

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107108

电缆故障识别的归一化 STDR 分析方法^{*}

杨宇祥¹ 纪群飞¹ 熊智平² 李建阔¹ 林海军¹ 张甫¹ 吴双双³

(1.湖南师范大学工程与设计学院 长沙 410081; 2.利欧集团股份有限公司 温岭 317500;
3.湖南省计量检测研究院 长沙 410014)

摘要: 序列时域反射法(STDR)是常用的电缆故障检测方法,但传统的 STDR 方法只能识别基本的短路与开路故障,而不能识别诸如高阻、低阻等其他类型的故障,在精确的电缆故障诊断应用中受限。本文提出一种电缆故障识别的归一化 STDR 分析方法,该方法根据入射信号(m 序列)的自相关峰值及入射信号与反射信号的互相关峰值之间的时间差来确定故障点的位置,并建立基于互相关峰值归一化的电缆负载阻抗估算方法,通过精确计算故障点处的负载阻抗从而实现故障类型的精确识别。电缆故障实验研究表明,电缆故障定位误差 $\leq 0.25\%$,电缆负载阻抗的估算值与真实值的相关度 $\geq 98.80\%$,验证了该方法的有效性。电缆故障识别的归一化 STDR 分析方法既保证了故障定位精度,也实现了对故障点负载阻抗的精确估算,从而实现对短路、开路、高阻、低阻等多种故障类型的精确识别,突破了传统 STDR 方法只能识别短路与开路故障的局限。

关键词: 序列时域反射法;m 序列;互相关;归一化

中图分类号: TP206.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Normalized STDR analysis method for cable fault identification

Yang Yuxiang¹ Ji Qunfei¹ Xiong Zhiping² Li Jianmin¹ Lin Haijun¹ Zhang Fu¹ Wu Shuangshuang³

(1. College of Engineering and Design, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;

2. LEO Group Co., Ltd., Wenling 317500, China; 3. Hunan Institute of Metrology and Test, Changsha 410014, China)

Abstract: Sequence time domain reflectometry (STDR) is a common cable fault detection method, but the traditional STDR method can only identify the basic short-circuit and open-circuit faults, and cannot identify other types of faults with high or low resistance loads, which is limited in the application of accurate cable fault diagnosis. This paper proposes a normalized STDR analysis method for cable fault identification, which firstly determines the cable fault location according to the time difference between the autocorrelation peak of the input signal (m-sequence) and the cross-correlation peak of the input and reflected signals, then establishes a cable load impedance estimation method based on the normalization of cross-correlation peaks, and ultimately the fault type can be accurately identified through the estimated load impedance at the fault point. Cable fault experiments show that the error of cable fault location is less than 0.25%, and the correlation coefficient between the estimated cable load impedance and the true load impedance is more than 98.80%, which verifies the effectiveness of the proposed method. The proposed normalized STDR analysis method not only ensures the accuracy of fault location, but also realizes the accurate estimation of load impedance at fault point, so as to realize the accurate identification of different fault types such as short circuit, open circuit, high-resistance load and low resistance load, and breaks through the limitation of the traditional STDR method which can only identify the short circuit and open circuit faults.

Keywords: sequence time domain reflectometry (STDR); m-sequence; cross-correlation; normalization

0 引言

电缆作为重要的通信和电能传输基础性部件被誉为国

家经济的“神经”和“血管”,为保证工作的安全可靠、安装更换方便以及市容美观,电缆大多采用直埋敷设^[1]的方式。地下恶劣的环境、过负荷的使用以及自然老化都容易导致

