

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206061

脉冲噪声环境下混沌扩频时延估计算法研究

邢毓华^{1,2} 顾力铭¹

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048; 2. 西安市无线光通信与网络研究重点实验室 西安 710048)

摘要:针对传统时延算法面对脉冲噪声时运算结果峰值旁瓣比较低,且存在误判点较多难以判断的问题,提出了一种新型加权高斯相关熵时延估计方法,并将该方法应用于电缆故障定位的仿真模型中。仿真结果表明,与现有的方法相比,不仅可以在脉冲噪声环境下获得良好的时延估计效果,而且在强脉冲噪声干扰下依旧能够保持较高的定位精度。在不同强度的脉冲噪声背景下,其运算结果相比其他3种方法主峰值旁瓣比绝对值增加0.020 3 dB以上,误判峰值与故障点峰值比减少了0.053 9以上,均方值误差减少了1.863 6 m以上。

关键词:时延估计;脉冲噪声;相关熵;电缆故障定位

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

Research on chaotic time delay estimation method in Alpha stable distributed noise environment

Xing Yuhua^{1,2} Gu Liming¹

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Wireless Optical Communication and Network Research, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to solve the problem that the peak sidelobe of the traditional time delay algorithm is relatively low when it faces impulse noise, and there are many false positives that are difficult to judge, a new weighted Gaussian correlation entropy time delay estimation method is proposed and applied to the simulation model of cable fault location. The simulation results show that, compared with the existing methods, it not only obtains a good time delay estimation effect in the impulsive noise environment, but also maintains a high positioning accuracy in the strong impulsive noise interference. In the background of pulse noise with different intensities, the calculation results show that compared with the other three methods, the absolute value of the main peak to side lobe ratio increases by more than 0.020 3 dB, the ratio of misjudged peak to fault point peak decreases by more than 0.053 9, and the mean square error decreases by more than 1.863 6 m.

Keywords: time delay estimation; impulse noise; correlation entropy; cable fault location

0 引言

近些年来,混沌扩频信号由于在抗干扰、自相关和互相关等方面具有良好的性能使其在信号处理领域得到了广泛的应用^[1-2]。混沌扩频时延估计常被应用在目标定位中,对电缆故障定位具有重要研究价值^[3]。时延估计(time delay estimation, TDE)是指利用信号由发射端到信号接收端传输过程产生的时间差进行距离估计^[4],其作为信号处理领域中的重要研究问题一直受到学者们的重视。时延估计常常会受到各种噪声的影响,虽然在面对

高斯噪声时具有很好的性能,但大部分时延估计方法都是以二阶或高阶统计为基础的^[5],在与脉冲噪声并存的复杂电磁环境下会出现显著的性能退化^[6-7],甚至会出现错误的结果。为此,研究在这种复杂电磁环境下具有较好鲁棒性的时延估计算法是具有重要意义的。

目前,国内外学者在基于混沌扩频信号时延估计算法方面做了大量理论研究和仿真验证工作。文献[8]在基于混沌序列的扩频时延估计中使用了基本互相关算法,但是仅仅考虑了高斯噪声对时延估计带来的影响;文献[9]将广义互相关算法替换了基本互相关运用在了混沌扩频时延估计中,验证了平滑相关变换窗(SCOT加权

函数)在运算结果上优于其他两种常用的加权函数,有效地锐化了峰值提高了时延估计的精度,但是仍然没有考虑到噪声中含有脉冲等非高斯噪声所带来的影响,具有一定的局限性;文献[10]提出了三阶累积量-维切片结合二次相关的混沌扩频时延估计算法,并且表明该算法能有效地抑制非高斯噪声的干扰,但是仿真模型并未加入脉冲等非高斯噪声,研究结果缺乏一定的数据支撑;文献[11]提出了一系列基于分数低阶统计量的时延估计方法来解决面对脉冲噪声时算法性能急剧下降的问题,但是此类方法必须事先对脉冲噪声有一定的认识才能选取合适的参数,在真实的电缆环境下是很难实现的,因此在实际应用中存在缺陷;文献[12]提出了一种基于广义相关熵的混沌扩频时延估计算法。该算法结合相关熵的理念,将广义互相关中的功率谱替换为相关熵谱以抑制脉冲噪声,结果表明该方法在脉冲噪声环境下有着良好的时延估计效果,但是其性能会随着脉冲噪声强度的增加而急剧衰退^[13]。

本文主要研究混沌扩频时延估计算法在电缆故障定位中的应用^[14]。为解决上述算法在强脉冲噪声环境下性能急剧衰退的问题,本文以相关熵理论为基础,提出一种改进的广义相关熵时延估计算法^[15]。该方法基于高斯核函数,利用指数函数加权获得了一种新的高斯相关熵核函数,基于加权高斯核函数的广义相关熵时延估计算法不仅可以较好地抑制强脉冲噪声的干扰而且能够弥补传统相关熵算法无法抑制相似幅值脉冲噪声的缺陷,是一种更具有鲁棒性的对抗脉冲等非高斯噪声的时延估计算法^[16]。从仿真结果可以得出该算法在脉冲噪声环境下随着脉冲噪声强度的增加仍然具有良好的时延估计性能。

