

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi. J2412922

基于信号分离的扩展频谱时域反射法盲区消除研究*

陈洪圳, 王莉, 徐昊, 杨善水

(南京航空航天大学自动化学院 南京 211106)

摘要:扩展频谱时域反射法进行线缆故障检测时,因检测盲区的存在而难以对近距离故障有效识别,这不仅减小了检测范围,也限制了其在实际应用中的广泛性。本文针对该方法中的盲区问题,深入分析盲区产生的机理,提出了一种基于信号分离的盲区消除方法。该方法基于入射信号与反射信号线性叠加的特性,通过数字信号处理中的减法运算,有效地实现了两者的分离,使得在盲区内准确地识别反射信号,提取故障信息。本方法通过数字信号处理技术来消除盲区,避免了硬件平台的改动,算法简单,易实现,适应场景广泛。实验结果显示,在中心频率为 62.5 MHz 的检测系统中,使用本方法进行开路和短路故障在线检测,其最大绝对误差仅为 0.16 m,充分验证了所提方法的有效性和实用性。

关键词: 线缆检测; 扩展频谱时域反射法; 盲区; 信号分离

中图分类号: TH7 TM93 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on blind spot elimination of spread spectrum time domain reflectometry based on signal separation

Chen Hongzhen, Wang Li, Xu Hao, Yang Shanshui

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: When using the spread spectrum time domain reflectometry for cable fault detection, it is difficult to effectively identify near-distance faults due to the presence of detection blind spot. This not only reduces the detection range but also limits its wide applicability in practical applications. In response to this issue, this paper thoroughly analyzes the mechanism behind the formation of blind spot, and proposes a signal separation-based method to eliminate them. Leveraging the linear superposition of incident and reflected signals, this method applies subtraction in digital signal processing to successfully separate the two signals, enabling accurate identification of reflected signals within the blind zone and extraction of fault information. This method eliminates blind spot through digital signal processing technology, avoiding changes to the hardware platform. The algorithm is simple, easy to implement, and adaptable to a wide range of scenarios. Experimental results show that using this method for online detection of open and short circuit faults in a detection system with a central frequency of 62.5 MHz, the maximum absolute error is only 0.16 m, fully demonstrating its effectiveness and practicality.

Keywords: cable detection; spread spectrum time domain reflectometry; blind spot; signal separation

0 引言

随着电气系统的复杂化和设备功能的不断拓展,线缆的使用量急剧增加,电气互联系统的复杂性也随之提升。由此,线缆的开路、短路等硬故障所带来的风险显著增加。采用反射法对线缆进行故障检测及定位,是快速

修复线缆系统的关键技术手段。然而,在检测地下线缆、密闭空间内的线缆,以及核辐射空间内的线缆等特殊情况下,由于停电拆卸线缆不便,离线检测方式的反射法无法适用;同时,离线状态也无法复现间歇性故障,因此离线检测方式的反射法在应用领域上受到较大的限制。

具备在线检测能力的反射法可以在系统运行过程中对线缆进行不停电检测,无需中断系统拆卸线缆,极大地

提高了检测的便捷性和效率。此外,可以识别断电时无法复现的间歇性故障,应用场景更加广泛。扩展频谱时域反射法(spread spectrum time domain reflectometry, SSTDR)^[1-3]因抗干扰能力强、定位精度高等特点^[4-5],是在线检测技术中的研究热点。然而,SSTDR在检测短距离故障时,入射信号和反射信号在相关运算波的旁瓣区域内叠加,导致反射信号难以识别,从而产生检测盲区^[6-7]。这一问题限制了SSTDR在短距离检测范围的应用,降低了其整体的检测效能。

针对反射法在线缆检测技术中的盲区问题,研究人员开展了一系列消除盲区的创新研究。在文献[8]中,研究者通过在待测线缆与检测设备之间增加额外的传输线,将待测线缆延伸至反射法检测盲区以外,实现了线缆的无盲区检测。然而,这种方法需要为不同类型的线缆匹配相应的传输线,且在低频检测信号下,产生的盲区较大,所需传输线长,限制了其在实际应用中的普适性。文献[9]针对时域脉冲反射法(time domain reflectometry, TDR)的盲区问题,提出了通过提高检测信号频率的方法,有效减小了检测盲区。该方法适用于多种反射法,也适用于SSTDR^[10],但未完全消除盲区,且由于需要高频检测信号,相应地增加了硬件成本。此外,高频窄脉冲易产生波形畸变,影响发射脉冲与反射脉冲时间间隔的精确测量。为了解决这一问题,文献[11]提出了一种差分宽脉冲TDR技术,该技术采用高速比较器测量发射脉冲和反射脉冲重叠部分的宽度,从而计算时间间隔,实现了盲区内有效检测。尽管该方法实施简便,但其高速比较器的阈值设定未考虑信号衰减因素,存在漏检风险,且该技术仅限于TDR,不适用于SSTDR。文献[12]在传统TDR的基础上,引入了多级小波分析和降噪技术,以识别盲区内由故障引起的瞬态变化,实现了盲区内的故障精确定位。然而,这种方法的实施相对复杂,涉及多个计算步骤,并且需要根据应用场景调整多个参数,增加了使用难度。

文献[13]针对时频域反射法(time-frequency domain reflectometry, TFDR)的盲区问题,研究了一种基于复小波变换的检测方法,通过复小波变换的线性特性分离参考信号和反射信号,减小了TFDR的检测盲区。研究中还采用了高斯扫频信号作为母小波,进一步提升了故障定位的精确度。尽管如此,复小波变换的引入也使得计算过程变得更加复杂,对计算资源的要求相应提高。

