

激光与光电子学进展

广义互相关在混沌扩频时延估计中的 研究与应用

邢毓华, 郑琦*

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

摘要 在混沌扩频时延估计中,使用基本互相关的运算结果中会出现主峰值旁瓣比不理想、误判点峰值过高等问题。基于广义互相关(GCC)可以对信号进行前置滤波、适当消除接收信号中的噪声及干扰的影响,对广义互相关的三种常用加权函数进行分析,发现 SCOT 加权函数可以同时抑制发射信号与接收信号中的噪声。将三种常用加权函数应用于混沌时延估计的 Simulink 仿真模型中,仿真结果表明使用 SCOT 加权函数的广义互相关运算的结果优于基本互相关以及其他两种常用加权函数,其主峰值旁瓣比绝对值增加了 0.9 dB 以上,误判点峰值与故障点峰值比减少了 0.2 以上。

关键词 光通信; 混沌; 时延估计; 广义互相关; 互相关

中图分类号 TM93 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP202158.2306001

Research and Application of Generalized Cross Correlation in Chaotic Spread Spectrum Time Delay Estimation

Xing Yuhua, Zheng Qi*

*Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an 710048, China*

Abstract In the time delay estimation of chaotic spread spectra, the main peak to side lobe ratio obtained by using basic cross-correlation is not ideal, and the peak values of misjudged points are too large. Based on the advantages of generalized cross correlation (GCC) which can realize pre-filtering of signals and properly eliminate the influences of noise and interference in the received signal, we analyze three commonly used weighting functions of GCC, and we find that SCOT weighting function can suppress the noise of the transmitted signal and the received signal at the same time. Three commonly used weighting functions are applied to the Simulink simulation model of chaotic time delay estimation. The simulation results show that the results of generalized cross-correlation using SCOT weighting function are better than that of the basic cross-correlation and the other two commonly used weighting functions. Compared with the basic cross-correlation results, the main peak to side lobe ratio obtained by the generalized cross-correlation using SCOT weighting function increases by more than 0.9 dB, and the ratio of the peak value of the misjudgment point to the peak value of the fault point decreases by more than 0.2.

Key words optical communications; chaos; time delay estimation; generalized cross-correlation; cross-correlation

OCIS code 060.2330; 060.4510

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-03-09; 录用日期: 2021-03-17

通信作者: *787874200@qq.com

1 引言

混沌扩频时延估计常用于目标定位,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^[1-2]。混沌扩频时延估计的原理为:混沌码通过二进制相移键控(BPSK)调制之后被发送至待测信道,入射信号遇到阻抗不匹配点时,会产生反射信号^[3-5]。将反射信号与发射信号进行互相关运算,通过得到的两峰值之间的时间即可判断出故障点位置,对于电缆故障而言,根据第二峰值的正负可判断该故障为开路故障或短路故障^[6-11]。

国内外有许多学者针对扩频时延估计的相关算法进行了深入研究,文献[12]在基于伪随机序列的扩频时延估计中使用了广义互相关算法,其结果证明在扩频时延估计中,广义互相关运算的效果优于基本互相关算法,但目前时延估计领域多用混沌序列代替伪随机序列,该文献并未针对基于混沌序列的扩频时延估计进行详细研究。文献[13]在混沌扩频时延估计中使用了基本互相关算法,其结果表明混沌序列在扩频时延估计中的自相关与互相关运算存在峰值旁瓣过大、误判点过多等问题。文献[14]提出了一种基于自适应滤波以及最优化算法来优化扩频时延估计的互相关算法,但该方法目前只适用于实验阶段,无法应用在实际环境中。目前大多学者提出的优化算法只对伪随机序列作为源码的扩频时延估计进行了优化,而对混沌扩频时延估计的优化算法少之又少。

针对这些问题,在混沌扩频时延估计中使用广

义互相关代替互相关算法,采用广义互相关中的加权系数对互相关结果进行平滑,即在接收信号前进行前置滤波,适当消除噪声干扰的影响后再进行时延估计^[15-18],从而达到降低主峰值旁瓣、减少误判点的目的。文献[13]与文献[19]均使用基本互相关算法实现或仿真混沌扩频时延估计,因此本文将基本互相关法作为比对验证广义互相关算法在混沌扩频时延估计中的优越性。