1 基本原理

1.1 Alpha 稳定分布模型

Alpha 稳定分布是一种典型的非高斯分布,能够很好地描述实际场景下的真实非高斯噪声^[17]。它包含了高斯分布($\alpha=2$)和分数低阶 Alpha 稳定分布($0<\alpha<2$)两种情况,可以通过不同的参数设置来描述各种不同程度的、对称或非对称的脉冲噪声。Alpha 稳定分布具有代数拖尾特性,能够非常好地与实际数据相吻合。更重要的是,Alpha 稳定分布作为非高斯分布模型既能满足稳定性定理又能满足广义中心极限定理,具有更广泛的代表性。因此本文选用 Alpha 稳定分布模型来模拟电缆中所存在的脉冲等非高斯噪声。由于其没有统一的闭式概率密度函数表达式,故常用统一的特征函数来定义:

$$\varphi(t) = \exp\{j\delta t - \alpha\gamma |t|^a [1 + j\beta \operatorname{sgn}(t)\omega(t,a)]\} \quad (1)$$

其中, $\omega(t,a)$ 表示为:

$$\omega(t,a) = \begin{cases} \tan(\pi\alpha/2), & \alpha \neq 1 \\ (2/\pi)\log|t|, & \alpha = 1 \end{cases} \quad (2)$$

$\operatorname{sgn}(t)$ 为符号函数,可以表示为:

$$\operatorname{sgn}(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t = 0 \\ -1, & t < 0 \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)可以看出,Alpha 稳定分布主要由 α, β, γ 和 δ 这4个参数确定。其中, α 代表特征指数,决定脉冲的强弱, α 取值越大脉冲值越小,其取值范围为 $(0, 2]$, 通常将 $0 < \alpha \leq 1$ 的脉冲噪声称为强脉冲噪声; β 代表对称参数,决定概率密度函数偏离中心位置的程度,取值为 $[-1, 1]$; γ 代表分散系数,表示 Alpha 稳定分布的离散程度,取值为 $(0, +\infty)$; δ 代表位置参数,表示 Alpha 稳定分布的均值,取值为 $(-\infty, +\infty)$ 。特别地, $\beta = 0, \delta = 0$ 的 α 稳定分布称为对称 α 稳定分布,即 SaS 分布。不同特征参数情况下, $\gamma = 1$ 的 SaS 分布的近似概率密度函数如图1所示。其中 $\alpha = 2$ 对应的曲线为真实的概率密度函数,其他 α 对应的曲线为近似的概率密度函数,由大量样本点模拟得到。

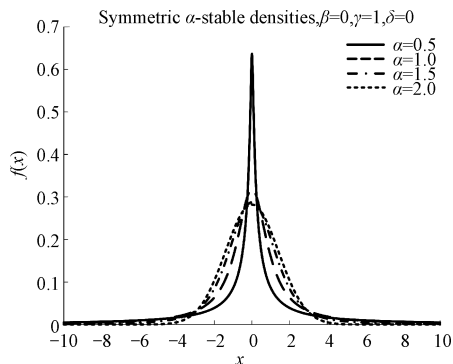


图1 不同特征指数的 SaS 分布概率密度曲线

Fig.1 SaS distribution probability density curves with different eigenindices

1.2 相关熵的基本原理

与相关函数不同的是,相关熵把非线性问题转化成再生希尔伯特空间的线性问题,这是一种能有效描述随机过程的统计分布和时间结构的单一度量,也是一种有效的局部相似度量^[18]。是传统相关函数的一般化与推广,在包含传统相关函数的基础上提高了性能。设两个随机变量为 X 和 Y ,相关熵的定义如下:

$$V_\sigma(X,Y) = E(k_\sigma(X-Y)) \quad (4)$$

式中: $k_\sigma(\cdot)$ 为高斯核函数,其表达式为:

$$k_\sigma(\cdot) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\cdot)^2}{2\sigma^2}\right), \sigma > 0 \quad (5)$$

式中: σ 代表核长。相关熵的定义式中,核函数的存在可

以将低维空间的输入数据映射到无限维的空间。核函数的选取一般为高斯核函数,与其他核函数相比,高斯核函数是一种具有鲁棒性的径向基核函数,对于信号中的噪声(特别是脉冲噪声)具有较好的抑制能力。

相关熵的性质可以归纳如下:

1) 相关熵函数的有界性:

$$0 < V_{\sigma}(X, Y) \leq \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (6)$$

2) 相关熵函数的对称性:

$$V_{\sigma}(X, Y) = V_{\sigma}(Y, X) \quad (7)$$

3) 设 X 与 Y 的差为一个新的随机变量 $W = X - Y$ 。采用高斯核函数,则相关熵 $V_{\sigma}(X, Y)$ 可以展开成以下泰勒级数的形式:

$$V_{\sigma}(X, Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2^n \sigma^{2n} n!} E[(X - Y)^{2n}] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2^n \sigma^{2n} n!} E[W^{2n}] \quad (8)$$

因此,相关熵函数既含有各个信号之间的所有偶次阶矩的统计信息,又含有二阶矩统计量,能够较好地反映各个信号间的关系。当 X 和 Y 分别为连续信号 $x(t)$ 与 $y(t)$ 时,相关熵的表达式如下:

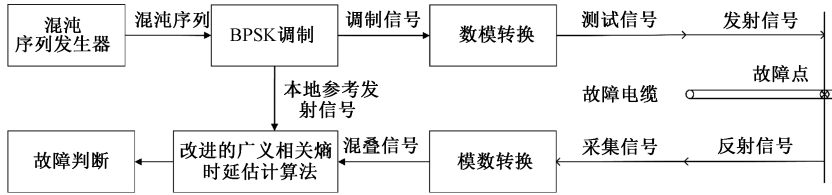


图2 混沌扩频时延估计原理

Fig. 2 Schematic diagram of chaotic spread spectrum delay estimation

当存在脉冲噪声时,设上述混沌扩频时延估计算法的信号模型为:

$$x(n) = s(n) + n_1(n) \quad (12)$$

$$y(n) = s(n) + \lambda s(n - D) + n_2(n) \quad (13)$$

式中: $x(n)$ 与 $y(n)$ 分别为本地参考发射信号和接收端接收到的混叠信号; $s(n)$ 为扩频测试信号; $n_1(n)$ 和 $n_2(n)$ 分别为发射通道和反射通道的脉冲噪声; λ 为衰减系数,代表扩频测试信号在电缆中所传输产生的衰减,取值范围为 $(0, 1)$; D 为扩频测试信号在电缆中传输的时延。以下以基本互相关为例来讨论两路信号做相关运算的结果:

$$\begin{aligned} R_{xy}(t) &= E[x(n)y(n + \tau)] = \\ &E\{[s(n) + n_1(n)][s(n + \tau) + \\ &\lambda s(n - D + \tau) + n_2(n + \tau)]\} = \\ &E[s(n)s(n + \tau)] + \lambda E[s(n)s(n - D + \tau)] + \\ &E[s(n)n_2(n + \tau)] + E[n_1(n)s(n + \tau)] + \end{aligned}$$

$$V_{\sigma}(\tau) = E[k_{\sigma}(x(t) - y(t + \tau))] \quad (9)$$

由相关熵的定义可以推导出一个距离度量,即相关熵诱导距离(correlation entropy induced distance, CIM),其表达式如式(10)所示:

$$CIM(X, Y) = \sqrt{k_{\sigma}(0) - V_{\sigma}(X, Y)} \quad (10)$$

基于 CIM 距离测度,定义最大相关熵准则(maximum correlation entropy criterion, MCC)为:

$$MCC(e) = \max\{E[k_{\sigma}(e)]\}, e = X - Y \quad (11)$$

从式(11)中可以看出,两个随机变量的差值 e 越大则相关熵的值越小,表明俩随机变量的相似程度越低;反之 e 越小,相关熵越大,相似程度越高;当 e 大于受核长控制的某一阈值时,相关熵逼近于 0。

1.3 混沌扩频时延估计模型

混沌扩频时延估计的原理如图 2 所示,首先混沌序列发生器产生混沌序列后进行二进制相移键控(BPSK)调制分为两路信号,一路为扩频测试信号发送至待测电缆中,另一路为本地参考发射信号;当扩频测试信号遇到故障发生点即电缆阻抗不匹配点,信号在该点发生反射,将接收端接收到的混叠信号与本地参考发射信号进行相关运算即可得出信号从发出到返回接收端的传输时间,进而判断出故障点位置。

$$\begin{aligned} &\lambda E[n_1(n)s(n - D + \tau)] + E[n_1(n)n_2(n + \tau)] = \\ &R_{ss}(\tau) + \lambda R_{ss}(\tau - D) + R_{sn_2}(\tau) + \\ &R_{n_1s}(\tau) + \lambda R_{n_1s}(\tau - D) + R_{n_1n_2}(\tau) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $R_{ss}(\tau)$ 为扩频测试信号的自相关函数; $R_{ss}(\tau - D)$ 为扩频测试信号与反射信号的互相关函数; $R_{sn_2}(\tau)$ 为扩频测试信号与反射通道脉冲噪声的互相关函数; $R_{n_1s}(\tau)$ 为发射通道脉冲噪声与扩频测试信号的互相关函数; $R_{n_1s}(\tau - D)$ 为发射通道脉冲噪声与反射信号的互相关函数; $R_{n_1n_2}(\tau)$ 为发射通道脉冲噪声与反射通道脉冲噪声的互相关函数。在理想情况下不受到脉冲噪声干扰时公式中 $R_{n_1s}(\tau) = 0$, $R_{n_1s}(\tau - D) = 0$ 和 $R_{n_1n_2}(\tau) = 0$ 。此时式(14)可化简为:

$$R_{xy}(\tau) = R_{ss}(\tau) + \lambda R_{ss}(\tau - D) \quad (15)$$

由相关运算结果可知,在无噪声干扰下该方法得到的相关结果会得到两个峰值:最高峰在 $\tau = 0$ 处取得;次高峰即真实故障峰在 $\tau = D$ 处取得,该值即为扩频测试信

号传输的时延,由此可通过计算得到在混沌扩频时延估计中的定位距离。但在实际应用情况下会存在脉冲噪声干扰,因此可能会产生大于或等于真实故障峰的误判峰干扰正常的故障距离定位。

