

激光与光电子学进展

三阶累积量在混沌扩频时延估计中的研究与应用

邢毓华, 闫志恒*

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 针对混沌扩频时延估计中,使用现有方法运算结果峰值旁瓣比较低,且存在误判点较多,低信噪比导致线缆故障信号时延估计困难的问题,提出三阶累积量一维切片结合二次相关的时延估计新方法。将该方法应用于混沌时延估计中的 Simulink 仿真模型中,仿真结果表明,与现有的基本互相关、二次相关方法相比,该方法不仅可以在较低的信噪比下获得良好的估计效果,而且可以抑制相关背景噪声和非高斯噪声的干扰。其运算结果相比基本互相关运算结果主峰值旁瓣比绝对值增加了 1.70 dB 以上,误判峰值与故障点峰值比减少了 0.133 以上。该方法为混沌扩频检测光缆故障及其电缆故障提供了一种新的技术途径。

关键词 傅里叶光学与信号处理; 时延估计; 混沌扩频; 三阶累积量; 互相关

中图分类号

文献标志码

DOI: 10.3788/LOP202259.1907001

Research and Application of Third-Order Cumulants in Delay Estimation of Chaotic Spread Spectrum

Xing Yuhua, Yan Zhiheng*

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China

Abstract The chaotic spread spectrum time delay estimation is a challenge posed by low peak parameterization when using existing methods. Furthermore, more potential misclassification spots and poor signal-to-noise ratio (SNR) hinders cable fault signal time delay estimation. Therefore, this study proposes a new delay estimation approach that integrate the third-order cumulative one-dimensional slicing with quadratic correlation. In chaotic time delay estimation, this method was used to the Simulink simulation model. The results obtained via the simulation show that the proposed method could obtain good estimation results at lower SNR while suppressing the interference of correlated background and non-Gaussian noise when compared with existing basic intercorrelation and quadratic correlation methods. Its operation increases the absolute value of the primary peak-to-parameter ratio by more than 1.70 dB and decreases the false peak-to-fault point peak ratio by more than 0.133 when compared with the basic intercorrelation operation. This method introduces a novel technical approach for detecting fiber optic cable faults and their cable faults using chaotic spread spectrum detection.

Key words Fourier optics and signal processing; time delay estimation; chaotic spread spectrum; third-order cumulants; cross-correlation

1 引言

时延是指在信号传输过程中由发送端到信号接收端因距离而产生的时间差。而运用混沌扩频时延估计来实现目标定位,对于光缆故障检测以及电缆故障检测有着十分重要的研究意义^[1]。在信号处理领域,不少学者致力于对时延测量的精确度进行研究。时延估计常常受到各种噪声的干扰,因此直接影响信号检测

的准确性。由于光缆和电缆故障检测对定位精度要求相对较高,混沌扩频检测方法的关键环节就是对反射信号进行故障距离的估算,因此选择合适的时延估计算法来处理复杂噪声环境下对微弱信号进行准确识别,以减小定位误差和提高检测效率至关重要^[2]。时延估计算法的本质是将两路信号进行相似度比较,从而判别两路信号之间的时延。现在常用扩频时延估计的方法包括基本互相关、广义互相关、二次相关以及他

收稿日期: 2021-12-20; 修回日期: 2022-01-29; 录用日期: 2022-02-28

通信作者: *yzh7595@163.com

们的改进算法^[3]。文献[4]提出广义相关法,该方法在基本互相关的基础上将相关函数变换到频域,在传输信道中对信号进行预滤波处理,很大程度抑制了噪声对信号的影响。文献[5]与文献[6]在时延估计法中验证广义互相关,使用不同类型的加权函数对信号功率谱进行处理,锐化了互相关波形的峰值点。文献[7]将广义互相关运用在混沌扩频系统中,验证了平滑相关变换窗(SCOT加权函数)运算结果优于其他两种常用的加权函数。在实际应用中当接收的信号信噪比较低或者背景为有色噪声时,该算法并不能满足精确测距的要求。针对基本互相关和广义互相关算法在实际环境中受混响噪声干扰,导致时延估计精度较差的问题,文献[8]提出二次相关时延估计算法,其过程是两路信号分别进行一次自相关和互相关运算,将结果作为新信号再进行二次互相关,其优势是将相关值不为零的噪声分量在很大程度上进行了削弱,有效降低了峰值旁瓣比,达到峰值锐化的作用。研究者们又提出最小均方(LMS)自适应算法,但是该算法目前仅适用于实验阶段,且算法对于权函数的选择较为复杂,对环境适应性要求较高^[9]。