文献[14-15]通过比较无故障时的基线波形与实际故障检测波形的差异来识别故障点,理论上能检测盲区内的故障。但基线的稳定性会受线缆系统和环境因素的影响^[16],降低了其环境适应性。

文献[17]提出一种基于拟合故障波形消除盲区的方法,综合利用自相关波形、衰减系数、故障距离和故障

类型等参数拟合盲区内故障波形,从而实现盲区内故障有效检测。该方法消除了检测盲区,且避免了硬件平台的更改。但是,该方法需要准确计算线缆的衰减系数,应用难度较高。

在研究解决反射法盲区问题的过程中,已有的文献提出了多种具有独特优势的方法。然而,这些方法中有一些并不适用于SSTDR,同时它们在实际应用中面临高硬件成本、操作复杂性以及环境适应性不足等挑战。

针对SSTDR检测盲区的问题,本研究深入分析了盲区产生的根本原因,并提出了一种新颖的基于信号分离的盲区消除技术。该技术有效地将入射信号和反射信号分离,确保了故障信息的准确提取,实现了盲区内故障定位。本方法原理简明,实施过程简便易行,环境适应度高,无需增加额外的硬件成本。通过使用中心频率为62.5 MHz的检测系统进行在线测试,在系统对应的盲区范围内,故障定位的最大绝对误差仅为0.16 m,验证了本方法的有效性。

1 SSTDR 检测方法的盲区问题分析

1.1 SSTDR 的检测原理

基于SSTDR的线缆故障在线检测系统结构示意图如图1所示。

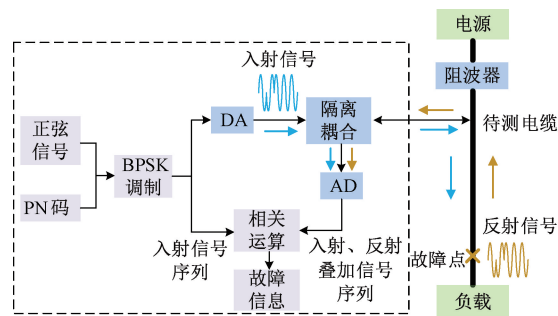


图1 基于SSTDR的线缆故障在线检测结构

Fig. 1 Schematic diagram of online cable fault detection structure based on SSTDR

该系统将正弦信号和伪噪声(pseudo noise, PN)序列进行二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK)调制,生成用于检测的入射信号。在这一过程中,PN序列经过扩频处理,带来了两个显著优势:一是提高了信号的中心频率,从而减少了入射信号在低频区域的频谱分布,有效减少了线缆原有信号和入射信号的频谱重叠,使两者互不干扰;二是扩频后的信号频谱得到了扩展,显著提升了系统的抗干扰能力。将 m 序列与正弦信号以1:1的比例进行BPSK调制,所得入射信号的自相关运算具有较小的旁瓣,是SSTDR中最为理想的入射信号选择^[7]。

在本研究的探讨范围内,均采用上述方式获得入射信号。

入射信号通过隔离耦合电路注入待测线缆,根据传输线原理,入射信号在阻抗不连续点产生反射。故障点的反射系数 Γ_L 主要与故障点阻抗值和线缆特征阻抗值有关,计算公式如式(1):

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

式中: Z_L 为故障点的阻抗; Z_0 为线缆的特征阻抗。将入射信号和反射信号进行相关运算,计算公式如式(2):

$$R_{xs}(\tau) = \int_0^{T_s} x(t) \cdot s(t - \tau) dt \quad (2)$$

式中: $s(t)$ 为入射信号; $x(t)$ 为反射信号; T_s 为入射信号周期。即:

$$T_s = NT_c \quad (3)$$

其中, T_c 为每个码片的时间长度, N 为 m 序列的码片数。

将相关运算结果进行归一化处理,获得故障检测波形,如图2所示。图中相关运算系数为1的波峰对应入射波头,次最大值的波峰对应反射波头。

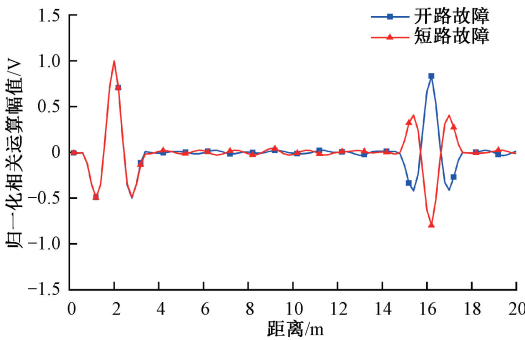


图2 基于SSTDR的线缆故障在线检测仿真波形

Fig. 2 Simulated waveform of online cable fault detection based on SSTDR

根据式(1)可知,当故障点阻抗值大于线缆特征阻抗值时, Γ_L 为正值,反射波头极性为正;反之,反射波头极性为负,以此判断故障类型。通过反射波头与入射波头的时间间隔,以及信号在线缆中的传播速度,计算故障距离。

根据SSTDR检测原理,检测系统的定位误差 d_c 与采样频率 f_n 、信号在线缆中的传播速度 v 相关,计算如式(4)^[7,18]所示。

$$d_c = \frac{1}{2}v \frac{1}{f_n} \quad (4)$$

1.2 SSTDR检测盲区产生的机理

设 $k[n]$ 为一个双极性的 m 序列,由本原多项式产生,元素只包含1和-1,长度为 N ,则双极性 m 序列的时域表达式为:

$$k(t) = \sum_{n=0}^{N-1} k[n]p(t - nT_c) \quad t \in [0, NT_c] \quad (5)$$

其中,

$$p(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_c \\ -1, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