1.4 改进的广义相关熵时延估计算法

相关熵作为一种广义相关函数,其泰勒级数展开中含有信号的相关信息^[19],可用于时延估计算法,利用高斯核函数的衰减特性来抑制脉冲噪声,因此在脉冲噪声背景下的时延估计问题中有广泛的应用。然而,传统的相关熵算法在强脉冲噪声环境下性能会急剧下降且难以克服相似幅值脉冲噪声的影响。由式(4)可知相似幅值的脉冲噪声会使得相关熵值较大,当过大的函数值使得相关运算结果出现大于或等于真实故障峰值的误判峰时,会影响信号相似度的测量,使得故障定位出现错误的结果。对此,本文在传统相关熵脉冲噪声抑制原理的基础上,提出了一种基于高斯核函数的新型加权高斯相关熵函数。该函数与传统的相关熵具有类似的性质,且能够克服相似幅值脉冲噪声对相关结果产生的影响,在原有的基础上提高了对抗强脉冲噪声的能力。新型加权高斯相关熵函数定义如下:

$$V_{\sigma}(X, Y) = E[k_{\sigma}(X - Y) \exp(-\frac{|X|}{\mu}) \exp(-\frac{|Y|}{\mu})] = E[k_{\sigma}(X - Y) \exp(-\frac{|X| + |Y|}{\mu})] \quad (16)$$

其中, μ 为加权函数的核长参数,用于权重调节。

式(16)中按照 X 与 Y 是否受脉冲噪声干扰可以分为以下4种情形:

1) X 与 Y 均不受脉冲噪声干扰

$$V_{\sigma}(X, Y) = E[k_{\sigma}(X - Y) \exp(-\frac{|X|}{\mu}) \exp(-\frac{|Y|}{\mu})] \quad (17)$$

该情况下 X 与 Y 在同一采样点处均不受脉冲噪声干扰不会产生偏离于原数值较大的离群值,表明计算结果为正常数值。

2) X 受脉冲噪声干扰

$$V_{\sigma}(X, Y) = E[k_{\sigma}(X - Y) \times a_1 \times \exp(-\frac{|Y|}{\mu})] \quad (18)$$

该情况下 X 受脉冲噪声干扰产生了偏离于原数值较大的离群值,进而使得该采样点处原本较小的相关熵运算结果数值较大,经加权函数中 $\exp(-\frac{|X|}{\mu})$ 的负指数运算后,相关熵的数值会较小。避免了受脉冲噪声干扰后产生较大的相关熵函数值,进而出现大于或等于真实故障峰峰值的误判峰使得故障定位出现错误结果。其中, a_1 为经负指数运算后较小的接近于0的数值。

3) Y 受脉冲噪声干扰

$$V_{\sigma}(X, Y) = E[k_{\sigma}(X - Y) \exp(-\frac{|X|}{\mu}) \times a_2] \quad (19)$$

该情况下 Y 受脉冲噪声干扰产生了偏离于原数值较大的离群值,进而使得该采样点处原本较小的相关熵运算结果数值较大,经加权函数中 $\exp(-\frac{|Y|}{\mu})$ 的负指数运算后,相关熵的数值会较小,避免受脉冲噪声干扰产生较大的相关熵函数值,进而出现大于或等于真实故障峰峰值的误判峰使得故障定位出现错误结果。其中, a_2 为经负指数运算后较小的接近于0的数值。

4) X 与 Y 均受脉冲噪声干扰

$$V_{\sigma}(X, Y) = E[k_{\sigma}(X - Y) \times a_3] \quad (20)$$

该情况下 X 与 Y 均受脉冲噪声干扰产生了偏离于原数值较大的离群值,进而使得该采样点处原本较小的相关熵运算结果数值较大,经过整体加权函数 $\exp(-\frac{|X| + |Y|}{\mu})$ 的负指数运算后,相关熵的数值会较小,避免受脉冲噪声干扰而产生较大的相关熵函数值,进而出现大于或等于真实故障峰峰值的误判峰使得故障定位出现错误结果。其中, a_3 为经负指数运算后较小的接近于0的数值。

综合这3种情形可知,改进的新型高斯相关熵函数不仅能够较好地抑制强脉冲噪声的干扰,而且能够弥补传统相关熵无法抑制相似幅值脉冲噪声的缺陷,是一种更为具有鲁棒性的脉冲噪声抑制方法。

2 改进的广义相关熵时延估计算法在混沌扩频时延估计中的应用

本文基于 Simulink 平台搭建了电缆开路故障的仿真模型来进行仿真,验证本文所使用的混沌扩频时延估计算法相较于基本互相关、广义互相关和广义相关熵所具有的优势。仿真模型包括了混沌序列生成模块、BPSK 调制模块、电缆线路模块和线缆故障设置模块等。对于测试信号,设置仿真时间为 2.5×10^{-4} s,本地余弦载波信号为 1 MHz,测试信号码元持续时间为 1×10^{-6} s,载波调制比为 1:1,采样率设置为 50 MHz,测试信号幅值为 10 V,本文研究的是由均值为 0 的标准 SαS 分布生成的脉冲噪声对电缆故障定位造成的影响,因此,将参数 β, γ, δ 固定为 $\beta = 0, \gamma = 1, \delta = 0$,通过调节特征指数 α 的数值来获得不同强度的脉冲噪声。