随着信息处理领域内数学工具的不断发展,累积量作为一个高信噪比的变换域,把接收到的含有高斯噪声的非高斯信号变换到累积量或累积量谱域进行处理,可以剔除噪声的影响。由于高阶累积量对高斯噪声具有不敏感的特性,其高斯随机噪声的三阶及以上的累积量为零^[10],理论上,高阶累积量能完全抑制高斯

随机噪声,在一定程度上对非高斯有色噪声信号也有抑制作用。高阶累积量在统计上表现出来的优越性和可行性,使其能更好地描述噪声的概率特性^[11-13]。综上所述,在混沌扩频时延计中使用高阶累积量的相关性可实现故障定位。

本文主要研究混沌扩频时延估计算法在线缆故障检测中的应用^[14]。提出一种将三阶累积量的一维切片结合二次相关理论作为时延估计的新方法,主要通过将接收到的两路信号分别进行自相关和互相关运算处理来抑制部分系统高斯噪声,然后利用三阶累积量的性质对信号再次处理抑制相关噪声,提高接收信号的信噪比^[15]。解决了在信噪比较低的情况下,反射信号被背景噪声淹没而无法准确判断故障位置的问题。

2 基本原理

2.1 混沌扩频时延估计原理

混沌扩频时延估计的原理如图1所示,首先产生混沌序列二值量化后经过二进制相移键控(BPSK)调制后分两路信号,一路为扩频测试信号发送至待测线缆中,另一路为延时信号;当检测信号遇到线缆阻抗失配点即故障发生点,信号在该点发生反射,将反射信号与延时后的信号进行相关分析,利用相关算法估算出测试信号从发出到返回接收端的传输时间,得到两路信号的相关性即可从中判断出故障点位置以及故障类型^[16]。