本文通过对广义互相关算法在混沌扩频时延估计中的应用进行分析:1)对混沌扩频时延估计及其实现原理进行简要介绍;2)对基本互相关算法在混沌扩频时延估计应用中出现的问题进行验证;3)介绍了广义互相关中常用的加权函数,并将三种常用的加权函数应用于混沌扩频时延估计中,通过对运算结果的比对,得出 SCOT 加权函数更适用于混沌扩频时延估计系统的结论。

2 广义互相关在混沌扩频时延估计中的应用

2.1 仿真模型搭建

本文仿真基于 Simulink 平台,在 Simulink 平台中搭建了混沌扩频时延估计的仿真模型,其中包括混沌序列产生模块^[20]、二进制相移键控(BPSK)调制与解调模块和信道故障模块。由于电缆中存在开路故障以及短路故障,故信道故障模块分为开路故障模型以及短路故障模型。相关运算模块主要由 Simulink 输出数据至 Matlab,进行互相关以及广义互相关运算。Simulink 仿真模型示意图如图 1 所示。

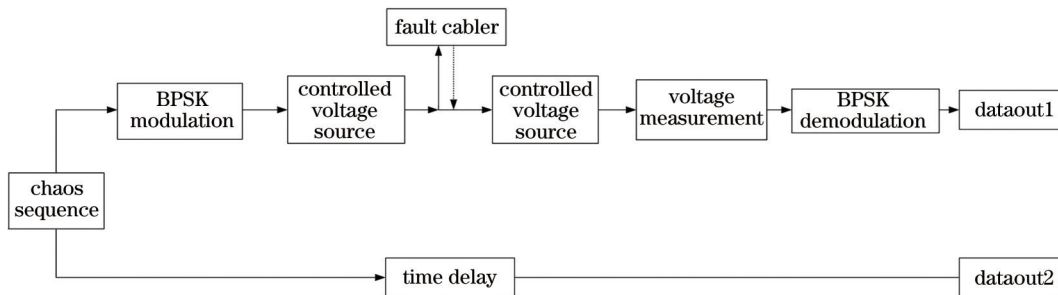


图 1 混沌扩频时延估计 Simulink 仿真模型

Fig. 1 Simulink simulation model of chaotic spread spectrum time delay estimation

2.2 基本互相关在混沌扩频时延估计中出现的问

假设 $x(n)$ 与 $y(n)$ 分别是发射信号与反射信号,那么 $x(n)$ 与 $y(n)$ 可表示为^[7]

$$\begin{cases} x(n) = s(n) + n_1(n) \\ y(n) = \sum_k a_k s(n-d) + n_2(n) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n_1(n)$ 与 $n_2(n)$ 为噪声; d 是信号在信道中的传输时延; $s(n)$ 为源信号; a_k 为衰减系数。将发射信号与反射信号进行互相关运算:

$$R_{xy}(\tau) = E \{ [s(n) + n_1(n)] [\sum_k a_k s(n-d) + n_2(n)] \} = \sum_k a_k R_{ss}(\tau-d) + \sum_k a_k R_{sn_1}(\tau-d) + R_{sn_2}(\tau) + R_{n_1n_2}(\tau), \quad (2)$$

式中： $R_{ss}(\tau-d)$ 为源信号的自相关函数； $R_{sn_1}(\tau-d)$ 为源信号与入射通道噪声的互相关函数； $R_{sn_2}(\tau)$ 为源信号与反射通道噪声的互相关函数； $R_{n_1n_2}(\tau)$ 为入射通道噪声与反射通道噪声的互相关函数。如果噪声均为加性噪声，则 $n_1(n)$ 、 $n_2(n)$ 与 $s(n)$ 两两互不相关，(2)式可简化为

$$R_{xy}(\tau) = \sum_k a_k R_{ss}(\tau-d). \quad (3)$$

由(3)式可知发射信号与反射信号的互相关函数在时间 d 处为最大值，该值即为延时模块的时延，由此可通过计算得到在混沌扩频时延估计中的定位距离。但实际应用中 $n_1(n)$ 、 $n_2(n)$ 与 $s(n)$ 并非两两互不相关，因此使用基本互相关运算会存在一定的噪声干扰。基本互相关算法的运算结果如图 2 所示。