2.1 加权参数的选取

为了进一步对本文改进的时延估计算法的性能进行分析,首先需要对加权值的选取进行讨论,如何取值使得时延估计效果达到最优,是首先要解决的问题。加权参

数的取值直接影响了改进时延估计算法对于脉冲噪声的抑制能力,因此,本文定义了一种峰均比作为判断标准,定义式如下:

$$K = \frac{|V'(d)|}{\frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} |V'(i)|} \quad (21)$$

设置脉冲噪声特征指数设置分别为 $\alpha = 1.6, \alpha = 1.3, \alpha = 1$, 在不同加权值条件下使用改进的新型加权相关熵函数在不同脉冲噪声强度下进行自相关运算,即式中 $V'(d)$ 中的 d 取 0, 信号长度 m 由上述仿真数值设置计算为 6 251。峰均比 K 可以对时延估计结果中故障反射信号对应峰值的突出性进行描述, K 值越高, 相关熵整体越平缓, 故障反射信号对应峰值越明显, 表明该算法对于脉冲噪声的抑制能力越强。峰均比 K 的仿真结果如图 3 所示。

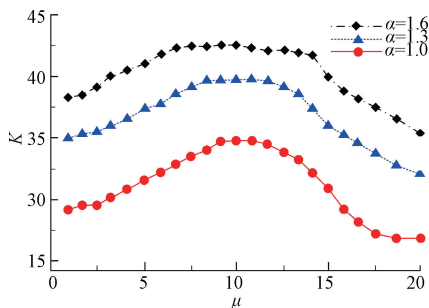


图 3 加权值对改进广义相关熵峰均比的影响

Fig. 3 Results the influence of weighted value on the peak-to-average ratio of improved generalized correlation entropy

图 3 中,在不同的加权值处都进行了 300 次独立的实验,取其平均值。可以看出在脉冲噪声特征指数 $\alpha = 1.6$ 时,加权值 μ 小于 14 大于 7 时相关熵的峰均比 K 较高; $\alpha = 1.3$ 时,加权值 μ 小于 12 大于 8 时相关熵的峰均比 K 较高; $\alpha = 1$ 时,加权值 μ 小于 12 大于 9 时相关熵的峰均比 K 较高;因此,本文将加权值设置为 10。

2.2 仿真运算结果

接下来讨论各个时延估计方法在电缆开路故障中的性能比较,选取故障距离为 4 km, 设置脉冲噪声特征指数分别为 $\alpha = 1.6, \alpha = 1.3, \alpha = 1$ 验证其在不同脉冲噪声强度下的算法性能,为更好地比较,将运算结果统一进行归一化处理,如图 4 所示。

由图 4 可知,在同等信息源数据条件下,脉冲噪声强度 $\alpha = 1.6$ 时,图 4(a) 基本互相关和图 4(c) 广义相关熵的主峰值旁瓣比分别为 -0.2637 和 -0.1528 dB, 其绝对值低于其他两种方法,表明旁瓣较大,一定程度上影响了定位精度;图 4(a) 基本互相关、图 4(b) 广义互相关和图 4(c) 广义相关熵的误判峰值比分别为 0.9411 、 0.9377

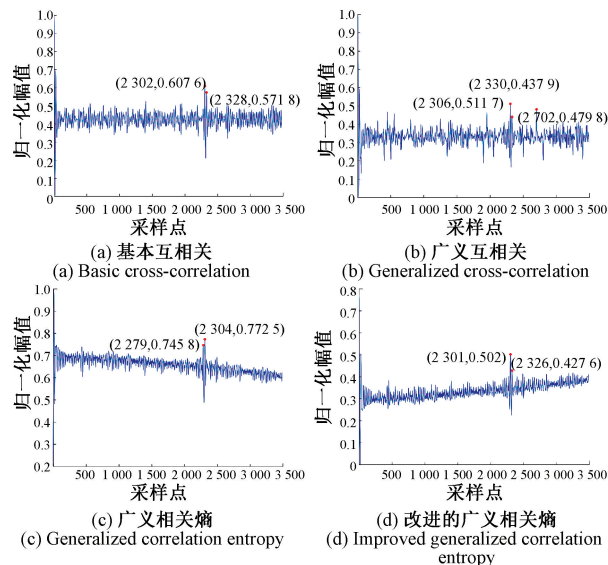


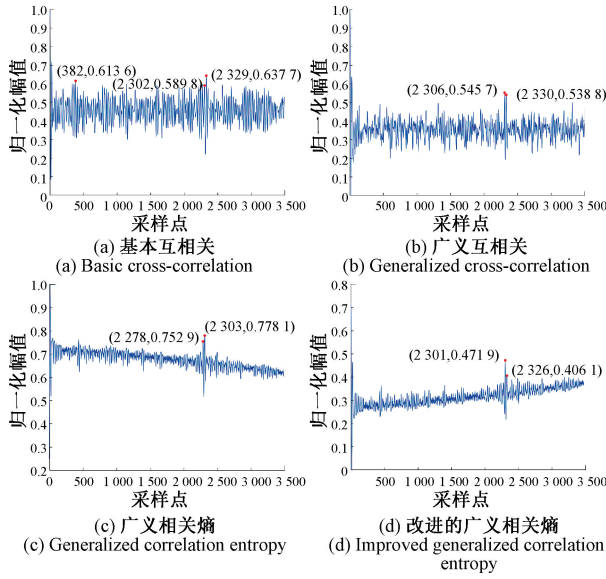
图 4 $\alpha = 1.6$ 脉冲噪声强度下各类算法结果

Fig. 4 $\alpha = 1.6$ Results of various algorithms under impulse noise intensity