收稿日期:2021-06-29

^{*} 基金项目:湖南省自然科学基金(2021JJ30014,2021JJ40359)、湖南省市场监督管理局科技计划(2020KJH07)项目资助

电缆发生故障^[2-3], 然而电缆所具有的隐蔽性导致故障难以被直接观测。因此, 电缆故障的精确识别和故障点精确定位对于保障国家和社会安全运行至关重要。

行波法作为目前常用的电缆故障检测^[4]方法, 它的工作原理是在电缆的一端发射激励信号, 激励信号遇到故障点发生反射, 通过入射信号和反射信号的时间差以及信号的传播速度来计算故障的位置。行波法常见的方法有时域反射法(time domain reflectometry, TDR)^[5-6]、频域反射法(frequency domain reflectometry, FDR)^[7-8]、序列时域反射法(sequence time domain reflectometry, STDR)^[9]、扩展频谱时域反射法(spread spectrum time domain reflectometry, SSTDR)^[10-11]等。TDR 实现简单, 且对电缆无损害, 但是在测量过程中容易产生噪声信号的叠加, 给反射信号提取带来困难, 且测试信号随着传播距离的增大衰减会逐渐增大, 很难识别反射信号, 导致测量结果误差很大^[12]。随之兴起的 FDR 在 TDR 基础上有一定的改进, 激励采用扫频信号, 测试精度比 TDR 高, 但是它只能检测高阻故障, 且设备的体积较大成本较高^[13]。SSTDR 向电缆发送经余弦调制的伪随机码作为激励信号, 该信号与电缆中的有效信号互不干扰, 但是检测范围受码周期的限制, 需要昂贵的伪随机码发生器, 成本较高^[14-15]。STDR 以其抗干扰能力强、实现简单、适用范围广而成为研究的重点。然而, 传统的 STDR 方法只能识别基本的短路与开路故障, 而不能识别诸如高阻、低阻等其他类型的故障, 因此在精确的电缆故障诊断应用中受限。

为同时实现对故障点的精确定位和故障类型的精确识别, 本文提出一种基于归一化 STDR 分析的电缆故障识别方法。首先, 根据传输线理论论证了电缆故障的 STDR 检测原理及入射信号的选择。其次, 利用同轴电缆、信号发生器、功率分配器、示波器搭建了基于 STDR 方法的电缆故障检测实验系统。最后, 对不同长度的故障电缆进行了故障定位识别实验, 对连接不同负载阻抗的电缆进行了基于互相关峰值归一化的电缆负载阻抗估算实验。实验结果表明, 本文提出的基于归一化 STDR 分析的电缆故障识别方法能够实现电缆故障点的精确定位和故障类型的精确识别。

1 传输线理论和 STDR 检测原理

1.1 传输线理论

电缆等效参数模型如图 1 所示。图 1 中, L_0 、 R_0 、 C_0 、 G_0 分别表示单位长度导线的分布电感、分布电阻、分布电容和分布电导。

根据基尔霍夫电流定律和电压定律, 距离电缆初始端为 x 处的电压电流方程如下所示:

$$\begin{cases} R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial x} \\ G_0 i + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial i}{\partial x} \end{cases} \quad (1)$$

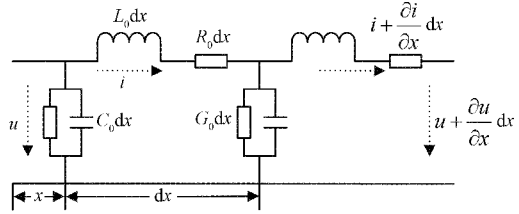


图 1 电缆的分布参数模型

根据初始条件和边界条件可以求出式 (1) 的解, 得到距离电缆 x 处入射信号的反射系数 Γ 为:

$$\Gamma = \frac{Z_0 - Z_L}{Z_0 + Z_L} \quad (2)$$

其中, Z_0 为电缆故障点的阻抗^[16], Z_L 为电缆的特征阻抗^[17]。反射情况分如下类型:

- 1) 电缆无故障: $Z_0 = Z_L$, $\Gamma = 0$, 无反射存在;
- 2) 低阻故障: $Z_0 < 10Z$ (Z 为电缆的波阻抗, 一般不超过 40Ω), Γ 在 $(-1, 0)$ 之间, 信号发生部分反射, 且入射信号与反射信号的极性相反(短路故障特例: $Z_0 = 0, \Gamma = -1$);
- 3) 高阻故障: $Z_0 > 10Z$, Γ 在 $(0, 1)$ 之间, 且入射信号与反射信号的极性相同;
- 4) 开路故障: $Z_0 = \infty$, $\Gamma = 1$, 信号发生全反射, 且入射信号与反射信号的极性相同。

