

文章编号:1004-9037(2014)05-0815-06

基于改进的二次相关的铁路信号区间电缆故障检测

赵庶旭 孙守川 党建武

(兰州交通大学电子与信息工程学院,兰州,730070)

摘要:铁路信号电缆因跨度长、埋设地下等原因导致其故障判断难度大。通过讨论二次相关算法,并对其改进,完成其快速FFT算法实现及实时性能分析;基于改进的二次相关,建立了采用序列时域反射法/扩展频域时域反射法(Sequence time domain reflectometry/spread sequence time domain reflectometry,STDR/SSTDR)技术的信号电缆检测模型。通过仿真实验验证了在不同信噪比下STDR/SSTDR检测模型对铁路信号电缆开路、短路故障的检测能力,表明基于二次相关改进的SSTDR可用于信号区间电缆的故障检测。

关键词:信号电缆;STDR/SSTDR;故障检测;二次相关

中图分类号:TP206

文献标志码:A

Railway Signal Section Cable Fault Detection Based on Improved Second Correlation

Zhao Shuxu, Sun Shouchuan, Dang Jianwu

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, 730070, China)

Abstract: Railway signal cable is long and under ground, which leads to difficulties in cable fault detection. The second correlation method is improved. The improved computation model based on FFT is designed, and its real-time computation ability is analyzed. Based on the improved second correlation method, a signal cable sequence time domain reflectometry/spread sequence time domain reflectometry (STDR/SSTDR) detection model established. Moreover, the open and short circuit fault detection performance of the model is tested at various SNRs. The result shows that SSTDR based on the improved second correlation can be used to detect the signal section cable fault.

Key words: signal cable; STDR/SSTDR; fault detection; second correlation

引 言

列车运行速度和密度的不断提高,快速完成故障判断及定位对行车安全及效率具有重大意义。由于故障产生原因不同,导致信号电缆故障呈现多样性^[1]。目前,路上电务作业使用以脉冲电压法、脉冲电流法和电桥法等原理实现的手持设备为主,属于事故后的离线检测,影响行车效率,且对间歇性故障难以排查。实际运营中对信号电缆的检测需在不影响其正常工作的前提下进行,序列的时域反射法(Sequence time domain reflectometry, STDR)和扩展频谱时域反射法(Spread sequence time domain reflectometry, SSTDR)所发射的伪

随机序列具有白噪声均值为零的特性,不会干扰电缆中传输的工作信号,而且对噪音还具有很高的免疫能力^[2-4]。目前采用STDR/SSTDR对电缆故障检测研究主要是针对飞机、车站等局部短距离范围内的电缆检测技术及设计^[5-7]。

铁路信号区间电缆埋设地下,其检测需考虑其距离较长引起的精度问题,同时需在不影响所承载行车信号基础上完成检测。本文研究STDR/SSTDR故障检测方法,并通过改进时延估计算法,实现对铁路信号区间电缆实时检测。

1 时延估计算法

时延估计算法中相关算法具有计算量小,易于实现特点,而广义的相关只适用于低噪声或非相关

噪声场合^[8],容易出现多峰值^[9],同时具有时间估计精度不高的缺点^[10],为了能够在高噪声和高衰减下检测出微弱信号,本文运用二次相关并进行优化。

1.1 二次相关运算

二次相关运算是将两路信号的互相关运算与信号的自相关运算再做互相关运算^[11],原理如图 1 所示。

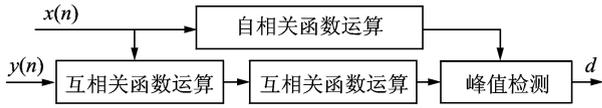


图 1 二次相关算法框图

Fig. 1 Second correlation algorithm

二次相关即以噪声信号 n 来代替 τ ,对 $R_{xx}(n)$ 与 $R_{xy}(n)$ 做互相关运算,其中 $k=1,2,\dots,n;d$ 为输出。

$$R_{RR}(\tau) = E[R_{xx}(n)R_{xy}(n+\tau)] = E\{[R_{ss}(n) + R_{sn_1}(n) + R_{sn_2}(n) + R_{n_1n_2}(n)] \cdot [\sum_k a_k R_{ss}(n-d+\tau) + \sum_k a_k R_{sn_1}(n-d+\tau) + R_{sn_2}(n+\tau) + R_{n_1n_2}(n+\tau)]\} \quad (1)$$