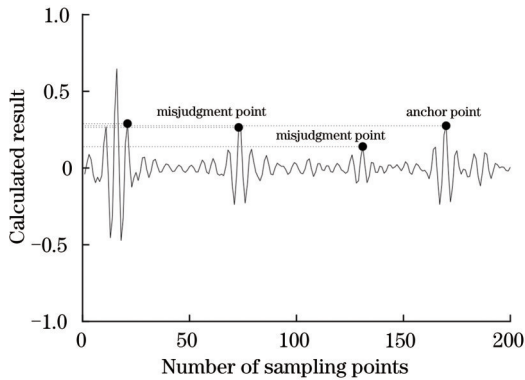


图 2 基本互相关运算结果

Fig. 2 Basic cross-correlation calculation results

若将混沌时延估计应用于电缆检测领域，则电缆出现短路故障时，基本互相关计算结果如图 3 所示。

由图 2 以及图 3 可知，将基本互相关运算应用于混沌扩展时延估计时，所得结果中存在误判点，并且峰值旁瓣较大，在时延定位中，定位点后出现了多个误判点，其主峰值旁瓣比 (PSLR) 为 -3.4925 dB。电缆短路故障定位中，同样存在主峰旁瓣较大的问题，其主峰值旁瓣比为 -3.4710 dB，同样由于反射路径问题，故障点后出现了多个误判点。

根据混沌扩频时延估计原理，基本互相关算法无法处理反射信号中的噪声，导致了误判点增多。

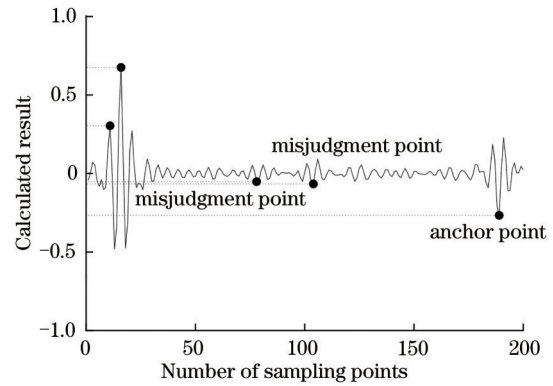


图 3 短路故障基本互相关运算结果

Fig. 3 Basic cross correlation calculation results of short circuit fault

而 PSLR 过高则会导致附近的检测目标被淹没和系统的检测盲区增大。为了解决这两个问题，本文采用广义互相关算法，通过加权系数进行平滑，从而达到减少误判点以及减小旁瓣的目的。

2.3 广义互相关的三种常用加权函数

广义互相关算法是对基本相关算法的改进，通过对接收信号进行前置滤波，适当消除接收信号中的噪声及干扰的影响，再进行互相关运算，从而提高时延估计的精度^[21]。由于互相关函数与互功率谱互为傅里叶变换对，互相关表达式为^[15]

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{xy}(\omega) e^{j2\pi\omega\tau} d\omega, \quad (4)$$

式中： $P_{xy}(\omega)$ 是 $x(n)$ 与 $y(n)$ 的互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 的傅里叶变换。

$x(n)$ 与 $y(n)$ 的广义互相关表达式为

$$R_{xy}^{(g)}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) P_{xy}(\omega) e^{j2\pi\omega\tau} d\omega, \quad (5)$$

式中： $W(\omega)$ 为广义互相关中的加权函数。

广义互相关算法中常用的加权函数有三个。

1) ROTH 加权函数

ROTH 加权函数相当于 Wiener 滤波，虽然会展示宽函数的峰，但是可以有效地抑制噪声大的频带。ROTH 加权函数的表达式为

$$W(\omega) = \frac{1}{P_{xx}}, \quad (6)$$

式中： P_{xx} 是入射信号的功率谱。

ROTH 加权函数的广义互相关表达式为

$$R_{xy}^{(R)}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{P_{xy}(\omega)}{P_{xx}(\omega)} e^{j2\pi\omega\tau} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{P_{ss}(\omega)}{P_{ss}(\omega) + P_{n_1n_1}} e^{j2\pi\omega\tau} d\omega \quad (7)$$

由(7)式可知,使用ROTH加权函数的广义互相关运算可减小基本互相关运算时 $P_{n_1n_1}$ 较大时的结果。但是ROTH加权函数只考虑到了一个通道的噪声,无法同时处理两个通道的噪声。

2) PHAT 加权函数

信号在能量较小时分母会趋于零,这增大了测量误差,PHAT加权函数就是通过在分母中加入一个固定常数,使得误差减小。PHAT加权函数的表达式为

$$W(\omega) = \frac{1}{|P_{xy}|} \quad (8)$$

因此使用PHAT加权函数的广义互相关表达式为

$$R_{xy}^{(P)} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{P_{xy}(\omega)}{|P_{xy}(\omega)|} e^{j2\pi\omega\tau} d\omega \quad (9)$$