按照自相关运算公式计算, m 序列的归一化自相关运算 $R_c(t)$ ^[19]为:

$$R_c(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{N+1}{NT_c}|\tau|, & |\tau| \leq T_c \\ -\frac{1}{N}, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其归一化自相关波形示意图如图3^[19]所示。

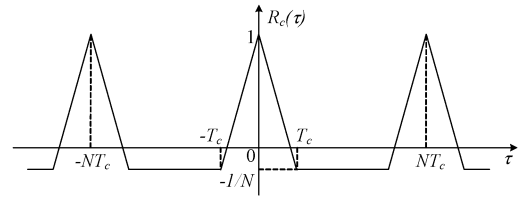


图3 m 序列归一化自相关运算波形示意图

Fig. 3 Schematic diagram of normalized autocorrelation operation waveform of m -sequence

从图中可以看到,在自相关波峰两边分别产生旁瓣,其旁瓣时间长度为一个码片的周期 T_c 。

SSTDR检测方法的入射信号 $s(t)$ 由正弦信号和 m 序列等比调制获得,其周期与 m 序列相同^[20],为 T_s 。

$$s(t) = A \sin \omega t \sum_{n=0}^{N-1} k[n]p(t - nT_c) \quad t \in [0, NT_c] \quad (8)$$

其中, A 为信号幅值; ω 为正弦信号的角频率。

根据定义,入射信号的自相关函数为:

$$R_s(\tau) = \int_0^{NT_c} s(t)s(t - \tau) dt =$$

$$\int_0^{NT_c} A \sin \omega t \cdot k(t) \cdot A \sin \omega(t - \tau) \cdot k(t - \tau) dt \quad (9)$$

由于 $k(t)$ 与正弦波相互独立,上式的结果为:

$$R_s(\tau) = R_{\sin}(\tau) R_c(\tau) \quad (10)$$

将 $R_c(t)$ 代入,可得:

$$R_s(\tau) = \begin{cases} \frac{A^2}{2} \cos \omega \tau \left(1 - \frac{N+1}{NT_c} |\tau| \right), & |\tau| \leq T_c \\ -\frac{A^2}{2N} \cos \omega \tau, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

由入射信号自相关运算 $R_s(t)$ 表达式(11)可知,在SSTDR检测系统中,入射信号与 m 序列自相关波形性质相似,同样会产生旁瓣,其旁瓣时间也是一个码片的时间 T_c 。若取SSTDR检测系统采样频率为码片速率的8倍,即:

$$f_n = 8f_c \quad (12)$$

在此条件下,盲区内存在8个采样点,其盲区示意图如图4所示。

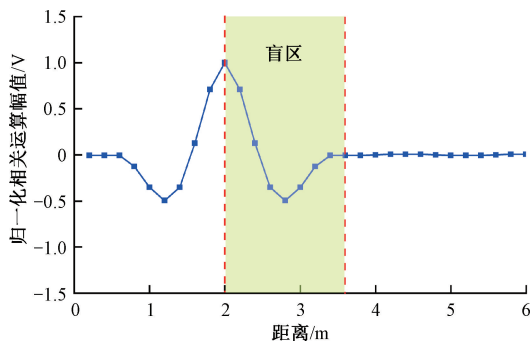


图4 盲区示意图

Fig.4 Blind spot illustration

盲区范围的计算公式为^[21]:

$$l_{\text{blind_spot}} = \frac{1}{2}vT_c \quad (13)$$

根据式(13)可知,随着 m 序列的 T_c 增加,SSTDR检测盲区扩大。

1.3 SSTDR 检测盲区的影响

根据 SSTDR 入射信号的自相关运算表达式(11),自相关函数在旁瓣内存在拐点。当反射波峰位于入射波自相关运算波形旁瓣内,与旁瓣相互叠加,改变了反射波峰的实际峰值,将导致反射波峰的误判。在 SSTDR 仿真系统中,设置信号传播速度 $v = 2 \times 10^8$ m/s,取码片速率 $f_c = 62.5$ MHz,采用8倍的采样频率,即 $f_n = 500$ MHz,系统的检测距离分辨率为0.2 m,检测盲区为1.6 m。在0.8 m处设置开路故障,仿真结果如图5所示。

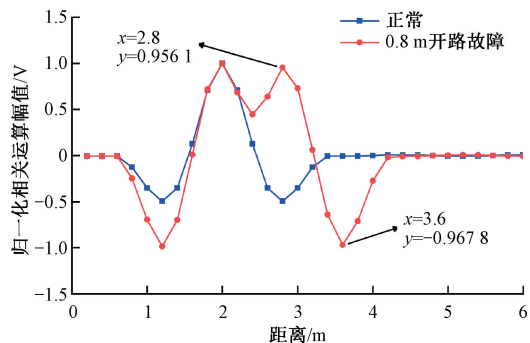


图5 0.8 m 开路故障仿真

Fig.5 0.8 m open circuit fault simulation diagram

从图中可以看到,入射波头距离原点2 m,故障点波头距离原点2.8 m,归一化的相关运算系数为0.9561;误判点波头距离原点3.6 m,归一化的相关运算系数为-0.9678。按照故障波头的识别原则,因误判点波头的