在噪声和信号不相关情况下,式(1)可化简为

$$R_{RR}(\tau) = E[R_{xx}(n)R_{xy}(n+\tau)] = E[R_{ss}(n) \cdot \sum_k a_k R_{ss}(n-d)] = \sum_k a_k R_{R_{ss}}(\tau-d) \quad (2)$$

1.2 二次相关算法改进

二次相关法进行时延估计,信噪比和信号带宽影响其测量精度,而量化误差取决于采样频率,一味的降低采样频率使相关峰值不被展宽。本文通过改进的二次相关算法锐化处理相关的峰值。

希尔伯特变换的定义如下

$$\hat{m}(t) = m(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{m(t)}{t-\tau} d\tau \quad (3)$$

由式(3)知, $h(t) = \frac{1}{\pi t}$ 是它的单位冲击响应,

可得到它的频率响应和相频响应为

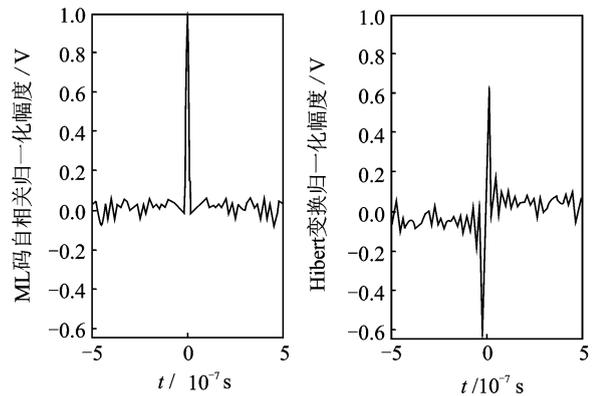
$$H(e^{j\omega}) = |H(e^{j\omega})| e^{j\omega\tau} = -j \operatorname{sgn}(\omega) = \begin{cases} j & \omega < 0 \\ -j & \omega > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} \pi/2 & \omega < 0 \\ -\pi/2 & \omega > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$R(\tau) = R_{RR}(\tau) - |\hat{R}_{RR}(\tau)| \quad (6)$$

从式(6)看出:信号通过希尔伯特变换器后,改变的只是信号的相位,把偶对称的相关函数 R_{xx}

(τ)转换为奇对称的相关函数 $\hat{R}_{xx}(\tau)$,可用过零检测来估计信号的延迟,减少了相关噪声叠加的影响。最长线性移位寄存器序列(Maximum linear shift register sequence, ML)的希尔伯特变换如图 2 所示,但受到干扰时,零值附近上下波动,出现多个过零点,导致实际过零点误判。若信号序列较长时,不可能只有一个过零点,过零检测较为困难,由此通过式(6)做差,再把过零检测转换为峰值检测,不仅可以用峰值检测来进行时延估计,而且峰值附近的值得到削弱,锐化了相关峰值,提升时延估计精度,达到提高检测精度的效果。具体过程如图 3 所示。



(a) ML自相关 (b) ML自相关的Hibert变换
(a) ML code auto-correlation (b) Hibert transform of ML code the auto-correlation

图 2 ML 序列的改进变换

Fig. 2 Improved ML sequence transformation

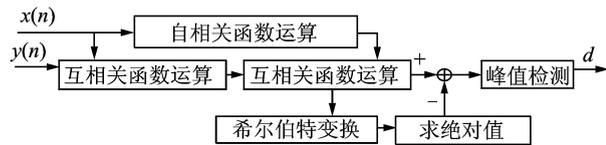


图 3 二次相关改进算法原理

Fig. 3 Improved second correlation algorithm

2 FFT 算法设计与性能分析

本文采用快速傅里叶变换(FFT)算法进行电缆故障的实时检测,如图 4 所示。

设采样数据长度为 N ,其中 $N=2^n$,则 FFT 算法下总的复加运算量为 $(10N+4)\log_2 N$,总的复乘运算量为 $(4N+4)\log_2 N+3N$ 。当 $N=1\ 024$, FPGA 平台下,选用型号为 EP2C50 的 Cyclone II 时,利用 FFT 的 IP 模块,对 $4N$ 点数据进行 FFT 变换,只需要 $87\ \mu\text{s}$,二次相关运算需 $384\ \mu\text{s}$,另外进行 $3N$ 次复加和 $3N$ 次复乘运算,共需要时间 $1\ \mu\text{s}$ 。