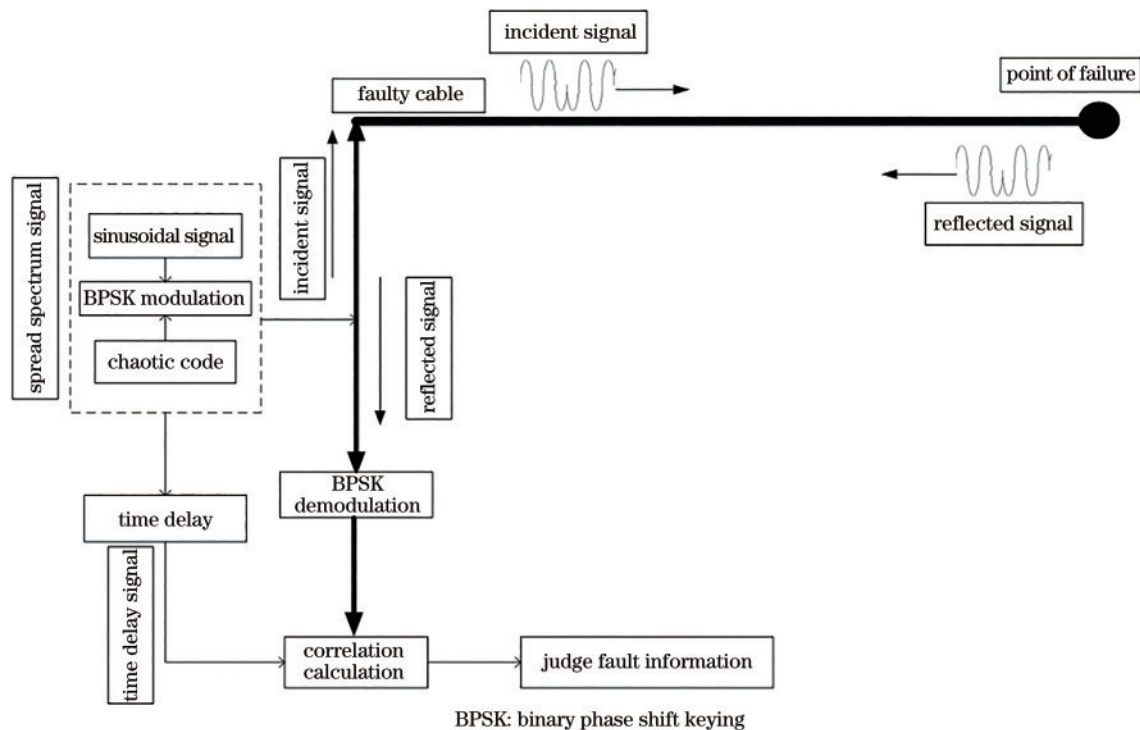


图1 混沌扩频时延估计原理图

Fig. 1 Schematic diagram of chaotic spread spectrum delay estimation

2.2 基本互相关时延估计

线缆故障检测的关键环节是对反射信号进行故障距离估算,通过选择合适的时延估计算法,可以在复杂噪声环境下对微弱信号进行准确识别,缩小定位误差,提高测量精度。这一部分结合 Matlab 中的 Simulink 仿真平台搭建混沌扩频时延估计的仿真模型^[17],重点在于对两路信号的数据进行采集,接收信号存在时间延迟和幅值衰减,满足上述假设的接收信号的模型为

$$x_1(n) = s(n) + n_1(n), \quad (1)$$

$$x_2(n) = \alpha s(n - D) + n_2(n), \quad (2)$$

式中: $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 分别为接收到的两路信号; $s(n)$ 为系统传输中有用的测试信号; α 为信号衰减系数; D 为信号在信道中的传输时延; $n_1(n)$ 和 $n_2(n)$ 分别为两路信号中的加性噪声。

基本互相关算法是对所接收到的两路信号进行相关分析来获得它们之间的时延信息,互相关时延估计算法为

$$R_{12}(\tau) = E[x_1(n)x_2(n + \tau)] = \{E[s(n) + n_1(n)][s(n + \tau - D) + n_2(n + \tau)]\} = \alpha R_{ss}(\tau - D) + \alpha R_{sn_1}(\tau - D) + R_{sn_2}(\tau) + R_{n_1n_2}(\tau), \quad (3)$$

式中: R_{12} 为两路接收信号的相关函数; R_{ss} 为接收的无噪声干扰信号的相关函数; R_{sn_1} 和 R_{sn_2} 分别表示两路接收信号与噪声之间的相关函数; $R_{n_1n_2}$ 表示接收信号噪声的相关函数。只有在 $n_1(n)$ 和 $n_2(n)$ 为加性理想高斯噪声的情况下,测试信号 $s(n)$ 与噪声信号两两互不相关,此时式(3)有 $R_{sn_1}(\tau - D) = 0$ 、 $R_{sn_2}(\tau) = 0$ 和 $R_{n_1n_2}(\tau) = 0$ 。将基本互相关公式化简为

$$R_{12}(\tau) = \alpha R_{ss}(\tau - D). \quad (4)$$

通过互相关的数学公式可知,测试信号和接收信号的互相关函数结果的最大值时刻就是时延即 $R_{12}(\tau)$ 函数波形在 $t = D$ 时出现明显峰值点的时刻,即可通

过互相关的峰值检测来获取混沌扩频系统中的时延估计信息。

2.3 基于三阶累积量的时延估计

实际应用当中,背景噪声可能与有用信号相关,并非理想的高斯噪声。对于式(1)和式(2)中含有噪声信号 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$,其自三阶累积量与互三阶累积量分别定义为

$$C_{x_1x_1x_1}(t_1, t_2) = \text{Cum}[x_1(n), x_1(n + t_1), x_1(n + t_2)], \quad (5)$$

$$C_{x_1x_2x_1}(t_1, t_2) = \text{Cum}[x_1(n), x_2(n + t_1), x_1(n + t_2)], \quad (6)$$