归一化相关运算系数绝对值大于实际故障点,所以造成故障波头的误判。

在0.4 m处设置短路故障,仿真结果如图6所示,图中已将正常波形与故障波形的起点对齐。

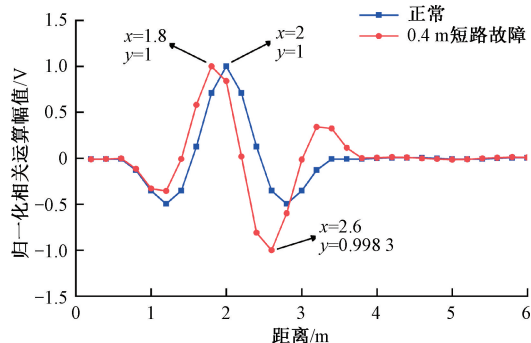


图6 0.4 m 短路故障仿真

Fig.6 0.4 m short circuit fault simulation diagram

从图中可以看到,故障波形中的入射波头距离原点1.8 m,而实际入射波头距离原点2 m,误判点波头距离原点2.6 m,归一化的相关运算系数为-0.9983,故障距离误判为0.8 m。反射波与入射波在旁瓣内的叠加,不仅导致了入射波峰位置发生偏移,也改变了实际故障点的相关运算系数幅值。

2 基于信号分离的 SSTDR 盲区消除技术

2.1 基于信号分离的 SSTDR 盲区消除理论基础

由均匀传输线波动方程的解,即式(14)可知,均匀传输线上任意一点电压、电流为入射波和反射行波电压、电流的线性叠加。

$$\left. \begin{aligned} U(x) &= A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x} \\ I(x) &= \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-\gamma x} - A_2 e^{\gamma x}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

在图1的 SSTDR 检测系统结构中,从待测线缆采样得到的信号 $x(t)$ 是入射信号、反射信号和噪声的线性叠加。因此,在考虑只有单一故障点的情况下, $x(t)$ 的表达式如式(15):

$$x(t) = s(t) + \alpha s(t - \tau) + n(t) \quad (15)$$

式中: α 表示故障点反射波的幅值系数,其值主要与故障点的反射系数、故障距离和传输常数有关^[22]。

$$\alpha = \Gamma e^{-2\gamma l} \quad (16)$$

其中, Γ 表示故障点的反射系数, γ 为待测电缆的传输常数, l 为第故障点的故障距离。

由式(15)可知,当 $t < \tau$ 时, $s(t - \tau)$ 的值为0, $x(t)$ 由入射信号和噪声信号组成,因此:

$$x(t) = \begin{cases} s(t) + n(t), & t < \tau \\ s(t) + \alpha s(t - \tau) + n(t), & t \geq \tau \end{cases} \quad (17)$$

通过仿真模型,获得检测端的采样信号包括故障情况波形和正常情况波形,如图7所示。通过两者波形对比,在反射波头未到达检测端时,检测点只采样到入射信号。当反射波头到达检测端时,检测点的采样信号是入射信号和反射信号的叠加。此结果与式(17)相符合。

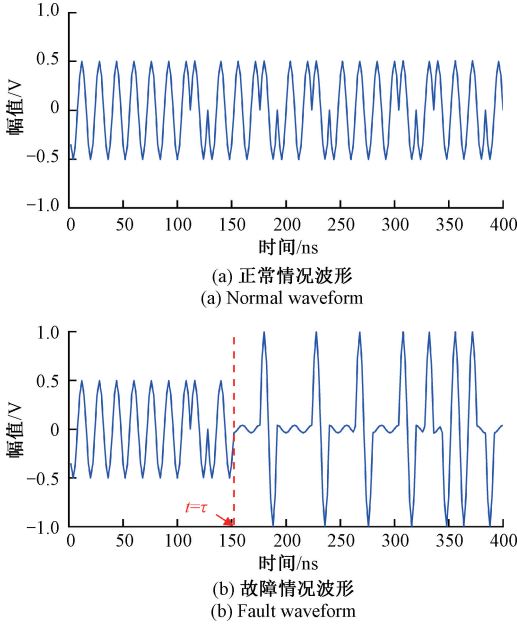


图7 检测端采样信号仿真

Fig.7 Detection end sampled signal simulation diagram

在下文讨论中,均已单一故障点作为研究情况。在数字系统中,将 $x(t)$ 以序列形式 $X(n)$ 进行表示:

$$X(n) = S(n) + \alpha S(n - n_\tau) + N(n) \quad n \in [0, N_f - 1] \quad (18)$$

其中, $S(n)$ 为注入到待测线缆的入射信号 $s(t)$ 的序列形式, N_f 表示一个周期内的采样点数:

$$N_f = N \frac{f_n}{f_c} \quad (19)$$

n_τ 为反射波与入射波之间的延时点数,则延时时间为:

$$\tau = \frac{n_\tau}{f_n} \quad (20)$$

$S_0(n)$ 为检测器内部由 BPSK 调制产生的原始入射信号序列,设检测器源阻抗为 Z_s ,待测线缆的特征阻抗为 Z_0 。根据分压原理, $S(n)$ 与 $S_0(n)$ 的幅值系数比 φ 为:

$$\varphi = \frac{Z_0}{Z_s + Z_0} \quad (21)$$

则,

$$S(n) = \varphi S_0(n) \quad (22)$$

$$X(n) = \varphi S_0(n) + \alpha \varphi S_0(n - n_\tau) + N(n) \quad (23)$$

将 $S_0(n)$ 和 $X(n)$ 进行相关运算,其值 $R_{xx}(m)$ 为:

$$R_{xx}(m) = \sum_{n=0}^{N_f-1} \varphi S_0(n) S_0((n-m))_N R_N(n) + \sum_{n=0}^{N_f-1} \alpha \varphi S_0(n - n_\tau) S_0((n-m))_N R_N(n) + \sum_{n=0}^{N_f-1} N(n) S_0((n-m))_N R_N(n) \quad (24)$$

从式(24)可知, $S_0(n)$ 和 $X(n)$ 的相关运算值由入射信号的自相关运算值、入射信号与反射信号的互相关运算值以及入射信号与噪声信号的互相关运算值组成。