1.2 STDR 电缆故障检测原理

基于 STDR 的电缆故障检测系统结构如图 2 所示。首先, 系统通过信号源产生两路相同的伪随机 m 序列: 一路作为参考信号, 另一路作为测试信号注入待测电缆; 随后, 测试信号通过 T 型头注入待测故障电缆。由行波^[18]的传播特性可知: 当电缆发生故障时, 故障点处的阻抗与电缆的特征阻抗不匹配, 测试信号遇到阻抗不匹配的故障点时将发生信号反射。最后, 将采集到的参考信号与反射信号进行互相关运算分析, 根据反射信号的延迟特性和幅值特性, 来识别故障类型和定位故障位置。

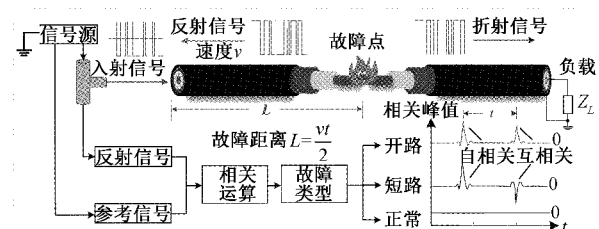


图 2 STDR 电缆故障检测原理

假设入射信号遇到故障返回至入射点的时间为 t , 且入射信号在电缆内的传播速度为 v , 则故障距离 L 可由式(3)表示。

$$L = \frac{vt}{2} \quad (3)$$

式中: t 可根据入射信号的自相关以及它与反射信号的互相关峰值的时间差来确定。

然而,当故障点与测距点很近时,测试信号传播时间很短,发射信号与反射信号混叠在一起致使无法测距。因此,被测电缆的测试距离范围 d 通常定义为:

$$\frac{1}{2}T_s C \leq d \leq \frac{1}{2}NT_s C \quad (4)$$

式中: T_s 为一个码元持续时间, N 为伪随机序列的长度, C 为光速。

根据 STDR 的故障定位原理,系统存在一个采样的定位误差。设波速恒定,采样频率为 f ,则定位误差 d_c 为:

$$d_c = \frac{v}{2f} \quad (5)$$

式中: v 为电缆中传播速度, f 为采样频率。本文故障检测系统采样频率 $f=125$ MHz,激励信号在 SYV50-3-1 型同轴电缆中的传播速度 $v=1.998 \times 10^8$ m/s,所以故障定位的系统误差为 0.8 m 左右。

2 STDR 入射信号的选取

STDR 检测的入射信号一般选用抗干扰能力很强的伪随机 m 序列。 m 序列^[19 20]是最长线性移位寄存器序列的简称,其生成原理如图 3 所示,对应的特征多项式为:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n c_i x^i = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + \dots + c_n x^n (c_0 = c_n = 1) \quad (6)$$

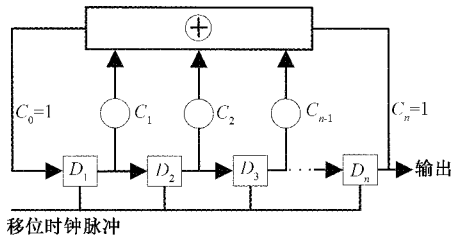


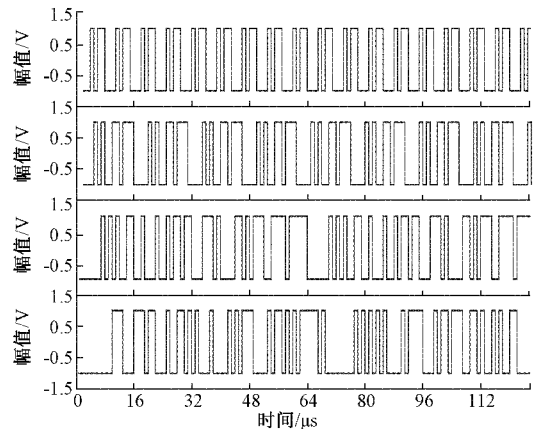
图 3 n 级移位寄存器

m 序列作为一种容易产生、规律性好的伪随机序列具有如下性质^[21]:

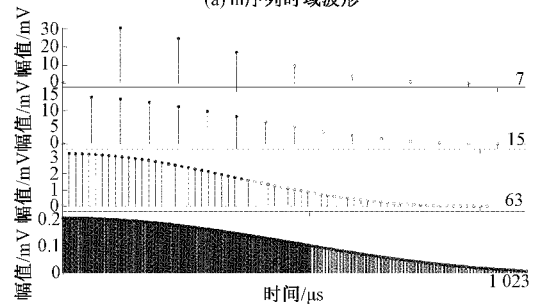
- 1) 均衡特性:信号取 $\pm a$ 状态只在整数倍时钟周期发生转换,且“ $+a$ ”出现的次数比“ $-a$ ”的次数多 1。
- 2) 游程特性:若把 n 个相同元素连续出现叫做一个“游程”,当序列长度一定时,则连“ $+a$ ”与连“ $-a$ ”的次数相等。
- 3) 移位可加性:一个 m 序列与他自身移位过后的 m 序列进行模 2 相加运算后得到的仍然是 m 序列,且与原 m 序列等价。

上述性质决定了 m 序列具有很好的自相关性和较好的互相关特性^[22]。

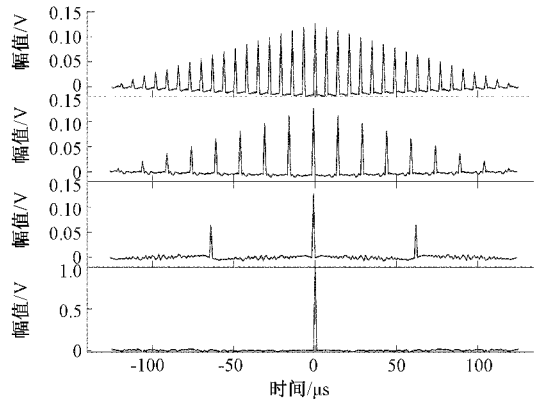
图 4 所示为不同阶数 m 序列在相同码长下对应的时域波形、一个周期对应的功率谱密度和自相关曲线,其中图 4(a)从上到下依次为 3、4、6、10 阶 m 序列在相同点数下的时域波形,图 4(b)为各阶 m 序列一个周期对应功率谱,图 4(c)为各阶 m 序列的自相关曲线。



(a) m 序列时域波形



(b) 功率谱密度



(c) 自相关曲线

图 4 3、4、6、10 阶 m 序列时域波形、功率谱密度和自相关曲线

m 序列功率谱公式如式 (7) 所示。

$$\varphi_{xx}(f) = \frac{a^2}{N^2} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \sigma(f) + a^2 \left(\frac{N+1}{N^2} \right) \left[\frac{\sin \pi f / f_c}{\pi f / f_c} \right]^2 \sum_{r \neq 0}^{\infty} \sigma \left(f - r \frac{f_c}{N} \right) \quad (7)$$

式中: N 为 m 序列的长度, f_c/N 为谱线间距。

从式 (7) 中可以看出,当时钟频率 f_c 不变,信号长度 N 增大时,谱线之间的间距减小,强度下降,但不会改变在指定频率内的总功率。此外,在相同点数下的 m 序列自相关曲线随着阶数的增加,其自相关更好、更容易辨识。因此,本文采用 10 阶 m 序列作为电缆故障检测的激励信号。