式中, $\text{Cum}(\dots)$ 表示累积量函数。将式(1)和式(2)分别代入式(5)和式(6)可得

$$C_{x_1x_1x_1}(\tau_1, \tau_2) = \text{Cum}[s(n) + n_1(n), s(n + \tau_1) + n_1(n + \tau_1), s(n + \tau_2) + n_1(n + \tau_2)], \quad (7)$$

$$C_{x_1x_2x_1}(\tau_1, \tau_2) = \text{Cum}[s(n) + n_1(n), \alpha s(n - D + \tau_1) + n_2(n + \tau_1), s(n + \tau_2) + n_1(n + \tau_2)]. \quad (8)$$

根据高阶累积量的性质,能够有效降低其估计方差,并且三阶及以上累积量能够有效压制高斯噪声信号。式(7)和式(8)可化简为

$$C_{x_1x_1x_1}(\tau_1, \tau_2) = C_{sss}(\tau_1, \tau_2), \quad (9)$$

$$C_{x_1x_2x_1}(\tau_1, \tau_2) = C_{sss}(\tau_1 - D, \tau_2). \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可以看出,由于高斯噪声的高阶累积量为零, $C_{x_1x_1x_1}(\tau_1, \tau_2)$ 和 $C_{x_1x_2x_1}(\tau_1, \tau_2)$ 的高斯成分得到有效抑制,根据高阶累积量的叠加性进一步推导,考虑到三阶累积量的计算量较大,令式(9)和式(10)中的 $\tau_2 = 0$,进一步得到三阶累积量的一维切片分量分别为

$$C_{x_1x_1x_1}(\tau_1, 0) = C_{sss}(\tau_1, 0), \quad (11)$$

$$C_{x_1x_2x_1}(\tau_1, 0) = C_{sss}(\tau_1 - D, 0). \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可得三阶累积量的一维分量函数,其中仍然保留抑制噪声的特性,只是在运算量上有所降低。对比式(11)和式(12)发现,互三阶累积量 $C_{x_1x_2x_1}(\tau_1, 0)$ 是在自三阶累积量 $C_{x_1x_1x_1}(\tau_1, 0)$ 时间上的延迟。可以将其上述两式看作时域中的两路新信号,

依据二次相关原理,对新信号求互相关函数,其结果出现的峰值点对应延时长。

2.4 本文算法在混沌扩频时延估计中的应用

首先将接收到的测试信号和反射信号分别进行一次自相关和互相关运算,来抑制部分的高斯白噪声,再分别求其自三阶累积量与互三阶累积量的值,为了满足实时性估计的要求,其三阶累积量的一维切片与互相关运算同属于一个数量级,其运算效率并不会降低;将结果作为两路新的函数,再进行第二次互相关计算,通过峰值检测以及故障距离公式计算故障点的位置。

具体原理如图2所示:1)由 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 计算自三阶累积量和互三阶累积量的一维切片 $C_{x_1x_1x_1}(\tau_1, 0)$ 和 $C_{x_1x_2x_1}(\tau_1, 0)$;2)将一维切片中的 τ_1 变换成 n 得到两个只有一个变量的新信号 $x_3(n)$ 和 $x_4(n)$,然后求其两个新信号的相关函数 $R_{x_3x_4}$;3)对步骤2)的结果进行峰值检测,峰值所在位置的横坐标就是其对应的时延值。