因为 $N(n)$ 的周期远大于 $S_0(n)$ 的周期,所以 $S_0(n)$ 和 $N(n)$ 是异步的,同时 $S_0(n)$ 具有零均值特性^[23],所以 $S_0(n)$ 和 $X(n)$ 的相关运算值的期望为:

$$E\{R_{xx}(m)\} = \sum_{n=0}^{N_f-1} \varphi S_0(n) S_0((n-m))_N R_N(n) + \sum_{n=0}^{N_f-1} \alpha \varphi S_0(n - n_\tau) S_0((n-m))_N R_N(n) \quad (25)$$

在入射波峰与反射波峰的旁瓣区间外,

$$E\{R_{xx}(m)\} = \frac{\alpha \varphi}{2N} \cos \omega m \quad (26)$$

$R_{xx}(m)$ 的值主要由入射信号的自相关运算值、入射信号与反射信号的互相关运算值决定。

2.2 基于信号分离的盲区消除技术

鉴于入射信号、反射信号和噪声信号线性叠加的特性,本研究提出一种基于信号分离的盲区消除技术。其核心思想在于,首先利用入射序列与接收序列之间的互相关运算,识别入射信号序列在接收信号序列中的相对起始点;其次,根据相对起始点位置,通过接收信号序列减去入射信号序列,实现入射信号的分离,从而得到仅包含反射信号与噪声信号的剩余序列。最后,分别进行入射信号序列自相关运算和入射信号序列与剩余序列的互相关运算,根据互相关运算的波峰位置和极性提取故障信息。其工作流程如图8所示。

$$XS(n) = X(n) - \varphi S_0(n) = \varphi S_0(n) + \alpha \varphi S_0(n - n_\tau) + N(n) - \varphi S_0(n) = \alpha \varphi S_0(n - n_\tau) + N(n) \quad (27)$$

分离后 $XS(n)$ 只包含反射信号和噪声信号序列,再将 $S_0(n)$ 与 $S_0(n)$ 、 $XS(n)$ 分别进行相关运算,获得 $R_{ss}(m)$ 和 $R_{sxs}(m)$ 。

$$R_{ss}(m) = \sum_{n=1}^{N_f/f_c} S_0(n) S_0((n-m))_N R_N(n) \quad (28)$$

$$R_{sxs}(m) = \sum_{n=1}^{N_f/f_c} \alpha \varphi S_0(n - n_\tau) S_0((n-m))_N R_N(n) + \sum_{n=1}^{N_f/f_c} N(n) S_0((n-m))_N R_N(n) \quad (29)$$

$$\sum_{n=1}^{N_f/f_c} N(n) S_0((n-m))_N R_N(n) \quad (29)$$

由式(29)可知, $R_{sxs}(m)$ 的期望为:

$$E\{R_{sxs}(m)\} = \sum_{n=1}^{N_f/f_c} \alpha \varphi S_0(n - n_\tau) S_0((n-m))_N R_N(n) \quad (30)$$

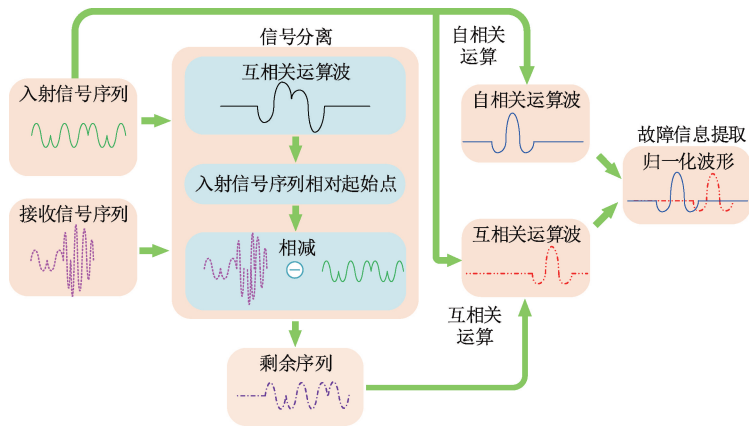


图 8 基于信号分离的盲区消除信号处理流程

Fig. 8 Schematic diagram of blind spot elimination signal processing flow based on signal separation

由式(28)和(29)可知, $R_{ss}(m)$ 和 $R_{sxs}(m)$ 分别包含入射波峰、反射波峰,两者不存在叠加,入射波峰的旁瓣不再影响反射波峰,从理论上可以实现 SSTDR 检测盲区的消除。

2.3 相对起始点的识别

在基于信号分离的盲区消除技术中,识别入射信号序列在接收信号序列中的相对起始点,是实现入射序列与反射序列分离的重要前提。然而,由于相关运算波旁瓣内存在负值,入射序列和反射序列在旁瓣区域内的叠加,使得入射序列相关运算波峰的位置发生偏移。因此,基于相关运算的波峰位置无法识别入射信号序列在接收信号序列中的相对起始点。

基于式(11)可知,相关运算波在波峰左右两侧均存在旁瓣,两个旁瓣相互对称;在旁瓣区域外,相关运算波的值趋于 0。其中,左旁瓣内相关运算波的数值如图 9 所示。

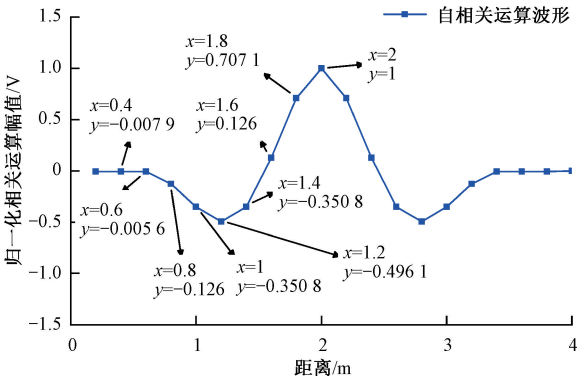


图 9 相关运算波左旁瓣

Fig. 9 Schematic diagram of left side lobe of correlation operation waveform

随着故障点距离的增大,反射序列的相关运算波向右逐渐移动,并与入射序列相关运算波发生叠加。其中,

入射序列相关运算波的左旁瓣第 3 个点(坐标为: $x=0.6, y=-0.126$)在叠加过程中,主要与旁瓣外的值叠加,因此受到的影响较小,且保持负值。在仿真模型中,分别设置盲区区内 0.2~1.6 m 的开路故障和短路故障,在不同距离下相关运算波的示意图如图 10 和 11 所示。