由(9)式可知,当信号能量较小时,分母会趋于0,误差增大。

3) SCOT 加权函数

SCOT加权函数与PHAT加权函数都考虑两个通道的影响,即同时考虑入射信号与反射信号,但是当 $P_{xx} = P_{yy}$ 时,SCOT加权函数等价于ROTH加权函数^[22]。SCOT加权函数的表达式为

$$W(\omega) = \frac{1}{(P_{xx}P_{yy})^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

使用SCOT加权函数的广义互相关表达式为

$$R_{xy}^{(R)}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{P_{xy}(\omega)}{[P_{xx}(\omega)P_{yy}(\omega)]^{\frac{1}{2}}} e^{j2\pi\omega\tau} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{P_{ss}(\omega)}{[P_{ss}^2(\omega) + P_{n_1n_1}(\omega)P_{ss}(\omega) + P_{n_2n_2}(\omega)P_{ss}(\omega)]^{\frac{1}{2}}} e^{j2\pi\omega\tau} d\omega \quad (11)$$

由(11)式可以看出,使用SCOT加权函数的广义互相关可以同时减小两路噪声,因此在理论计算上SCOT加权函数更加适用于混沌扩频时延估计系统。

2.4 广义互相关算法在混沌扩频时延估计中的应用

1) ROTH 加权函数

将ROTH加权函数应用于混沌扩频时延估计中,在定位测距以及电缆短路故障定位下得到的运算结果分别如图4、5所示。

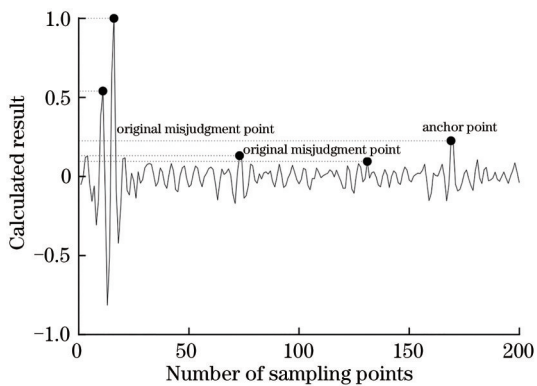


图4 ROTH加权函数在混沌扩频时延估计中的归一化运算结果(定位测距)

Fig. 4 Normalized results of ROTH weighting function in chaotic spread spectrum time delay estimation (positioning and ranging)

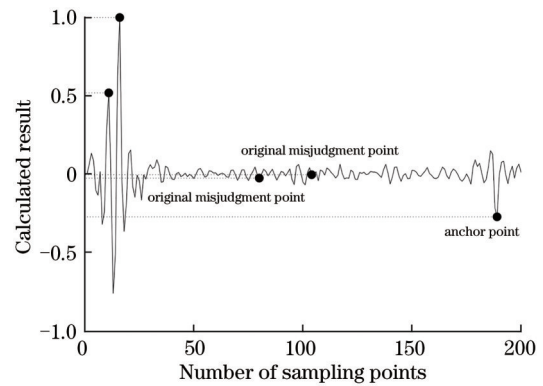


图5 ROTH加权函数在混沌扩频时延估计中归一化运算结果(电缆短路故障定位)

Fig. 5 Normalized results of ROTH weighting function in chaotic spread spectrum time delay estimation (cable short circuit fault location)

由图4与图5可以看出,无论在定位测距还是电缆短路故障定位中,虽然将ROTH加权函数使用在混沌扩频时延估计中得到的主峰值的旁瓣较大,但是各个由噪声产生的误判故障点峰值减小。在开路故障定位中,主峰值旁瓣比为-2.6731 dB;在短路故障定位中,主峰值旁瓣比为-2.8580 dB。

2) PHAT 加权函数

将PHAT加权函数应用于混沌扩展频谱时域反射法中,在定位测距以及电缆短路故障定位下得

到的运算结果分别如图 6、图 7 所示。

由图 6、图 7 可知,将 PHAT 加权函数应用于混沌扩展频谱时域反射法中,虽然得到的主峰值旁瓣比相比于 ROTH 加权函数较小,但是在开路故障中由于噪声产生的误判点过于明显,其最大误判点峰值幅度达到 0.3475。