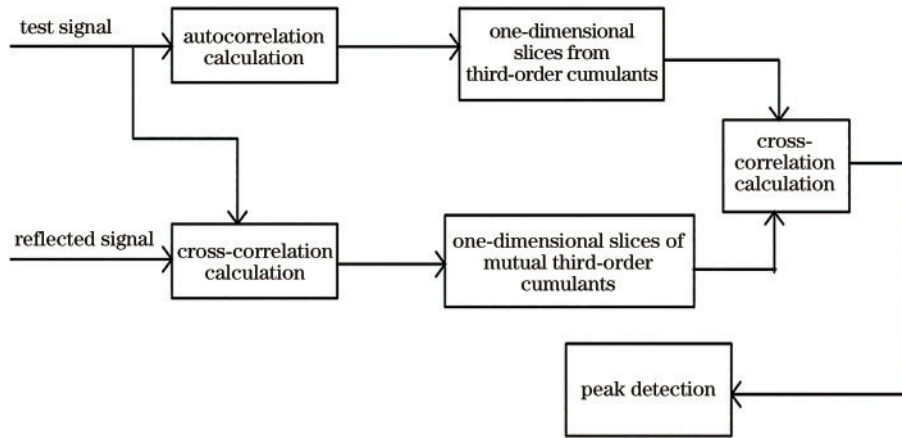


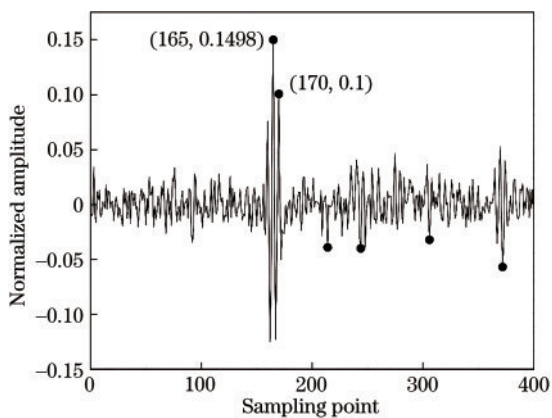
图 2 混沌扩频系统时延估计算法流程图

Fig. 2 Flow chart of chaotic spread spectrum delay estimation algorithm

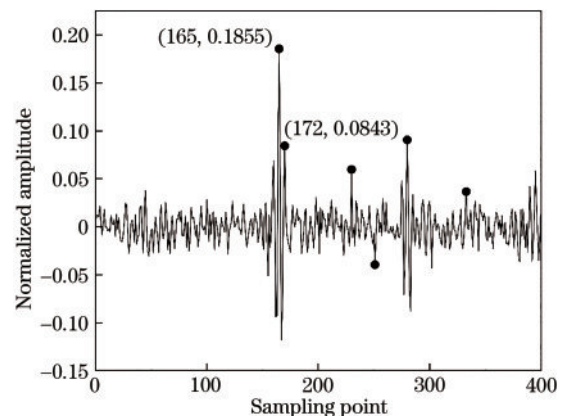
3 三阶累积量在混沌扩频时延估计中的应用

本文仿真基于 Simulink 平台,在该平台中搭建了混沌扩频时延估计的仿真模型。其中包括混沌序列生成模块、BPSK 调制与解调模块、线缆故障设置模块和相关运算模块等。在该仿真平台分别搭建线缆的短路故障和开路故障模型,验证基本互相关与本文运用的算法优势。

由 Simulink 仿真模型输出数据作为分析信息源,采样频率为 5 MHz,采样时间设置为 2×10^{-7} s。如图 3、图 4 所示,信噪比为 -5 dB 时,基本互相关方法应用在混沌扩频时延估计中检测线缆短路故障和开路故障,可从中看出其旁瓣值峰值较高,并出现多个误判点,一定程度上影响了定位精度的判别。

图 3 短路故障基本互相关运算结果(信噪比为 -5 dB)Fig. 3 Results of basic cross-correlation calculation of short-circuit faults [signal-to-noise ratio (SNR) is -5 dB]

针对基本相关算法存在抗噪声性能较差以及定位精度不佳的问题,在基本互相关的基础上,提出二次相关。基本思想是先求测试信号的自相关函数,可以有效地抑制一部分噪声,再将两路信号的互相关函数做

图 4 开路故障基本互相关运算结果(信噪比为 -5 dB)Fig. 4 Results of basic cross-correlation calculation of open-circuit faults (SNR is -5 dB)

一次互相关运算,并通过峰值检测来估计时延值。如图 5、图 6 所示,在同等信息源数据的条件下,信噪比为 -5 dB 时,二次互相关在混沌扩频时延估计算法检测线缆短路故障和开路故障,可从中看出其旁瓣值峰值较高,而相对于基本互相关误判峰数量减少,但仍对故障判别有所影响。

图 7、图 8 是信噪比为 -5 dB 相同背景噪声环境下,线缆短路故障和开路故障运用三阶累积量一维切片结合二次相关时延估计算法计算得到的波形图。可以明显看出,主峰值和次高峰较为明显,主峰旁瓣值稍许降低,并且由噪声产生的误判峰抑制效果较好,容易定位线缆故障位置点。