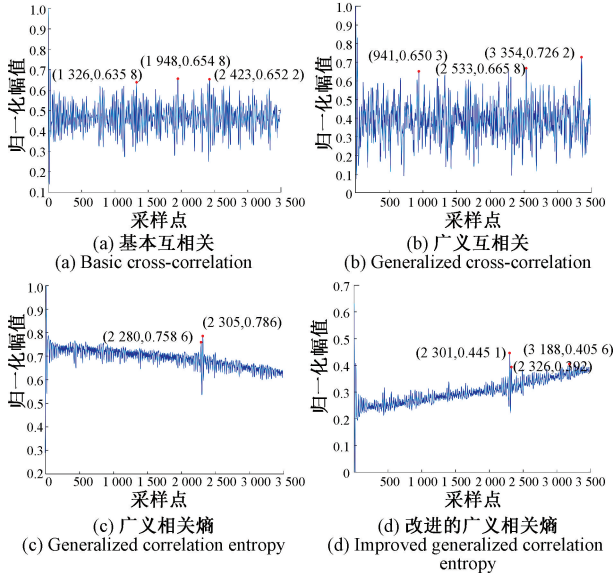
和 0.9654 , 都高于图 4(d) 改进的广义相关熵的误判峰值比 0.8518 , 表明本文所使用的改进算法更易于得出真实故障点信息;图 4(a) 基本互相关、图 4(b) 广义互相关和图 4(c) 广义相关熵的定位误差分别为 5.48 m, 12.44 m 和 8.96 m, 均高于图 4(d) 本文所用算法的 3.74 m, 表明本文所用改进算法的定位精度更高。

由图 5 可知,在同等信息源数据条件下,脉冲噪声强度 $\alpha = 1.3$ 时,图 5(a) 基本互相关、图 5(b) 广义互相关和图 5(c) 广义相关熵的主峰值旁瓣比分别为 -0.3391 、 -0.0553 和 -0.1430 dB, 其绝对值均低于本文所用算法,表明旁瓣较大,一定程度上影响了定位精度;图 5(a) 基本互相关、图 5(b) 广义互相关和图 5(c) 广义相关熵的误判峰值比分别为 0.9622 、 0.9874 和 0.9676 , 都高于图 5(d) 改进的广义相关熵的误判峰值比 0.8605 , 表明本文所使用的改进算法更易于得出真实故障点信息;图 5(a) 基本互相关测距结果误差较大,已经无法正常判别,而图 5(b) 广义互相关和图 5(c) 广义相关熵的定位误差分别为 12.44 m 和 7.22 m, 均高于图 5(d) 本文所用算法的 3.74 m, 表明本文所用改进算法的精度更高。

由图 6 可知,在同等信息源数据条件下,脉冲噪声强度 $\alpha = 1$ 时,图 6(a) 基本互相关和图 6(b) 广义互相关已经无法正常判别;图 6(c) 广义相关熵的主峰值旁瓣比为 -0.1541 dB, 其绝对值低于本文使用的算法,表明旁瓣较大,相较于本文所使用的改进算法不易于峰值识别;图 6(c) 广义相关熵的误判峰值比为 0.9651 , 高于图 6(d) 改进的广义相关熵的误判峰值比 0.9112 , 表明本文所使用的改进算法更易于得出真实故障点信息;图 6(c)

图5 $\alpha = 1.3$ 脉冲噪声强度下各类算法结果Fig. 5 $\alpha = 1.3$ Results of various algorithms under impulse noise intensity

广义相关熵的定位误差为 10.7 m, 高于图 6(d) 本文所用算法的 3.74 m, 表明本文所用改进算法的精度更高。

图6 $\alpha = 1$ 脉冲噪声强度下各类算法结果Fig. 6 $\alpha = 1$ Results of various algorithms under impulse noise intensity

3 仿真结果讨论与分析

综合上述仿真结果, 为更好地检验本文所用改进算法在面对不同强度脉冲噪声时相对于其他算法的优势。

本文在不同脉冲强度噪声下, 基于基本互相关、广义互相关、广义相关熵和改进的广义相关熵进行了 500 次的 Monte Carlo 实验, 性能评判运算结果综合在表 1 中进行对比。

3.1 性能评价指标

本文采用峰值旁瓣比 (peak side lobe ratio, PSLR)、误判峰值比 (misjudgement peak ratio, MPR) 和均方根误差 (root mean square error, RMSE) 对算法性能进行综合评判。