3 电缆故障实验系统

本文构建了基于 STDR 方法的电缆故障检测实验系统,如图 5 所示。在本实验中, m 序列由信号发生器 SDG6052X(中国,鼎阳科技股份有限公司)产生,最高输出频率为 500 MHz,采样率为 2.4 GSa/s;功率分配器(power divider, PD)选用美国,Mini-Circuits 公司的 ZAPD-30-S+,其带宽范围为 0.02~3 GHz;数字存储示波器 SDS6000 Pro(中国,鼎阳科技股份有限公司)带宽为 1 GHz,采样速率为 5 GSa/s。

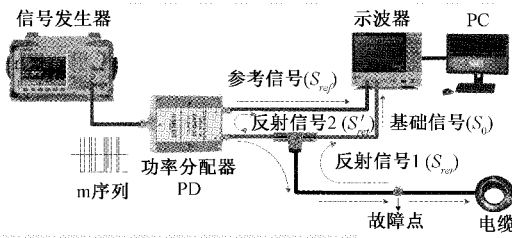


图 5 基于 STDR 的电缆故障检测实验系统

检测过程中,由信号发生器产生的 m 序列经过 PD 后被复制成两路相同的信号,其中一路信号作为参考信号 (S_{ref}) 送入示波器的 1 端口;另一路通过 T 型接头时分成两部分,一部分作为激励信号进入电缆,另一部分作为基础信号 (S_0) 送入示波器的 2 端口。激励信号进入到电缆内一旦遇到故障点,就会返回到发射端口,因此反射信号与激励信号之间存在一定的延迟,延迟时间为 T 型接头到故障点的往返时间 τ 。反射信号在返回到 T 型接头后会分成两路,一路反射信号 (S'_{ref}) 经过 PD 后被示波器端口 1 采集;另一部分反射信号 (S_{ref}) 直接被示波器端口 2 采集。最后,PC 端采集示波器两个端口的数据进行互相关运算,经过分析计算出信号往返时间 τ ,通过式 (3) 计算出故障位置。

假设信号发生器产生的信号为 $C(t)$,则示波器接收到的各个信号为: $S_{ref} = k_1 C(t - \tau_1)$, $S_0 = k_2 C(t - \tau_2)$, $S_{ref} = k_3 C(t - \tau_3)$, $S'_{ref} = k_4 C(t - \tau_4)$,其中 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ 分别为参考信号、基础信号、反射信号 1、反射信号 2 从 PD 到示波器的传播时间。 k_1, k_2, k_3, k_4 为相对于信号发生器输出的衰减系数。将组合信号 $S_{ref} + S'_{ref}$ 与 $S_0 + S_{ref}$ 进行相关运算可得:

$$R = \frac{1}{T} \int_0^T [S_0(t) + S_{ref}(t)][S_{ref}(t - t') + S'_{ref}(t - t')] dt = k_1 k_2 \frac{1}{T} \int_0^T C(t - \tau_2) C(t - \tau_1 - t') dt + k_1 k_4 \frac{1}{T} \int_0^T C(t - \tau_2) C(t - \tau_4 - t') dt + k_1 k_3 \frac{1}{T} \int_0^T C(t - \tau_3) C(t - \tau_1 - t') dt + k_3 k_4 \frac{1}{T} \int_0^T C(t - \tau_3) C(t - \tau_4 - t') dt \approx (k_1 k_2 + k_3 k_4) \sigma(t') + k_1 k_4 \sigma(t' - (\tau_2 - \tau_4)) + k_1 k_3 \sigma(t' - (\tau_3 - \tau_1)) \quad (8)$$