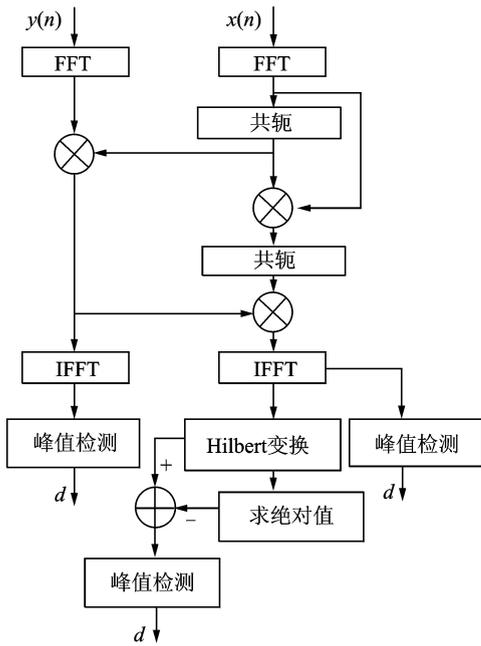


图 4 FFT 算法相关算法流程图

Fig. 4 Flow chart of related FFT algorithm

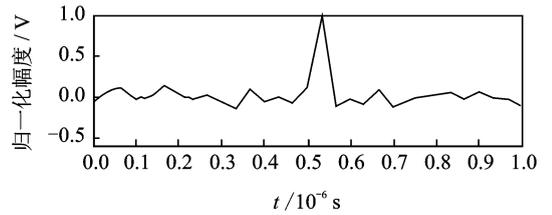
可见,使用 FPGA 进行处理,即便采样率较高,也能满足实时监测的要求。

采用二次相关改进建立模型,选用 STDR 作为测试信号,PN 码的长度为 63,采样频率为 30 MHz,采样间隔为 3.33×10^{-8} s,设置时间延迟为 5.2×10^{-7} s,不同信噪比情况下仿真结果如图 5,6 所示,表明了信噪比较高时,二次相关的峰值展宽的程度不明显,改进算法优势不大;信噪比较低时,二次相关的峰值被很大程度地展宽了,改进后二次相关锐化了相关值,可以提高延迟估计的精度。

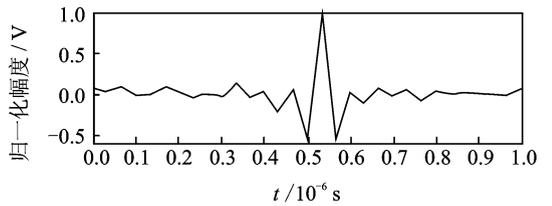
3 铁路信号电缆模型

3.1 模型参数

目前既有线信号电缆绝大多数信号线缆通过地面分线盒方式进行接续,分段长度为 1 km 以内,故系统最大测量长度设为 1 km,信号传播为 $2/3$ 倍光速,根据相关铁路电务单位现场电缆维修作业要求,假定检测精度为 ± 1 m,测量盲区为 5 m。信号采用移频键控调制信号(Frequency shift keying, FSK)为主,且 FSK 信号的调制频率 ω_1 与 ω_2 比较低,基带信号频率(载频)也较低,相对伪噪声(Pseudo noise, PN)码的发射频率来说,可以看作是低频信号。电缆中的正常工作信号 FSK 相对于测试信号来说,为噪声信号。由于测试信号的幅度相对于电缆的工作信号可以选择的



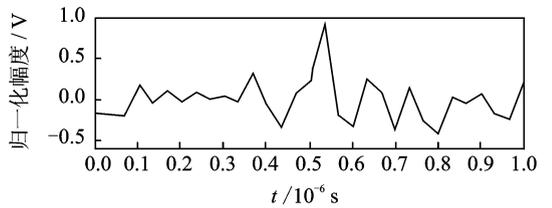
(a) 二次相关算法
(a) Second correlation algorithm



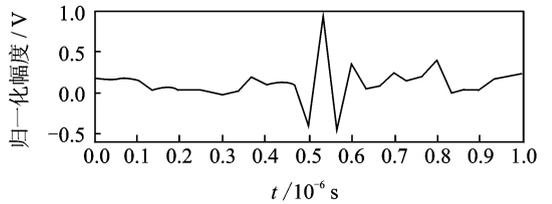
(b) Hilbert 的二次相关算法
(b) Hilbert second correlation algorithm