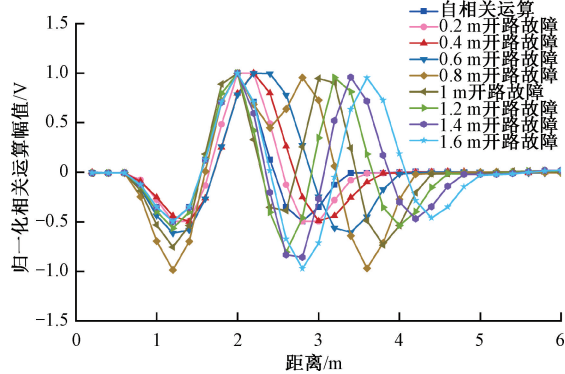


图 10 不同距离的开路故障相关运算波形

Fig. 10 Schematic diagram of correlation operation waveform for open circuit faults at different distances

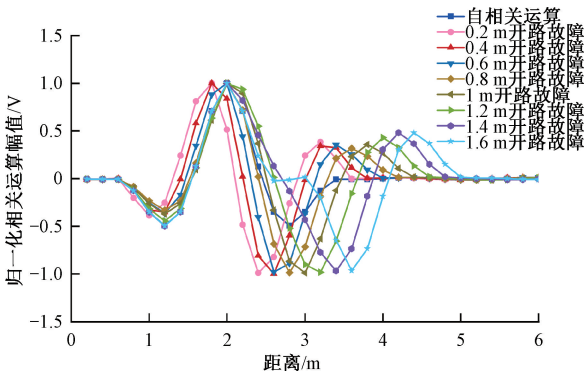


图 11 不同距离的短路故障相关运算波形

Fig. 11 Schematic diagram of correlation operation waveform for short circuit faults at different distances

如图 10 和 11 所示,在故障点距离增大的过程中,入射序列的相关运算波的波峰位置发生改变,而左旁瓣的第 3 个点位置相对固定,可作为判断入射序列在接收序列中相对起始点的依据。

2.4 基于信号分离的 SSTDR 盲区消除仿真

在仿真模型中设置 0.4 m 短路故障,采用分离法盲区消除技术提取故障信息,仿真结果如图 12 所示,经过分离法处理后,入射波峰与反射波峰相互独立,两者不再叠加,入射波峰与反射波峰之间的距离差即为故障点距离,旁瓣不再影响盲区内反射波峰的识别,且入射序列相关运算波峰的位置偏移不会对检测结果造成影响。

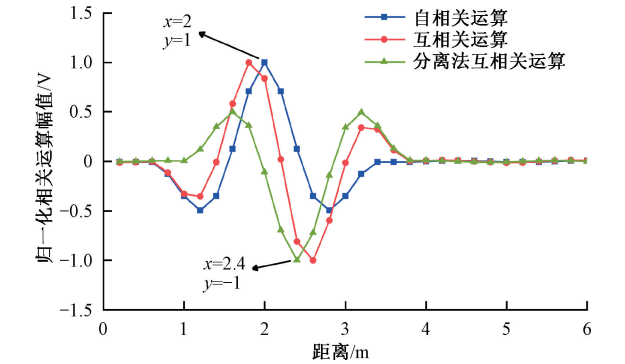


图 12 基于信号分离的检测波形仿真

Fig. 12 Simulation diagram of detection waveform based on signal separation method

3 基于信号分离的 SSTDR 盲区消除实验

为开展基于信号分离的 SSTDR 盲区消除技术研究,搭建了如图 13 所示实验平台。图 13 中①表示直流电源,②表示限流电阻,③表示 SSTDR 检测板卡,④表示阻波器,⑤表示上位机,⑥表示待测线缆,⑦表示故障设置开关,⑧表示负载电阻。将双绞线 RVV 作为待测线缆,



图 13 实验平台

Fig. 13 Experiment platform

长度设置为 0.2~1.6 m,直流电源 IT6006C-300-75 输出 100 V,与限流电阻、负载电阻构成在线回路。通过 SSTDR 检测板卡产生入射信号,并接收反射信号进行处理;同时,将检测结果上传至上位机。其中,入射信号的中心频率为 62.5 MHz,检测板卡的采样频率为 500 MHz,校准后的波速值为 1.82×10^8 m/s,根据式(4),故障定位误差的理论值为 0.18 m。