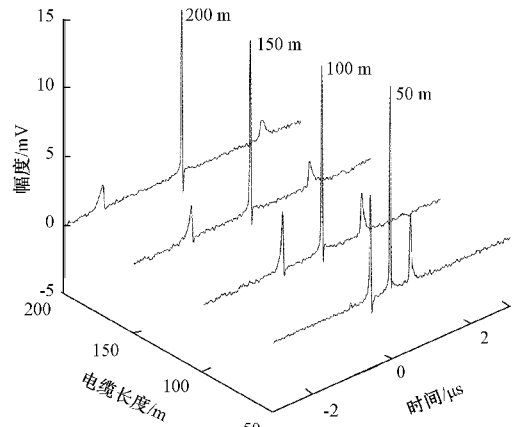
式 (8) 主要包含 3 项,其中第 1 项为参考信号的自相关峰值,第 2 项为反射信号 2 与基础信号的互相关峰值,第 3 项为反射信号 1 与参考信号的互相关峰值(衰减系数 $k_4 > k_3$)。假设信号从 PD 的输出端到 T 型连接头的传输时间为 $\tau_5, \tau_3 - \tau_1 = \tau$,则 $\tau_4 - \tau_2 = \tau + 2\tau_5$,可以看出反射信号 1 (S_{ref}) 的传播时间 τ 对于定位故障点更精确。

4 电缆故障实验

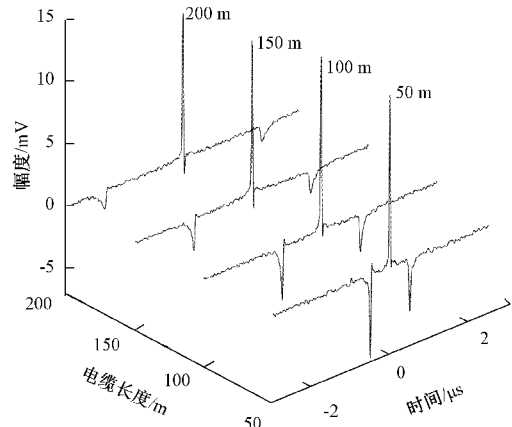
利用图 5 所示的实验系统对 SYV50-3-1 型同轴电缆在 50、100、150、200 m 处分别进行开路故障和短路故障模拟测试。实验中使用的测试信号为 10 阶 m 序列,其码元生成率为 30 MHz,测试点数为 12 500。

4.1 电缆故障的定位与开路/短路故障识别

电缆故障的定位可根据式 (3) 计算故障距离 L 得到,开路、短路故障则可以根据图 2 所示的互相关正负号来识别。图 6 为电缆故障的识别和定位结果,其中图 6(a) 为同轴电缆在 50、100、150、200 m 处的开路故障测试结果。可以看出反射信号互相关峰值与参考信号自相关的峰值极性相同,与式 (2) 分析的电缆开路故障吻合。表 1 为实际开路故障位置与测量故障位置的比较。



(a) 开路故障



(b) 短路故障

图 6 电缆故障的识别和定位

表 1 实际开路故障位置与测量故障位置的比较

| 类型 | 实际故障位置/m | 测量故障位置/m | 误差/% |
|----|----------|----------|------|
| 开路 | 50.00 | 49.90 | 0.20 |
| | 100.00 | 99.81 | 0.19 |
| | 150.00 | 150.38 | 0.25 |
| | 200.00 | 199.50 | 0.25 |

图 6(b)为同轴电缆在 50、100、150、200 m 处的短路故障测试结果。可以看出反射信号互相关峰值与参考信号自相关的峰值极性相反,与式(2)分析的电缆短路故障吻合。表 2 为实际短路故障位置与测量故障位置的比较。

表 2 实际短路故障位置与测量故障位置的比较

| 类型 | 实际故障位置/m | 测量故障位置/m | 误差/% |
|----|----------|----------|------|
| 短路 | 50.00 | 49.95 | 0.10 |
| | 100.00 | 99.90 | 0.10 |
| | 150.00 | 149.77 | 0.15 |
| | 200.00 | 200.43 | 0.22 |

此外,由于衰减系数 $k_4 > k_3$,因此反射信号 2 与基础信号互相关的峰值高于反射信号 1 与参考信号互相关的峰值,即图 6 所示的各互相关信号中,其左侧互相关峰值大于右侧互相关峰值。