图 5 较高信噪比输出比较

Fig. 5 Output comparison in higher SNR



(a) 二次相关算法
(a) Second correlation algorithm



(b) Hilbert 的二次相关算法
(b) Hilbert second correlation algorithm

图 6 较低信噪比输出比较

Fig. 6 Output comparison in lower SNR

很小,故可采用 STDR/SSTDR 方法可以实现电缆故障的实时检测。

对于 PN 码的选择,ML, Gold, Walsh, Barke, Kasami 等线性伪随机序列比较适用于 STDR/SSTDR 方法。以单根信号电缆模型验证可知: Walsh 码自相关特性不明显,或缺少自相关单峰值; Barker 码的码长较短,抗干扰性能不佳; Kasami 和 Gold 序列具有较好的互相关属性,自相关性较 ML 码次之。本文选取 ML 码。

对 PN 码频率和码长选取涉及到检测的精度和盲区。提高频率,可提高精度,但发射频率太大,码长一定的情况下影响最大测量距离。根据测距式(7)和误差式(8),式中 f_s 为码片速率, N 为伪随机序列的长度, c 为信号传播速率,计算可知:在满足系统要求的情况下若 PN 码的发射频率取 30 MHz,PN 码的长度 N 为 511(即 $n=9$)时,测量误差 $\Delta d \approx 0.03 \text{ m} < 1 \text{ m}$,测量盲区 $d_{\min} \approx 3.33 \text{ m} < 4 \text{ m}$,该结果满足要求。

$$\frac{1}{2f}c \leq d \leq \frac{1}{2f}Nc \quad (7)$$

$$\Delta d = \frac{1}{2} |\tau - t_i| c = \frac{1}{200f}c \quad (8)$$

3.2 模型结构

铁路信号电缆 STDR/SSTDR 系统模块主要有信号发射模块、信号调制模块、电缆模块、信号隔离模块、高通滤波模块、相关运算模块等主要模块,结构模型如图 7 所示。

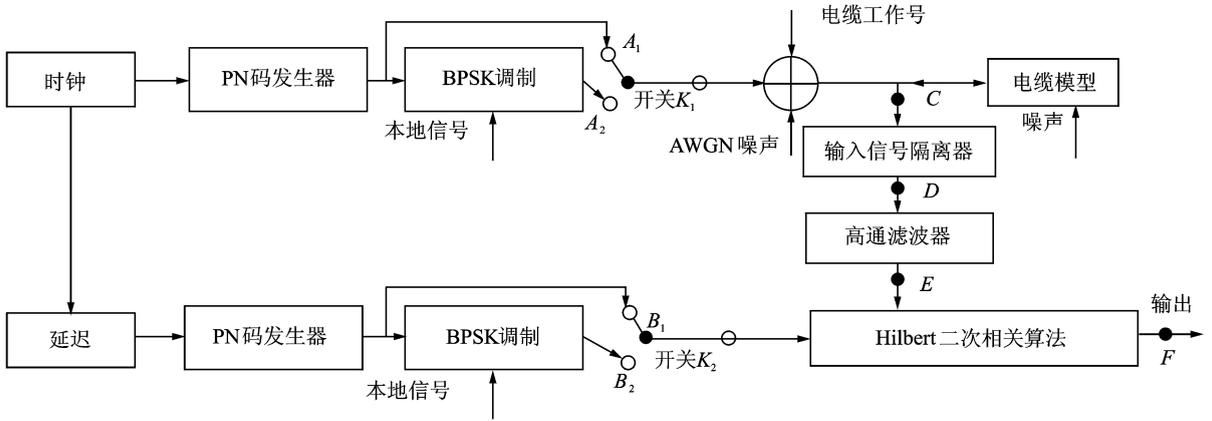


图 7 STDR/SSTDR 的结构模型

Fig. 7 Structural model of STDR/SSTDR

时钟驱动 PN 码发生器产生 PN 序列,开关 K_1 实现测试信号是 STDR 和 SSTDR 对 BPSK 调制的选择,产生由电缆工作信号、测试信号和噪声的混合信号。电缆故障发生时,C 点信号是故障反射信号与入射信号、工作信号和噪声相叠加的混合信号。相关运算之前,采用入射信号隔离器把入射信号隔离掉,同时加入高通滤波器把电缆的工作信号滤除。