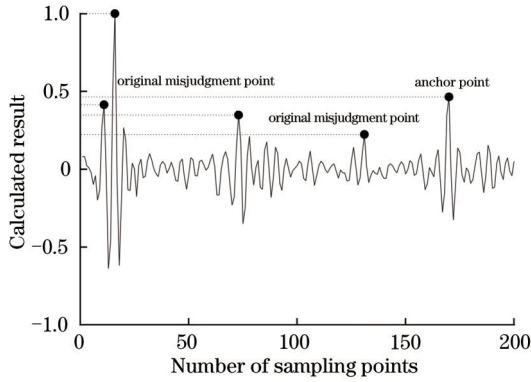


图 6 PHAT 加权函数在混沌扩频时延估计中的归一化运算结果 (定位测距)

Fig. 6 Normalized results of PATH weighting function in chaotic spread spectrum time delay estimation (positioning and ranging)

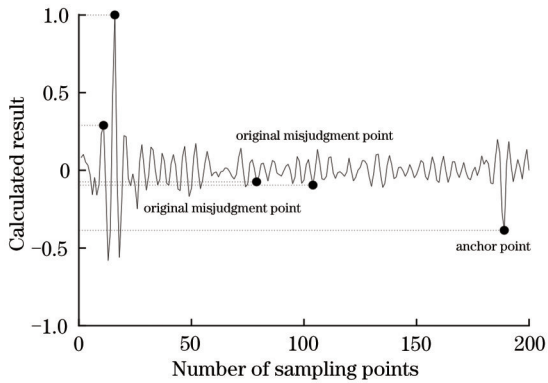


图 7 PHAT 加权函数在混沌扩频时延估计中的归一化运算结果 (电缆短路故障定位)

Fig. 7 Normalized results of PHAT weighting function in chaotic spread spectrum time delay estimation (cable short circuit fault location)

3) SCOT 加权函数

将 SCOT 加权函数应用于混沌扩频时延估计系统中,在定位测距以及电缆短路故障定位下得到的运算结果分别如图 8 以及图 9 所示。

从图 8 以及图 9 中可以看出,将 SCOT 函数应用于混沌扩展频谱时域反射法中得到的主峰值旁边比明显减小,并且对噪声引起误判的抑制效果良好。

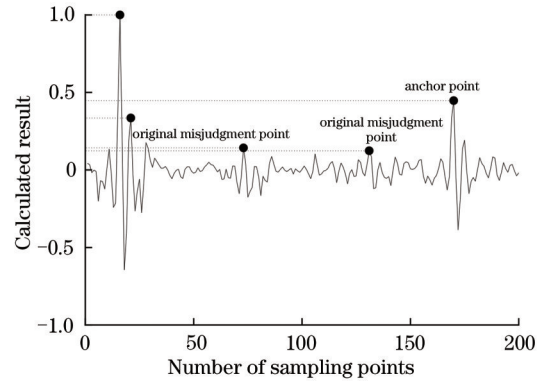


图 8 SCOT 加权函数在混沌扩频时延估计中的归一化运算结果 (定位测距)

Fig. 8 Normalized results of SCOT weighting function in chaotic spread spectrum time delay estimation (positioning and ranging)

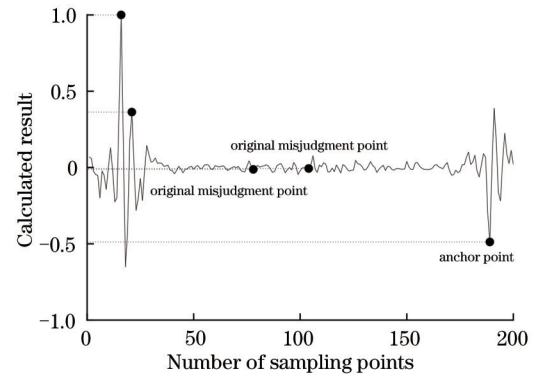


图 9 SCOT 加权函数在混沌扩频时延估计中的归一化运算结果 (电缆短路故障定位)

Fig. 9 Normalized results of SCOT weighting function in chaotic spread spectrum time delay estimation (cable short circuit fault location)