1) 峰值旁瓣比

$$PLSR = 10 \times \lg\left(\frac{P_0}{P_1}\right) \quad (22)$$

式中: P_0 表示主峰旁瓣幅值; P_1 表示主峰幅值; 由式 (17) 可以看出, $PLSR$ 为负, 并且其绝对值越大, 说明旁瓣越小。

2) 误判峰值比

$$MPR = \frac{N_0}{N_1} \quad (23)$$

式中: MPR 表示最大误判峰值与故障点峰值的比值; N_0 表示次高峰幅值; N_1 表示主峰幅值; 由式 (18) 可以看出, 误判峰值比的取值范围为 $(0, +\infty)$ 。当误判峰值比取值为 $(0, 1)$ 时表明没有出现误判情况, 且比值越小, 误判点越不明显; 当取值为 $[1, +\infty)$ 时, 则表明误判峰值大于等于故障点峰值, 出现误判情况。

3) 均方根误差

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_{total}} \sum_{i=1}^{N_{total}} (d_i - d)^2}, \quad (24)$$

式中: d_i 表示第 i 次故障判断距离; d 为故障距离真实值; N_{total} 表示时延估计的总实验次数。由式 (19) 可以看出, 均方根误差越大, 表明定位结果与故障真实值偏差越大。

3.2 仿真结果分析

分析表 1 中数据可知, 本文算法在电缆开路故障中, 当脉冲噪声强度 α 为 1.6 时, 与基本互相关相比, 主峰值旁瓣比增加了 0.433 dB, 误判峰值比减少了 0.089 3, 均方根误差减少了 1.863 6 m; 与广义互相关相比, 主峰值旁瓣比增加了 0.020 3 dB, 误判峰值比减少了 0.085 9, 均方根误差减少了 8.649 3 m; 与广义相关熵相比, 主峰值旁瓣比增加了 0.543 9 dB, 误判峰值比减少了 0.113 6, 均方根误差减少了 5.324 8 m。当脉冲噪声强度 α 为 1.3 时, 基本互相关算法已无法正常判别; 与广义互相关相比, 主峰值旁瓣比增加了 0.596 9 dB, 误判峰值比减少了 0.126 9, 均方根误差减少了 8.649 3 m; 与广义相关熵相比, 主峰值旁瓣比增加了 0.509 2 dB, 误判峰值比减少了 0.107 1, 均方根误差减少了 3.444 5 m。当脉冲噪声强度 α 为 1 时, 基本互相关与广义互相关算法已经无法正常

判别;与广义相关熵相比,主峰值旁瓣比增加了 0.397 6 dB,误判峰值比增加了 0.053 9,均方根误差减少了 6.771 4 m。结果表明,在不同强度脉冲噪声环境下,本文算法在电缆故障定位中对噪声抑制均取得良好效果,定位相比于其他算法更加精准。

表 1 时延估计仿真统计结果

Table 1 Simulation statistics results of time delay estimation

脉冲噪声强度	时延算法	主峰值旁瓣比/dB	误判峰值比	均方根误差/m
$\alpha = 1.6$	基本互相关	-0.263 7	0.941 1	5.178 9
	广义互相关	-0.676 4	0.937 7	10.465 5
	广义相关熵	-0.152 8	0.965 4	8.640 1
	改进的广义相关熵	-0.696 7	0.851 8	3.315 3
$\alpha = 1.3$	基本互相关	-	-	-
	广义互相关	-0.055 3	0.987 4	12.112 0
	广义相关熵	-0.143 0	0.967 6	6.907 2
	改进的广义相关熵	-0.652 2	0.860 5	3.462 7
$\alpha = 1$	基本互相关	-	-	-
	广义互相关	-	-	-
	广义相关熵	-0.154 1	0.965 1	10.375 4
	改进的广义相关熵	-0.551 7	0.911 2	3.604 0

4 结 论

本文为解决传统混沌扩频时延估计算法在强脉冲等非高斯噪声环境下出现的性能急剧衰退甚至误判等问题,提出了一种基于高斯核函数的新型加权高斯相关熵时延估计算法。该方法可以实现在脉冲噪声环境下的精确定位,即使是在强脉冲噪声环境下依旧能够保持较高定位精度。通过 Simulink 平台建模并在不同强度脉冲噪声环境下进行仿真实验,对上述的混沌扩频时延估计算法进行了分析比较。与其他 3 种方法的最优结果相比,在脉冲噪声强度 α 为 1.6 时,主峰值旁瓣比增加了 0.020 3 dB,误判峰值比减少了 0.085 9,均方根误差减少了 1.863 6 m;在脉冲噪声强度 α 为 1.3 时,主峰值旁瓣比增加了 0.509 2 dB,误判峰值比减少了 0.107 1,均方根误差减少了 8.649 3 m;在脉冲噪声强度 α 为 1 时即强脉冲噪声强度下,主峰值旁瓣比增加了 0.397 6 dB,误判峰值比减少了 0.053 9,均方根误差减少了 6.771 4 m。因此,本文所使用的基于高斯核函数的新型加权高斯相关熵时延估计算法与现有的方法相比,在电缆故障定位中具有有良好的抗脉冲噪声能力,定位精准,性能优越,也为混沌扩频时延估计算法定位提供了新方法。

参考文献

[1] 涂俊杰. 基于混沌测试信号的飞机线缆故障定位研究[D].