设置待测线缆长度为 0.4 m,故障类型为开路 and 短路,进行在线检测,实验结果如图 14 所示。

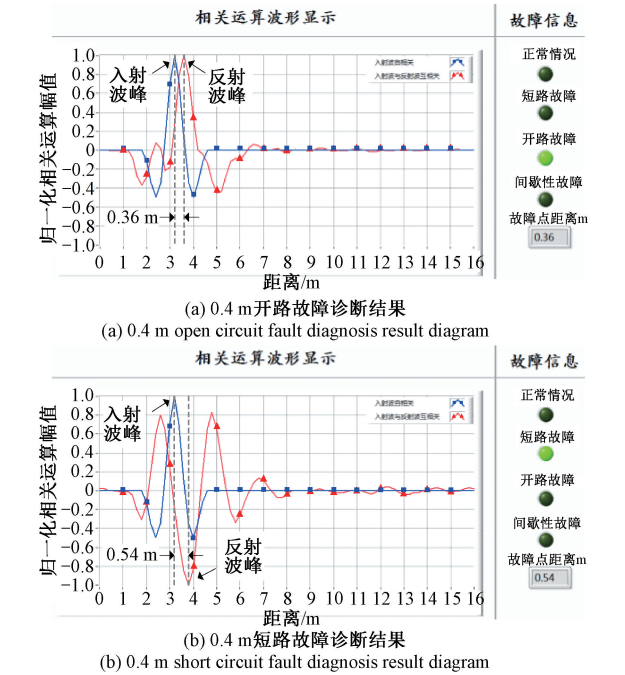


图 14 0.4 m 开路/短路故障诊断结果

Fig. 14 0.4 m open circuit /short circuit fault diagnosis result diagram

由图可知,采用基于信号分离的 SSTDR 盲区消除技术,在实验中实现了入射信号与反射信号的分离,准确检测出盲区内的故障类型和故障距离,其中检测开路故障的绝对误差为 0.04 m,短路故障的绝对误差为 0.14 m,均小于理论误差 0.18 m。其他距离测试统计结果及文献[17]基于拟合故障波形盲区消除方法实验结果如表 1 所示,关于表中所列的“正确次数”这一指标,其评估标准为:在每次故障检测过程中,若所识别的故障类型与预先设定的实际故障类型相匹配,并且故障定位的绝对误差值不超过理论误差范围,则将该次检测结果判定为正确。

由表 1 可知,基于信号分离的 SSTDR 盲区消除技术可以有效的检测出盲区内不同位置设置的故障,并准确定位,最大绝对误差为 0.16 m,小于理论误差值 0.18 m,验证了基于信号分离的 SSTDR 盲区消除技术的有效性。

表 1 基于信号分离的 SSTDR 盲区消除及基于拟合故障波形的盲区消除实验结果统计

Table 1 Table of blind spot elimination experiment results based on signal separation SSTDR and blind spot elimination based on fitted fault waveform

设置距离/m	故障类型	检测次数	信号分离法			拟合故障波形法		
			检测距离/m	绝对误差/m	正确次数	检测距离/m	绝对误差/m	正确次数
0.2	开路	20	0.18	0.02	20	0.19	0.01	20
0.2	短路	20	0.36	0.16	20	0.19	0.01	20
0.4	开路	20	0.36	0.04	20	0.58	0.18	20
0.4	短路	20	0.54	0.14	20	0.39	0.01	19
0.6	开路	20	0.72	0.12	20	0.58	0.02	20
0.6	短路	20	0.72	0.12	20	0.58	0.02	20
0.8	开路	20	0.72	0.08	20	0.77	0.03	20
0.8	短路	20	0.91	0.11	20	0.96	0.16	20
1.0	开路	20	0.91	0.09	20	1.16	0.16	20
1.0	短路	20	1.09	0.09	20	1.16	0.16	20
1.2	开路	20	1.27	0.07	20	1.16	0.04	20
1.2	短路	20	1.27	0.07	20	1.16	0.04	20
1.4	开路	20	1.45	0.05	20	1.36	0.04	20
1.4	短路	20	1.45	0.05	20	1.36	0.04	20

计算两种方法分别在 0.2~0.6 m 和 0.8~1.4 m 区间的检测结果绝对误差平均值如表 2 所示。

表 2 绝对误差平均值分析

Table 2 Analysis table of average absolute error

故障区间/m	信号分离法绝对误差平均值		拟合故障波形法绝对误差平均值	
	开路故障	短路故障	开路故障	短路故障
0.2~0.6	0.06	0.14	0.07	0.09
0.8~1.4	0.072 5	0.08	0.067 5	0.1

由表 2 可知,在不同区间内,两者的开路故障定位误差相近;而对短路故障的检测,拟合故障波形法的定位误差在 0.2~0.6 m 区间相对较小,信号分离法在 0.8~1.4 m 区间相对较小。通过对比可知,两者均能在盲区内有效检测故障及定位故障位置,拟合故障波形法的算法较复杂,但对近端短路故障的检测性能更优;而基于信号分离的盲区消除技术,其算法更加简便、易实施,两种方法各有优势。

4 结 论

1) 本文针对 SSTDR 检测盲区的问题,从理论上分析了盲区产生的原因,即反射信号与入射信号在入射信号

自相关运算的旁瓣内叠加;根据推导的相关运算表达式,旁瓣内存在的拐点改变了入射信号与反射信号的互相关运算波形,导致对反射波峰识别的误判。

2) 基于结论 1),提出了一种新颖的基于信号分离的盲区消除技术。该技术基于入射信号和反射信号线性叠加特性,在确定两者相对起始点的基础上,通过数字信号处理中的减法运算,有效地将两者分离,从而消除了它们在旁瓣区域内叠加时对检测结果的干扰,确保了故障信息的准确提取,实现了盲区内的故障定位。通过实验,验证了本方法的有效性,为其在实际应用中的广泛推广奠定了坚实的基础。

参考文献

[1] LAFLAMME C, BENOIT E, EDUN A S, et al. Quantifying the environmental sensitivity of SSTDR signals for monitoring PV strings [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2022, 12(1): 381-387.

[2] BERGER W, FURSE C. Spread spectrum techniques for measurement of dielectric aging on low voltage cables for nuclear power plants [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(3): 1028-1033.