3 仿真结果分析与讨论

综上仿真结果,将 ROTH 加权函数、PHAT 加权函数以及 SCOT 加权函数的运算结果综合在表 1 中,并与基本互相关结果进行对比。

表 1 中,PSLR 的计算公式为

$$V_{PSLR} = 10 \times \lg \left(\frac{P_0}{P_1} \right), \quad (12)$$

式中: P_0 表示主峰旁瓣幅值; P_1 表示主峰峰值。因此由(12)式可看出,PSLR为负,并且其绝对值越大,说明旁瓣越小。

最大误判点峰值与定位点峰值比的计算公式为

$$N = \frac{N_1}{N_0}, \quad (13)$$

表 1 各个加权函数的运算结果与基本互相关运算结果的对比

Table 1 Comparison of calculation results of each weighting function with basic cross-correlation calculation results

Fault type	Operation type	Ratio of main peak to side lobe /dB	Ratio of maximum misjudgment point peak to fault point peak
Positioning and ranging	Basic cross correlation	-3.4925	0.9605
	ROTH weighting function	-2.6731	0.5840
	PHAT weighting function	-3.8292	0.7485
	SCOT weighting function	-4.7513	0.3180
Cable short circuit fault location	Basic cross correlation	-3.4710	0.2505
	ROTH weighting function	-2.8580	0.0984
	PHAT weighting function	-5.3877	0.2472
	SCOT weighting function	-4.4016	0.0252

式中： N 表示最大误判点峰值与故障点峰值的比值； N_1 为最大误判点峰值； N_0 为定位点峰值。因此由(13)式可以看出，比值越大，误判点越明显。

从表1中可以看出，基本互相关运算运用于电缆开路故障定位、定位测距以及电缆短路故障定位时得到的主峰值旁比优于ROTH加权函数，但其最大误判点峰值与故障点峰值比相较于广义互相关三种加权函数都较小。虽然使用ROTH加权函数得到的最大误判点峰值与故障点峰值比较小，但是其主峰值旁比结果在4种运算方法中最差。使用PHAT加权函数虽然在进行电缆短路故障测距时得到的主峰值旁比最大，但其他各项性能均表现一般，尤其在进行电缆开路故障定位或定位测距时使用PHAT加权函数得到的最大误判点峰值与故障点峰值比较小。而使用SCOT加权函数时，仅在短路故障测距时的主峰值旁比略低于PHAT加权函数，但相比于其他两种方法性能良好，并且在开路故障定位及定位测距中得到的主峰值旁比、最大误判点峰值与故障点峰值比，以及短路故障时的最大误判点峰值与故障点峰值比都大于其他三种方法。

综上，SCOT加权函数应用于混沌扩频时延估计系统时，无论在定位测距还是电缆短路故障定位中，得到的最大误判点峰值与故障点峰值比都高于其他方法。虽然在电缆短路故障定位中，SCOT加权函数的主峰值旁比略低于PHAT加权函数，但在其他方面都明显优于PHAT加权函数。

4 结 论

互相关运算应用于混沌扩频时延估计中，得到的主峰值旁比过大以及误判点峰值过高导致出现测量盲区增大以及易误判等问题。使用广义互相关算法代替互相关运算，通过对比广义互相关算法中不

同加权函数在混沌扩频时延估计中的运算结果，得出SCOT加权函数更优于其他运算方法的结论。SCOT加权函数减小了互相关运算结果中的主峰值旁瓣以及误判点的峰值，使得利用混沌序列在扩频时延估计中得到的结果更加精确。在开路故障定位中，通过SCOT加权系数进行平滑后的互相关运算结果中，主峰值旁瓣比绝对值增加了1.2588 dB，误判点峰值与故障点峰值比减小了0.6425；在短路故障定位中，主峰值旁瓣比绝对值增加了0.9306 dB，误判点峰值与故障点峰值比减小了0.2253。

参 考 文 献

- [1] Shen H X. Spread-spectrum time-domain reflectometer method based on chaotic sequences[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
申海霞. 基于混沌序列的SSTD R检测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [2] Yang Y Q, Yang L Z, Lü Y H, et al. Foreign object detection in intralipid solution using cross-correlation peak of chaotic laser[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0614001.
杨永强, 杨玲珍, 吕艺辉, 等. 基于混沌激光互相关峰值实现脂肪乳液内异质物的检测[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0614001.
- [3] Guan T Y. Theoretical and experimental study of spread spectral domain reflectometry[J]. The Journal of New Industrialization, 2014, 4(1): 84-89.
管天云. 扩展频谱时域反射法的理论与实验研究[J]. 新型工业化, 2014, 4(1): 84-89.
- [4] Zhu Z X. The research of railway signal cable fault on-line detection system based on the STDR/SSTD R method[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2012.
朱朝旭. 基于STDR/SSTD R的铁路信号电缆故障在线检测系统的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012.
- [5] Gao C. Research on cable fault diagnosis based on

