出,在 $M_{\text{SNR}}=0$ dB 时, $\alpha=1.6$ 时,共变峰位置已经受到影响,50 次检测的结果中已经有多次错误出现,干扰时延长度的估计,说明共变法性能已经衰减; $\alpha=1.4$ 时,完全不能得到正确结果,说明共变法在强脉冲噪声环境下的鲁棒性

不够。

从图 5 中可以看出,在 $M_{\text{SNR}}=-0.5$ dB, $\alpha=1.6$ 、 $\alpha=1.4$ 时,共变峰也已经受到严重影响,不能得到正确结果,说明共变法低信噪比条件下,对强脉冲噪声的鲁棒性更差。

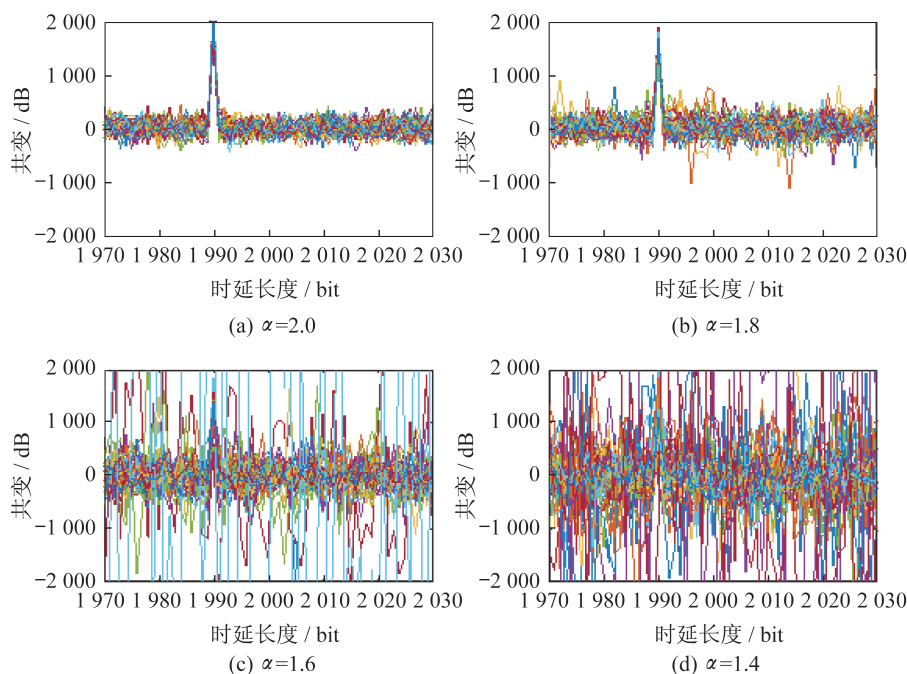


图 5 $M_{\text{SNR}}=-5$ dB 带噪信号采用共变方法对信号相似度的检测结果

Fig.5 Detection results of the similarity of signals with noise by the co-variation method when $M_{\text{SNR}}=-5$ dB