4.2 基于互相关峰值归一化的电缆负载阻抗估算方法

上述实验根据互相关的正负实现了对开路/短路故障类型识别。但是,电缆故障的类型不局限于开路和短路,低阻故障和高阻故障也很常见。为了实现对电缆故障类型的精确试别,本文建立了基于互相关峰值归一化的电缆负载阻抗精准识别方法,其原理如下。

首先,将电缆加载不同的负载阻抗,得到不同负载阻抗下反射信号 1 与参考信号的互相关(对应式(8)第 3 项),将互相关峰值进行归一化处理:

$$\Gamma = \frac{2(R_z - \min(R_{XY}))}{\max(R_{XY}) - \min(R_{XY})} - 1 \quad (9)$$

表 3 负载阻抗估算值与真实阻值的比较

| 距离/m | 阻值/ Ω | | | | | | | 相关度/% |
|------|--------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | |
| 50 | 0 | 26.26 | 47.70 | 70.97 | 88.82 | 133.61 | 166.61 | 99.81 |
| 100 | 0 | 28.78 | 53.58 | 76.94 | 106.45 | 160.60 | 228.66 | 99.84 |
| 200 | 0 | 20.56 | 47.98 | 76.90 | 102.35 | 140.17 | 237.83 | 98.80 |

上述实验表明,通过互相关峰值的归一化分析,可以评估故障点处的负载阻抗大小,进而对该故障类型进行精确识别。

5 结 论

本文提出一种基于归一化 STDR 分析的电缆故障识

式中: R_z 为某负载下的互相关峰值, $\min(R_{XY})$ 、 $\max(R_{XY})$ 分别为不同负载下互相关峰值的最大值和最小值,反射系数 Γ 的取值范围在 $[-1, 1]$ 。

其次,将式(9)代入式(2),得到互相关峰值 R_z 对应的负载阻抗的 Z_0 估算公式:

$$Z_0 = \frac{R_z - \min(R_{XY})}{\max(R_{XY}) - R_z} Z_L \quad (10)$$

式中: Z_L 为电缆的特征阻抗。

以 200 m SYV50-3-1 型同轴电缆为例,对其末端加载不同的负载电阻,进行电缆故障的模拟测试,得到如图 7 所示的不同负载阻抗下反射信号 1 与参考信号的互相关(对应式(8)第 3 项)波形。

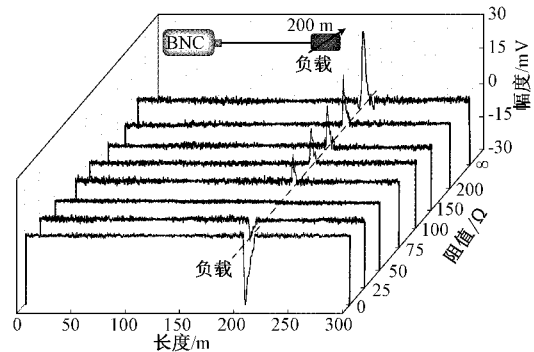


图 7 200 m 电缆在不同负载电阻下对应的互相关峰值

从图 7 中可以看出,随负载电阻由小变大,对应的互相关峰值由负数逐渐变为正数。由于 SYV50-3-1 型同轴电缆的特征阻抗 $Z_L = 50 \Omega$,因此负载阻抗在 50Ω 处为互相关正负的临界点。根据图 7 所示不同负载阻抗下的互相关峰值 R_z ,利用式(10)计算得到负载阻抗的估算值,并与真实的负载阻抗做相关性分析,得到负载阻抗的估算值与真实值的相关度为 98.80%。同理,本文还针对 50、100 m 同轴电缆做了类似实验,其结果如表 3 所示,其中 50 m 同轴电缆负载阻抗的估算值与真实值的相关度为 99.81%, 100 m 同轴电缆负载阻抗的估算值与真实值的相关度为 99.84%。

别方法,具体包括如下两点:1)根据入射信号的自相关峰值以及入射信号与反射信号的互相关峰值之间的时间差来确定故障点距离;2)建立了基于互相关峰值归一化的电缆负载阻抗估算方法,实现对电缆故障类型的精确试别。