4 仿真实验与分析

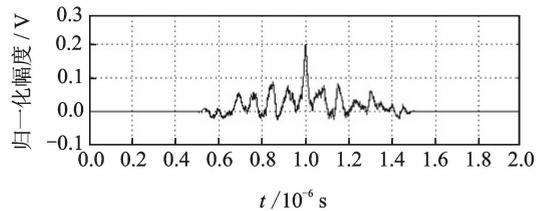
实验中采用贝杰龙分布参数模型,将两段待测电缆之间 100 m 处设置断路器。对于 STDR,采用前述设置,对于 SSTDR 方式,入射信号选用 PN 序列的 1:1 调制信号。

4.1 开路故障下仿真

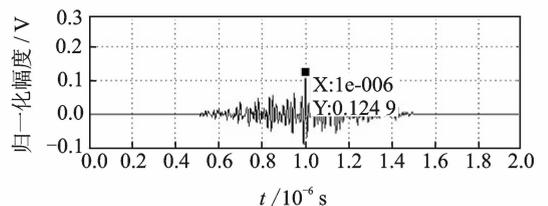
通过断路器的设置,把电缆设置为开路故障。在较高信噪比的情况下($\text{SNR} = -8 \text{ dB}$),D 点的信号是 C 点信号遇到电缆开路故障时,反射回来的信号,产生了幅度衰减,有一定的延迟,由于 FSK 信号相对发射信号来说为低频信号,可以采用高通滤波器滤除,即 E 点信号;将有一定延迟的本地参

考信号,即图中 B_1 和 B_2 处的信号,与 E 点做相关运算,得到 F 点信号波形如图 8 所示。

图 8 相关峰值表明:在信噪比较高情况下,相关峰值为正,故障类型为开路故障,STDR/SSTDR 方式都能较好地判断出故障类型,而且相关峰值也比较明显,STDR 方式,峰值为 0.192 6,延迟时间



(a) STDR



(b) SSTDR

图 8 较高信噪比下 STDR 与 SSTDR 相关波形

Fig. 8 Waveform of SSTDR and STDR in higher SNR

为 1×10^{-6} s; SSTDR 方式, 峰值为 0.124 9, 延迟时间为 1×10^{-6} s, 二者都能较好定位故障的位置。

信噪比较低情况下 ($SNR = -26$ dB), 波形如图 9 所示。测试信号、电缆工作信号和噪声信号混合在一起, 信号出现严重失真; STDR 方式, 相关峰值很微弱, 时间轴 1×10^{-6} s 处相关值不明显, 且相关峰值为负值, 偏离 1×10^{-6} s, STDR 不能进行故障判断和定位; SSTDR 方式, 在时间轴 1×10^{-6} s 处峰值明显, 可进行故障判断和定位, 这说明较低信噪比下 SSTDR 较 STDR 具有优势。

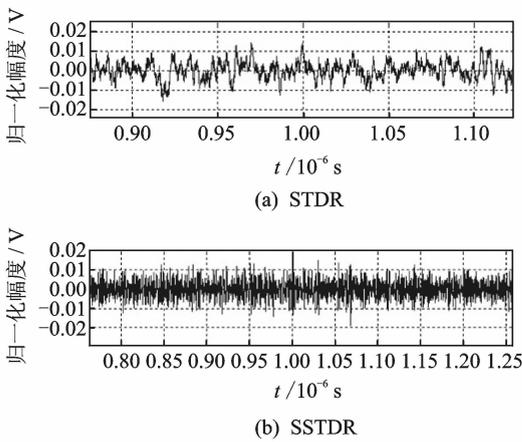


图 9 低信噪比下 STDR 与 SSTDR 相关波形

Fig. 9 Waveform of SSTDR and STDR in lower SNR

4.2 短路故障下的仿真

设置短路故障, 整个仿真的过程同开路故障时的仿真, 区别在于经过高通滤波器后的反射信号与原测试信号的相位相反, 这说明电缆发生了短路故障, 反射信号产生了延迟和衰减。将反射信号与延迟的本地参考做相关运算, 可得到图 10 所示的相关波形, 说明电缆发生短路故障。

二者都在时间轴 10×10^{-7} s 处有最大的峰值, 这与在故障 100 m 处算得时间延迟相一致, 再次说明二者在信噪比不太低的情况下都可以准确地进行故障的检测。短路信噪比较低的情况与开路故障的仿真一致, 可证明 SSTDR 较 STDR 具有优势。

5 结束语

本文针对铁路信号区间电缆的故障检测问题, 运用改进的二次相关运算, 完成 STDR/SSTDR 方式的检测模型设计, 并通过仿真实验验证在信号电缆故障检测中的可行性和可用性, 结果符合文献[3]关于 STDR/SSTDR 可用性结论描述, 同时运