在相同信号噪声条件下,基于 Sigmoid 映射的非线性变换相关法的结果(50 次独立的实验)如图 6 和图 7 所示。

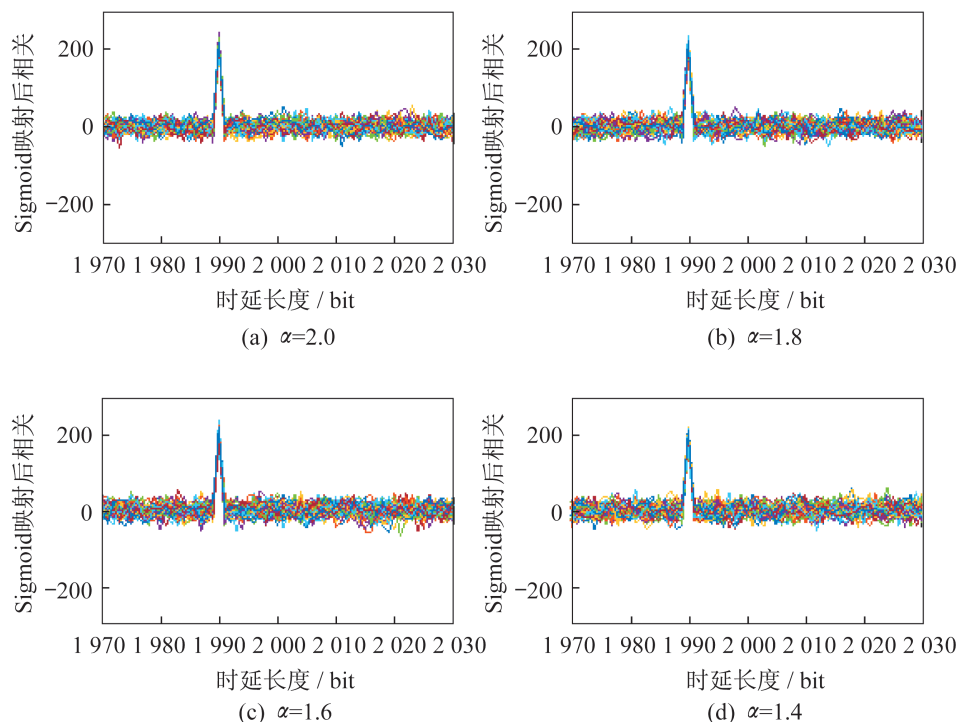


图 6 $M_{\text{SNR}}=0$ dB 带噪信号采用非线性变换相关方法对信号相似度的检测结果

Fig.6 Detection results of the similarity of signals with noise by the nonlinear transformation method when $M_{\text{SNR}}=0$ dB

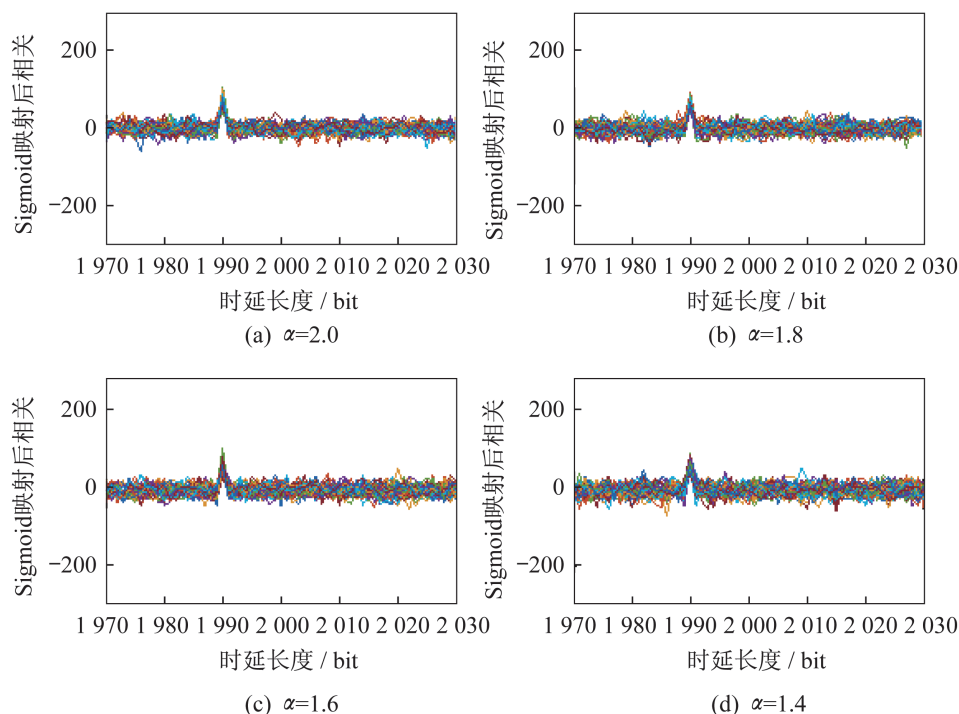


图 7 $M_{\text{SNR}}=-5$ dB 带噪信号采用非线性变换相关方法对信号相似度的检测结果

Fig.7 Detection results of the similarity of signals with noise by the nonlinear transformation method when $M_{\text{SNR}}=-5$ dB