通过电缆故障实验证明,本文提出的基于归一化 STDR 分析的电缆故障识别方法既保证了故障定位精度,

也实现了对故障点负载阻抗的精确估算, 从而实现对短路、开路、高阻、低阻等多种故障类型的精确识别, 突破了传统 STDR 方法只能识别短路与开路故障的局限。

参考文献

- [1] 李敏华, 郭昆丽, 高子伟. 地铁中压环网供电计算研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(2): 132-137.
- [2] 吴明祥, 欧阳本红, 李文杰. 交联电缆常见故障及原因分析[J]. 中国电力, 2013, 46(5): 66-70.
- [3] 陈俊松, 龚俊, 张格悠, 等. 基于改进 L-K 光流法的电缆断裂伸长率测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 256-264.
- [4] TAN K K, HUANG S N. Design and analysis of fault diagnosis and fault-tolerant control for a class of MIMO nonlinear state systems[J]. Instrumentation, 2019, 6(4): 14-25.
- [5] ZHANG J M, ZHANG Y B, GUAN Y G. Analysis of time-domain reflectometry combined with wavelet transform for fault detection in aircraft shielded cables[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 6(11): 4579-4586.
- [6] SHI Q H, TRILTZSCH U, KANOUN O. Analysis of the parameters of a lossy coaxial cable for cable fault location [C]. International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD), 2011, 7(4): 311-325.
- [7] SHI Q H, KANOUN O. Wire fault diagnosis in the frequency domain by impedance spectroscopy [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2015, 64(8): 2179-2187.
- [8] 李蓉, 周凯, 饶显杰, 等. 基于输入阻抗谱的电缆故障类型识别及定位[J]. 高压技术, 2021, 47(9): 3236-3245.
- [9] SHRAMA C R, FURSE C, HARRISON R. Low-power STDR CMOS sensor for locating faults in aging aircraft wiring [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7: 43-50.
- [10] 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.
- [11] 周训春, 肖楚璇, 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.
- [12] SHI X D, LI X H, YANG Z G, et al. Fault detection of aircraft cable via spread spectrum time domain reflectometry [J]. Sensors & Transducers, 2014, 167(3): 135-141.
- [13] 王昱皓, 周凯, 江先进, 等. 基于改进时频域反射法的电力电缆局部缺陷定位[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 1-10.
- [14] WANG A B, ZHANG M J, XU H, et al. Location of wire faults using chaotic signal [J]. Electron Device Letters IEEE, 2011, 32(3): 372-374.
- [15] 尹振东, 王莉, 陈洪圳, 等. 增广时频域反射法在电缆复合故障检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7760-7773.
- [16] 黄军玲, 高强. 27.5 kV 电缆金属护层雷击特性的建模与仿真[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 210-217.
- [17] 万健如, 刘英培, 周海亮. 基于传输线理论电力高频脉冲在电缆上的传输与反射研究[J]. 物理学报, 2010, 59(5): 2948-2951.
- [18] 彭浩, 沈兴来, 陈奎. 电缆单端故障测距的阻抗-行波组合法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 110-114.
- [19] ZHANG T, LI S X, FENG T, et al. Some new results on the cross correlation of m-sequences [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 60(5): 3062-3068.
- [20] MATHIEU D N, SAVIN V, ROS L, et al. Improving the decoding of m-sequences by exploiting their decimation property [J]. 21st European Signal Processing Conference, 2013: 1-5.
- [21] HEMMATI F. Cross-recurrence property of m-sequences [C]. IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings, 2012: 851-854.
- [22] 杨睿. 论伪随机序列及其应用[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2009, 5(2): 166-168, 174.

作者简介

杨宇祥, 博士, 教授, 主要研究方向为测控技术与智能仪器、无损检测技术。

E-mail: yuxiang.yang@hunnu.edu.cn

张甫(通信作者), 博士, 讲师, 主要研究方向为微弱信号检测、智能信息处理、系统辨识。

E-mail: fuzhang@hunnu.edu.cn