图 9 是在相关背景噪声以及不同信噪比环境下,基于基本互相关、二次相关和本文所提方法进行了 500 次蒙特卡罗实验所得到的时延估计均方根误差结果。从图中可以分析得出在低信噪比条件下,基本互相关时延估计算法的误差最大,二次相关时延估计算法较基本互相关法有部分提高;而在相同背景噪声的情况下,本文方法的均方根误差小于其他两种方法,特别是在信噪比为 -5 dB 时效果突出;3 种方法综合

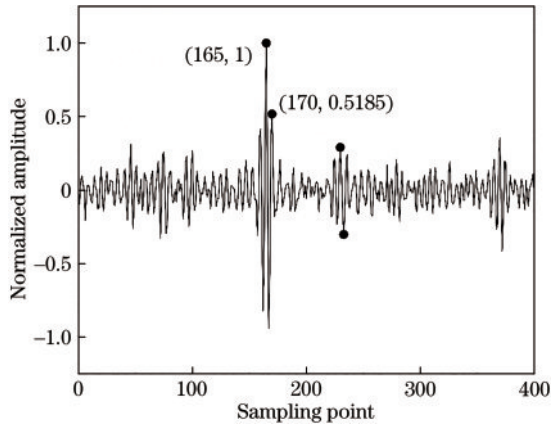


图 5 短路故障二次互相关运算结果(信噪比为 -5 dB)
Fig. 5 Results of secondary cross-correlation calculation of short-circuit faults (SNR is -5 dB)

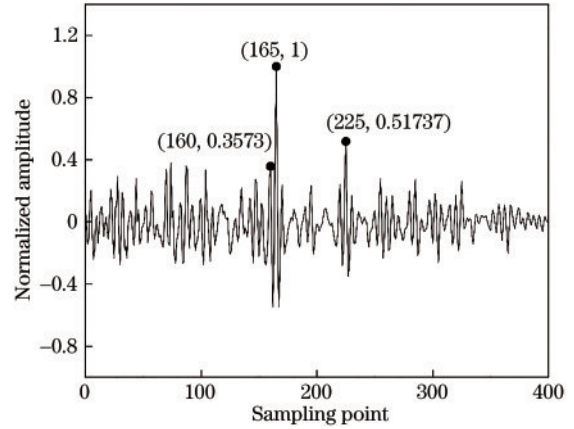


图 8 开路故障三阶累积量相关峰
Fig. 8 Correlation peak of third-order cumulants of open-circuit faults

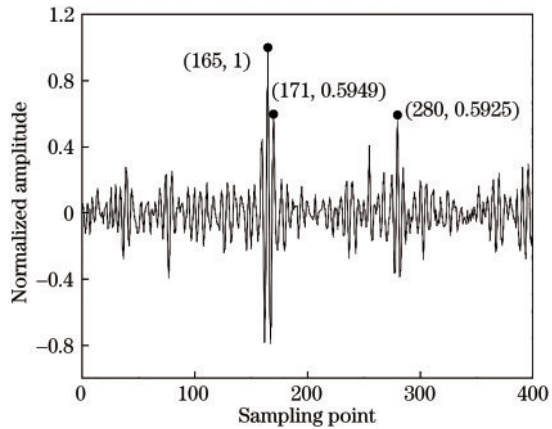


图 6 开路故障二次互相关运算结果(信噪比为 -5 dB)
Fig. 6 Results of secondary cross-correlation calculation of open-circuit faults (SNR is -5 dB)