西安:西安电子科技大学,2013.
TU J J. Research on fault location of aircraft cable based on chaotic test signal [D]. Xi'an:Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2013.
[2] KIM T H, JEON J C. Diagnosis of poor contact fault in the power cable using SSTDR [J]. The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2016, 65(8): 1442-1449.
[3] SHI X, LIU Y, XU X, et al. Online detection of aircraft ARINC bus cable fault based on SSTDR [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 15(2): 2482-2491.
[4] 李胜辉,白雪,董鹤楠,等. 基于小波与栈式稀疏自编码器的电力电缆早期故障定位方法研究[J]. 国外电子测量技术,2019,38(5):146-151.
LI SH H, BAI X, DONG H N. Research on early fault location method of power cable based on wavelet and stack sparse self encoder [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38 (5): 146-151.
[5] 丁雅博. 脉冲噪声下循环平稳信号的时延估计[D]. 大连:大连海事大学,2019.
DING Y B. Time delay estimation of cyclostationary signals under impulsive noise [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2019.
[6] 李辉,郝如江. 基于循环多核相关熵的故障检测方法及应用[J]. 仪器仪表学报,2020,41(5):252-260.
LI H, HAO R J. Fault detection method based on cyclic multi-core correlation entropy and its application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41 (5): 252-260.
[7] 陈梦,行鸿彦,王海峰. 脉冲噪声下基于 NAT 函数的 LFM 信号多径时延估计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022,36(7):73-81.
CHEN M, XING H Y, WANG H F. Multipath time delay estimation of LFM signal based on NAT function under impulse noise [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (7): 73-81.
[8] 申海霞. 基于混沌序列的 SSTDR 检测方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
SHEN H X. Research on SSTDR detection method based on chaotic sequence [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2011.
[9] 邢毓华,郑琦. 广义互相关在混沌扩频时延估计中的研究与应用[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(23): 43-49.
XING Y H, ZHENG Q. Research and application of generalized cross-correlation in chaotic spread spectrum time delay estimation [J]. Progress in Laser and

- Optoelectronics, 2021, 58 (23): 43-49.
- [10] 邢毓华, 闫志恒. 三阶累积量在混沌扩频时延估计中的研究与应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 171-177.
XING Y H, YAN ZH H. Research and application of third-order cumulants in chaotic spread spectrum time delay estimation [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2022, 59(19): 171-177.
- [11] 汤勇, 熊兴中. 基于分数低阶统计量的时延估计算法比较[J]. 电子测量技术, 2014, 37(8): 65-69.
TANG Y, XIONG X ZH. Comparison of time delay estimation algorithms based on fractional lower order statistics [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(8): 65-69.
- [12] 梁栋辉. 基于反射测量法的低压电网故障定位技术研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.
LIANG D H. Research on fault location technology of low-voltage power grid based on reflection measurement [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [13] 陈鹏辉. Alpha 稳定分布噪声下的 LFM 信号参数估计方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
CHEN P H. Research on LFM signal parameter estimation method under alpha stable distribution noise [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2021.
- [14] 吴志江. 飞机电缆间歇性故障检测方法研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(17): 35-39.
WU ZH J. Research on detection methods of intermittent faults in aircraft cables [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(17): 35-39.
- [15] 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 generalized cyclic correlation entropy time delay estimation method [J]. Journal of Electronics and Information, 2021, 43(2): 255-262.
- [16] 丁剑飞, 孙德春, 李兆刚. 基于压缩感知的电力线脉冲噪声抑制改进算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S2): 289-290.
DING J F, SUN D CH, LI ZH G. An improved algorithm for power line impulse noise suppression based on compressed sensing [J]. Computer Application Research, 2020, 37(S2): 289-290.
- [17] XIONG Q, ZHANG W H, XU Y H. Alpha-stable distribution and multifractal detrended fluctuation analysis-based fault diagnosis method application for axle box bearings [J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 1-12.
- [18] 王鹏, 邱天爽, 任福全. 对称稳定分布噪声下基于广义相关熵的 DOA 估计新方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(8): 2007-2013.
WANG P, QIU T SH, REN F Q. A new DOA estimation method based on generalized correlation entropy under symmetric and stable distribution noise [J]. Journal of Electronics and Information, 2016, 38(8): 2007-2013.
- [19] 李亚刚. Alpha 稳定分布下的 LFM 信号参数估计方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
LI Y G. Study on LFM signal parameter estimation method under Alpha stable distribution [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2020.

作者简介



邢毓华, 1990 年于西安理工大学获得学士学位, 1998 年于西安理工大学获得硕士学位, 现为西安理工大学副教授, 主要研究方向为通信电子技术及物联网大数据处理。

E-mail: xyh@xaut.edu.cn

Xing Yuhua received his B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 1990, M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 1998 respectively. Now he is an associate professor in Xi'an University of Technology. His main research interests include communication electronic technology and Internet of things big data processing.



顾力铭 (通信作者), 2021 年于盐城工学院获得学士学位, 现为西安理工大学研究生, 主要研究方向为信号处理及故障诊断。

E-mail: xiaozhutizi0059@163.com

Gu Liming (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Yancheng Institute of Technology in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in Xi'an University of Technology. His main research interest includes signal processing.