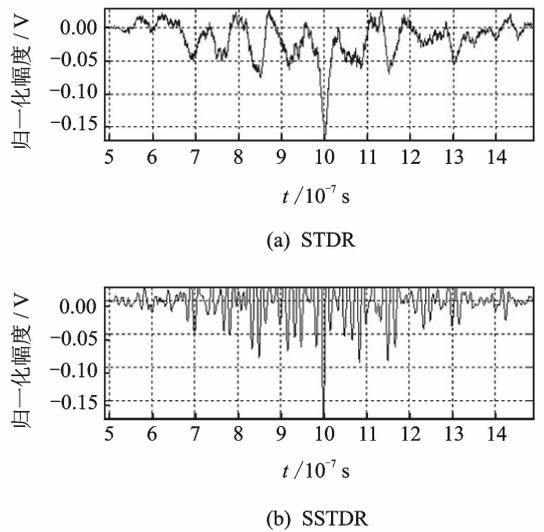


图 10 短路情况下 STDR 与 SSTDR 的相关波形

Fig. 10 Waveform of STDR and SSTDR for short circuit

用改进二次相关算法, 锐化了相关值。现场试验中结合电缆两端轮询检测方式, 将文献[4]的车站信号网络检测扩展到行车区间。

参考文献:

[1] 韩伯峰. 电力电缆试验及检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007:123-236.
Han Bofeng. Electric power cable test and detection technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007:123-236.

[2] Nishi E Y, Nishijima C, Kuwanami K. A method for fault detecting on twisted pair cable network by use of M sequence correlation[C]// The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Busan, Korea: IEEE, 2004: 1929-1934.

[3] Smith P, Furse C, Gunther J. Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location[J]. IEEE Sensors, 2005, 6(5):1469-1478.

[4] 张英杰. 扩展频谱反射射的原理及其应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010:11-43.
Zhang Yingjie. The principle of spread spectrum reflectometer and its application[D]. Xi'an: Xidian University, 2010:11-43.

[5] 荆涛, 张璐, 石旭东, 等. 一种新颖的飞机电缆故障类型诊断方法[J]. 自动化与仪表, 2009, (10):52-55.
Xing Tao, Zhang Lu, Shi Xudong, et al. A novel detecting method for aircraft cable defects[J]. Automation & Instrumentation, 2009, (10):52-55.

[6] 陈卫, 王莉. 航空电缆故障在线检测与定位技术研究[J]. 飞机设计, 2010, 30(2):62-67.

- Chen Wei, Wang Li. Low voltage network cable fault detection and location on-line technology research[J]. Aircraft Design, 2010,30(2):62-67.
- [7] 颜秋容,徐勋建. 铁路信号电缆网络故障在线检测系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2007, 11(4):45-46.
Yan Qiurong, Xu Xunjian. Design of railway signal cable network fault on-line detection system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2007, 11(4):45-46.
- [8] 崔玮玮,曹志刚,魏建强. 声源定位中的时延估计技术[J]. 数据采集与处理, 2007, 22(1):90-99.
Cui Weiwei, Cao Zhigang, Wei Jianqiang. Time delay estimation techniques in source location[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2007, 22(1):90-99.
- [9] 杨荣根,任明武,杨静宇. 漏泄信号定位中的时延估计算法[J]. 信息与控制, 2011,40(1):8-13.
Yang Ronggen, Ren Mingwu, Yang Jingyu. Time delay estimation algorithm for leak signal location [J]. Information and Control, 2011,40(1):8-13.
- [10] 唐娟,行鸿彦. 基于二次相关的时延估计方法[J]. 计算机工程, 2007, 33(21):265-267.
Tang Juan, Xing Hongyan. Time delay estimation based on second correlation[J]. Computer Engineering, 2007, 33(21):265-267.
- [11] 杜鹃,程播. 基于二次相关的时延估计方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010,30(6):221-223.
Du Juan, Cheng Lei. Time-delay estimation based on second correlation[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010,30(6):221-223.

作者简介:赵庶旭(1976-),男,博士,研究方向:交通信息系统工程与智能信息处理,E-mail:zhaosx_2012@163.com;孙守川(1989-),男,硕士研究生,研究方向:智能信息处理;党建武(1963-),男,教授,研究方向:智能信息处理与图形图像处理。