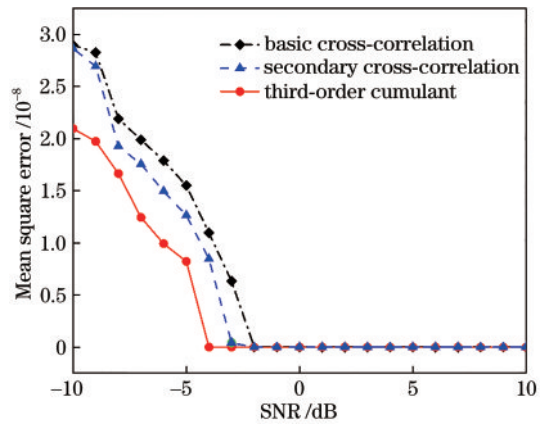


图 9 3 种方法的误差曲线
Fig. 9 Error curves of three methods

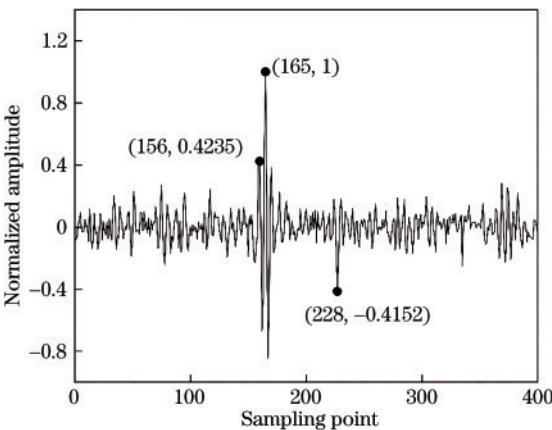


图 7 短路故障三阶累积量相关峰
Fig. 7 Correlation peaks of third-order cumulants of short-circuit faults

在信噪比较高的环境下的误差很小。因此在低信噪比环境下,三阶累积量结合二次相关运算具有一定优势。

4 仿真结果分析与讨论

综合以上仿真结果,将三阶累积量一维切片方法运用在混沌时延估计算法中,当信噪比为 -5 dB 时经过多次实验将结果取其平均值,并与基本互相关结果形成对比,其运算结果综合在表 1 中。

表 1 中,主峰值旁瓣比 R_{PSLR} 的计算公式为

$$R_{PSLR} = 10 \times \log\left(\frac{P_0}{P_1}\right), \quad (13)$$

式中: P_0 表示旁瓣幅值; P_1 表示主瓣峰值,因此由式(13)可看出, R_{PSLR} 计算结果为负,并且其绝对值越大,表示旁瓣越小。

最大误判点峰值与故障点峰值比的计算公式为

$$N = \frac{N_1}{N_0}, \quad (14)$$

式中: N 表示最大误判点峰值与真实故障点峰值的比值,这里将其定义为误判峰值比; N_1 为最大误判点峰值; N_0 为定位故障点峰值,从式(14)可看出,比值越大,误判点越明显。

表 1 时延估计仿真统计结果

Table 1 Simulation statistical results of time delay estimation

Fault type	Calculation method	Main peak sidelobe ratio R_{PSLR} /dB	Misjudgment peak ratio
Open-circuit fault	Cross-correlation	-2.2557	0.6877
	Secondary correlation	-3.4251	0.6585
	Proposed method	-4.4696	0.5256
Short-circuit fault	Cross-correlation	-2.0357	0.9795
	Secondary correlation	-2.8533	0.6248
	Proposed method	-3.7314	0.5977

分析表 1 中数据可知,在信噪比为 -5 dB 条件下,对基本互相关、二次相关与本文所提算法进行比较,综合图 3~8 的波形图可知,一个运算结果图中有两个明显的峰值,其最高峰即两路信号的一次自相关结果,主峰值右侧的次高峰与最高点存在时间差即时延估计值。3 种方法主峰值点都较明显,但是本文所提算法生成的结果图中可以看出定位峰值点较现有算法更明显,其主峰值旁瓣比明显降低,误判峰也相应改善。结果表明,在同一信噪比条件下,混沌扩频时延估计系统中,无论是线缆短路故障还是开路故障实验,本文提出算法对噪声都有一定的抑制作用,定位效果更好。

5 结 论

针对现有的基本互相关和二次相关运算在混沌扩频时延估计中,出现主峰值旁瓣值较大以及误判点多等问题,提出一种将三阶累积量一维切片结合二次相关进行时延估计的方法。该方法可以实现在信噪比较低的情况下,准确地对线缆故障进行定位,并有效地抑制实际应用中的各种噪声。通过 Simulink 平台建模并在高噪声背景下进行仿真实验,对时延估计算法做出了分析比较。经过计算,提出方法与基本互相关运算相比,在开路故障中,主峰值旁瓣比增加 2.21 dB,误判峰值比减少了 0.133;在短路故障中,主峰值旁瓣比增加 1.70 dB,误判峰值比减少了 0.382。故验证了在低信噪比高斯白噪声条件下,三阶累积量一维切片结合二次相关运算进行时延估计,比现有方法对线缆故障的定位效果更加显著,并为混沌扩频时延估计算法定位线缆故障提供了新方法。