比较图6和图7中可以看出,非线性变换相关法即使在 $M_{\text{SNR}}=-5\text{ dB}$ 、 $\alpha=1.4$ 时,也可以得到正确的估计结果 $\hat{D}=10T_s$ 。这说明非线性变换相关法在低信噪比强脉冲噪声环境下具有很好的鲁棒性。实验结果表明,非线性变换相关法不仅可以用于高斯噪声环境下微弱信号相似度的检测,也可以用于强脉冲噪声环境下信号相似度的检测,具有较宽的适用范围和较好的鲁棒性。经仿真结果比较,脉冲噪声低信噪比条件下非线性变换相关法的估计精度,高于共变法的估计精度。

共变法中涉及参数 p 的选取,需要估计噪声的特征指数 α 或有其先验知识,非线性变换相关法不但没有参数的选取问题,而且也适用于低信噪比强脉冲噪声环境。

计算机仿真实验结果表明,本文提出的非线性变换相关法有良好的相似性检测性能和较强的鲁棒性,具有更广泛的使用场合。

4 结束语

实际应用中采集的信号常常含有脉冲性噪声,而且低信噪也比较低,经典的相关法对信号的相似度检测精度不高、鲁棒性不强。针对这一问题,本文在分析脉冲噪声特点的基础上,对带噪信号建模Alpha稳定分布,利用Sigmoid函数特性,提出了非线性变换相关法。首先对带有脉冲噪声的信号进行Sigmoid映射,其次对映射后的信号求取相关函数,从而得到信号之间相似度的信息。该方法具有简洁、计算量小、不需要调整参数的优点,较好地削弱了脉冲噪声对信号相似度估计的不利影响。定位系统中信号到达时差的估计,本质上是信号相似度检测的问题。将本文提出的计算机仿真估计信号的到达时差方法,在脉冲噪声低信噪条件下,与相关法和共变法比较,得出非线性变换相关法不仅可以用于高斯噪声环境下,而且可以用于强脉冲噪声环境下的微弱信号相似度的检测,在适用范围和鲁棒性上优于相关法、共变法。

参考文献

[1] 王宏禹,邱天爽.自适应噪声抵消与时间延迟估计

[M].大连:大连理工大学出版社,1999.

- [2] 张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版,2002.
- [3] 刘文红.基于稳健性时间延迟估计的激光测距算法[J].中国激光,2012,39(增刊2):1-5.
- [4] MA X Y. Robust signal processing in impulsive noise with stable distributions: estimation, identification and equalization [J]. Pesticide Science, 1988, 23 (3) : 259-265.
- [5] 齐小刚,袁列平,刘立芳.奇异值分解的HB加权广义互相关时延估计[J].信号处理.2018,34(10):1160-1168
- [6] NIKIAS C L, SHAO M. Signal processing with Alpha-stable distributions [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1995.
- [7] 金芳晓,邱天爽,王鹏,等.基于相关熵希尔伯特差值的窄带射频信号时延估计[J].大连理工大学学报,2016,56(4):414-419.
- [8] LI L, QIU T S. A novel phase parameter estimation method of quadratic FM signal based on Sigmoid fractional ambiguity function in impulsive noise environment [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2018, 93: 268-276.
- [9] 王啸臻,王兆魁,张育林.基于相关峰细化时延估计的舱内服务机器人发话人定位研究[J].上海航天,2018,35(5):10-17.
- [10] 黎英云,马洪.高分辨率多径时延测量算法[J].上海航天,2010,27(6):52-56.
- [11] LI J H, LIU W H. Characteristics analysis and modeling of fault sound and background noise of large central air conditioner [J]. Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2018, 6(1): 30-35.
- [12] ZHANG Q, ZHANG L. An improved delay algorithm based on generalized cross correlation [C]// Information Technology and Macaronis Engineering Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 395-399.
- [13] 唐洪.广义正态信号处理理论及在通信中应用的研究[D].大连:大连理工大学,2006.
- [14] SO H C, CHING P C. Performance analysis of ETDGE-an efficient and unbiased TDOA estimator [J]. IEE Proceedings: Radar Sonar and Navigation, 1998, 145(6): 325-330.