- TDR/SSTDR[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- 高闯. 基于 TDR/SSTDR 电缆故障诊断方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [6] Zhou X C, Xiao C W, Wang C C, et al. Aircraft cable fault detection and location based on SSTDR[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(12): 1-6.
- 周训春, 肖楚琬, 王诚成, 等. 基于 SSTDR 的飞机电缆故障检测与定位[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(12): 1-6.
- [7] Zhou X C, Xiao C W, Liu Y, et al. Design of the sequence pulse source of aircraft cable fault location based on SSTDR[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(12): 91-96.
- 周训春, 肖楚琬, 刘勇, 等. 基于 SSTDR 的飞机电缆故障定位脉冲序列源设计[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(12): 91-96.
- [8] Wu Y, Zhuang H J, Li R, et al. Cable fault detection algorithm based on SSTDR[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018(11): 175, 177.
- 吴瑀, 庄红军, 李睿, 等. 基于 SSTDR 的线缆故障检测算法[J]. 现代制造技术与装备, 2018(11): 175, 177.
- [9] Li L L, Jiang Y, Liu Y H. Research on cable fault detection algorithm based on SSTDR[J]. Electronic Science and Technology, 2015, 28(8): 81-83, 90.
- 李乐乐, 江洋, 刘宇红. 基于 SSTDR 的线缆故障检测算法[J]. 电子科技, 2015, 28(8): 81-83, 90.
- [10] Liu X L, Yuan K. Design of fault diagnosis and localization system of aircraft wire based on cross-correlation algorithm[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(12): 3903-3905.
- 刘晓琳, 袁昆. 基于互相关算法的飞机导线故障诊断与定位系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(12): 3903-3905.
- [11] Song M P, Wu Y, Zhu W J, et al. Optical frequency scanning extension detection of coherent optical time domain reflectometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0410002.
- 宋牟平, 吴嫫, 朱伟基, 等. 相干光时域反射计的光频扫描扩展检测[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0410002.
- [12] Yu J. Research of power cable fault on-line detection based on spread-spectrum time-domain reflectometry method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- 余靖. 基于扩展频谱时域反射法的电力电缆故障在线检测研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [13] Mao J M, Wang L, Hu S Y, et al. Research on synchronous online diagnosis of multiple cable faults based on chaotic spread spectrum sequence[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(7): 1625-1632.
- 毛健美, 王莉, 胡苏阳, 等. 混沌扩频多根电缆故障在线同步诊断研究[J]. 电子学报, 2018, 46(7): 1625-1632.
- [14] Shi Q H, Kanoun O. A new algorithm for wire fault location using time-domain reflectometry[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(4): 1171-1178.
- [15] Sun Y, Xu K, Yang H L. Performance analysis of time-delay estimation based on generalized cross-correlation algorithm[J]. Computer & Digital Engineering, 2013, 41(1): 33-34, 144.
- 孙洋, 徐慨, 杨海亮. 基于广义互相关时延估计算法的性能分析[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(1): 33-34, 144.
- [16] Tang X M, Wu H, Liu Z K. Time-delay estimation based on generalized cross correlation[J]. Audio Engineering, 2009, 33(8): 71-74.
- 唐小明, 吴昊, 刘志坤. 基于广义互相关算法的时延估计研究[J]. 电声技术, 2009, 33(8): 71-74.
- [17] 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.
- [18] Jiao C, Zhang T, Sun J H. Convolutional neural network based indoor microphone array sound source localization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 081021.
- 焦琛, 张涛, 孙建红. 基于卷积神经网络的室内麦克风阵列声源定位算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 081021.
- [19] Su P C. Design and implementation of cable-fault detector based on chaos time-domain reflectometry[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- 苏鹏程. 基于混沌时域反射的电缆故障测试系统设计与实现[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [20] 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.
- 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.
- [21] Zhang X D. Modern signal processing[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- 张贤达. 现代信号处理[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [22] Carter G C, Nuttall A H, Cable P G. The smoothed coherence transform[J]. Proceedings of the IEEE, 1973, 61(10): 1497-1498.