参 考 文 献

- [1] 刘雪松. 混沌扩频通信系统及其干扰技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009: 13-19.
Liu X S. Research on chaotic spread spectrum communication system and its interference technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009: 13-19.
- [2] Hu S Y, Wang L, Gao C, et al. Non-intrusive cable fault diagnosis based on inductive directional coupling[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3724-3735.
- [3] 唐泽恬, 丁召, 曾瑞敏, 等. 基于改进的 Harris 和二次归一化互相关的量子图像拼接算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101005.
- [4] Tang Z T, Ding Z, Zeng R M, et al. Quantum image stitching algorithm based on improved Harris and quadratic normalized cross correlation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 101005.
- [5] Knapp C, Carter G. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1976, 24(4): 320-327.
- [5] 景思源, 冯西安, 张亚辉. 广义互相关时延估计声定位算法研究[J]. 声学技术, 2014, 33(5): 464-468.
Jing S Y, Feng X, Zhang Y H. Study of a generalized cross-correlation time delay estimation based acoustic positioning algorithm[J]. Technical Acoustics, 2014, 33(5): 464-468.
- [6] 刘彤, 郭晓敏, 张浩杰, 等. 混沌激光光子互相关的分析与测量[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2414002.
Liu T, Guo X M, Zhang H J, et al. Analysis and measurement of photon cross-correlation of chaotic laser [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2414002.
- [7] 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): 2306001.
Xing Y H, Zheng Q. Research and application of generalized cross correlation in chaotic spread spectrum time delay estimation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2306001.
- [8] 刘禹彤. 铁路信号线缆故障在线检测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 30-40.
Liu Y T. Design of on-line detection system for railway signal cable fault[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 30-40.
- [9] 魏文亮, 茅玉龙. 一种基于 LMS 自适应滤波的互相关时延估计优化算法[J]. 电子科技, 2020, 33(6): 29-34.
Wei W L, Mao Y L. Cross-correlation time delay estimation optimization algorithm based on LMS adaptive filtering[J]. Electronic Science and Technology, 2020, 33(6): 29-34.
- [10] 温斐斐, 杨瑞峰, 郭晨霞, 等. 基于 SLA 高阶累积量的远近场混合源定位算法[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 230-234.
Wen F M, Yang R F, Guo C X, et al. Hybrid source location algorithm based on SLA high order cumulants [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 230-234.
- [11] 吕婧一. 高阶统计量分析及其应用研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014: 35-40.

- Lü J Y. High order statistics analysis and its applications[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014: 35-40.
- [12] 王猛. 基于高阶累积量的声矢量阵列信号 DOA 估计算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 31-48.
Wang M. Research on acoustic vector sensor array DOA estimation algorithm based on high order cumulants[D]. Changchun: Jilin University, 2017: 31-48.
- [13] Tian N L, Ling B W K, Wu C Z, et al. Determination of fractional pixel location via an optimal group delay estimation approach[J]. Signal, Image and Video Processing, 2019, 13(8): 1477-1485.
- [14] 乔翊, 马珺, 张建国. 面向混沌光时域反射仪的混沌光源设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 021201.
Qiao Y, Ma J, Zhang J G. Design of chaotic light source for chaos optical time domain reflectometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 021201.
- [15] 张亚斌, 赵哲, 颜康, 等. 基于三阶累积量的水声信号时延估计研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2019, 36(2): 227-233.
Zhang Y B, Zhao Z, Yan K, et al. Research on time-delay estimation of underwater acoustic signals based on three-order cumulants[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2019, 36(2): 227-233.
- [16] 申海霞. 基于混沌序列的 SSTD 检测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011: 43-55.
Shen H X. Spread-spectrum time-domain reflectometer method based on chaotic sequences[D]. Xi'an: Xidian University, 2011: 43-55.
- [17] 范一鸣, 杨亚涛, 许永涛. 基于混沌序列的 Simulink 扩频通信仿真[J]. 计算机科学, 2009, 36(3): 106-108, 111.
Fan Y M, Yang Y T, Xu Y T. Simulink spread spectrum communication based on chaos sequence[J]. Computer Science, 2009, 36(3): 106-108, 111.