[3] SHI X D, LI R P, ZHANG H T, et al. Application of augmented spread spectrum time domain reflectometry for

- detection and localization of soft faults on a coaxial cable[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(6):4891-4901.
- [4] 李智华,张豪,吴春华,等. 基于 SSTDR 的光伏连接器故障检测[J]. *高电压技术*, 2024, 50(4):1508-1517.
LI ZH H, ZHANG H, WU CH H, et al. SSTDR-based fault detection in photovoltaic connector [J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(4):1508-1517.
- [5] FURSE C M, KAFAL M, RAZZAGHI R, et al. Fault diagnosis for electrical systems and power networks: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(2):888-906.
- [6] 毛健美,王莉,高闯,等. 感性非接触式电缆故障在线诊断方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(7):1579-1588.
MAO J M, WANG L, GAO CH, et al. Research on inductive non-contact online cable fault diagnosis method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(7):1579-1588.
- [7] HU S Y, WANG L, MAO J M, et al. Synchronous online diagnosis of multiple cable intermittent faults based on chaotic spread spectrum sequence [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(4):3217-3226.
- [8] PRAJAPATI T A, HELAMBE S N. Determination of impedance mismatch in transmission line using developed TDR[C]. 2018 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 2018: 1091-1094.
- [9] 米建伟,李永磊,李素兰,等. 一种用于减小定位盲区提高分辨率的电缆故障定位系统: 201910793896.6[P]. 2021-11-05.
MI J W, LI Y L, LI S L, et al. A cable fault location system for reducing blind spot and improving resolution: 201910793896.6[P]. 2021-11-05.
- [10] 苏伟鸿,高德东,王珊,等. 基于扩展频域时域反射法的在线光伏阵列故障检测信号特性研究[J]. *可再生能源*, 2024, 42(3):323-330.
SU W H, GAO D D, WANG SH, et al. Research on signal characteristics of online photovoltaics array fault detection using spread spectrum time domain reflectometry[J]. *Renewable Energy Resources*, 2024, 42(3):323-330.
- [11] 刘科,田书林,肖寅东,等. 宽脉冲时域反射网络线缆测试方法研究[J]. *电子科技大学学报*, 2009, 38(6):975-978.
LIU K, TIAN SH L, XIAO Y D, et al. Network cable fault location based on the wide pulse time-domain reflection[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(6):975-978.
- [12] LEE C K, CHANG S J. A method of fault localization within the blind spot using the hybridization between TDR and wavelet transform[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(4):5102-5110.
- [13] LEE S H, PARK J B, CHOI Y H. Blind spot reduction in wavelet transform-based time-frequency domain reflectometry using Gaussian chirp as mother wavelet[J]. *IET Signal Processing*, 2014, 8(7):703-709.
- [14] GRIFFITHS L A, PARAKH R, FURSE C, et al. The invisible fray: A critical analysis of the use of reflectometry for fray location[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2006, 6(3):697-706.
- [15] SALEH M U, DELINE C, KINGSTON S, et al. Detection and localization of disconnections in PV strings using spread-spectrum time-domain reflectometry [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2020, 10(1):236-242.
- [16] EDUN A S, LAFLAMME C, KINGSTON S R, et al. Anomaly detection of disconnects using SSTDR and variational autoencoders [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(4):3484-3492.
- [17] 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.
GAO CH. Research on cable fault diagnosis based on TDR/SSTDR [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [18] 毛健美,王莉,杨善水. 飞机电源系统多导体电缆故障在线诊断方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(9):1962-1970.
MAO J M, WANG L, YANG SH SH. Research on online diagnosis of multi-conductor cables' faults about aircraft power system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(9):1962-1970.
- [19] HAYKIN S. *Communication systems* [M]. 4th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2001.
- [20] LIU D L, FENG H W, YANG H Y. A novel method based on spread-spectrum time-domain reflectometry for

improving the distance of cable fault detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(9):9440-9446.

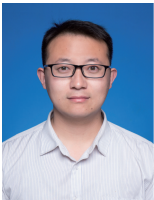
[21] GAO CH, WANG L, MAO J M, et al. Non-intrusive cable fault diagnosis based on inductive directional coupling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4):1684-1694.

[22] ELLIS H D, SALEH M U, KINGSTON S R, et al. A model for SSTDR signal propagation through photovoltaic strings [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2020, 10(6):1846-1852.

[23] 王恒. 无人值守光伏电站电缆故障检测方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.

WANG H. Research on cable fault detection methods for unmanned photovoltaic charging stations [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.

作者简介



陈洪圳,2011 年于河南科技学院获得学士学位,2014 年于武汉工程大学获得硕士学位,现为南京航空航天大学博士生,主要研究方向为线缆故障检测与定位技术。
E-mail:chenhongzhen@nuaa.edu.cn

Chen Hongzhen received his B.Sc. degree in 2011 from

Henan Institute of Science and Technology, received his M. Sc. degree in 2014 from Wuhan Institute of Technology. He is currently a Ph. D. candidate at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests are cable fault detection and localization technology.



王莉(通信作者),1990 年和 1993 年于洛阳工学院获得学士和硕士学位,2007 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为南京航空航天大学教授,主要研究方向为智能固态配电技术、电缆网故障检测和预测以及故障定位技术、供配电系统故障诊断和健康管理技术。

E-mail:liwang@nuaa.edu.cn

Wang Li (Corresponding author) received her B.Sc. degree and M. Sc. degree both from Luoyang Institute of Technology in 1990 and 1993, respectively. She received her Ph. D. degree in 2007 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Now she is a professor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interests include intelligent solid state power distribution technology, cable network fault detection, prediction, and location technology, fault diagnosis and health management technology for power supply and distribution systems.