

基于 Pisarenko 谐波分解的电力电缆缺陷定位方法

冯杰^{1,2}, 王大兴^{1,2}, 赵兴虹², 周凯³, 唐志荣³

(1. 四川蜀能电科能源技术有限公司, 成都611434; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都610072; 3. 四川大学电气工程学院, 成都610065)

摘要: 近年来, 频域反射法(frequency domain reflection, FDR)已被广泛应用于电力电缆的缺陷检测中。然而, 行波的多反射和反射系数谱是非周期性信号, 导致FDR的定位谱图存在伪峰, 这个问题容易造成对定位缺陷的严重误判。因此提出了一种基于Pisarenko谐波分解的电缆缺陷定位新方法, 该方法采用线性差分模型对反射系数谱的概率密度分布进行拟合并构造一个自回归移动平均(auto-regressive moving average, ARMA)模型, 以替换传统FDR中的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)。所提方法有效克服了电缆中的衰减、多反射以及色散效应对电缆缺陷定位造成的影响。然后, 采用Pisarenko谐波分解法来估计反射系数谱中的所有频率, 并进一步完成对缺陷的精确定位。最后, 通过仿真数据和现场58 km海底电缆的数据对所提方法进行验证。结果表明, 所提方法不仅能削弱伪峰对缺陷定位的影响, 还能提高定位分辨率。

关键词: 反射系数谱; Pisarenko谐波分解; 缺陷定位; 频域反射法; 电力线缆

Power Cable Defect Location Method Based on Pisarenko Harmonic Decomposition

FENG Jie^{1,2}, WANG Daxing^{1,2}, ZHAO Xinghong², ZHOU Kai³, TANG Zhirong³

(1. Sichuan Shuneng electric Energy Technology Co., Ltd., Chengdu 611434, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610072, China; 3. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu, 610065, China)

Abstract: In recent years, frequency domain reflection method (FDR) has been widely used in defect detection of power cables. However, multi-reflection of traveling waves and the reflection coefficient spectrum of FDR are non-periodic signals, which leads to false peaks in the positioning spectrum of FDR, and this problem can easily lead to serious misjudgment of the location of defects. In this paper, a new method for power cable defect location based on Pisarenko harmonic decomposition is proposed. The linear difference model is used to fit the probability density distribution of reflection coefficient spectrum and construct an auto-regressive moving average (ARMA) model to replace the fast Fourier transform (FFT) in the traditional FDR. The proposed method can effectively overcome the influence of attenuation, multi-reflection and dispersion effect on cable defect location. Then, Pisarenko harmonic decomposition method is used to estimate all frequencies in the reflection coefficient spectrum and further complete the accuracy location of defects. Finally, the proposed method is validated through simulation data and on-site data from a 58 km submarine cable. The results show that the proposed method can not only weaken the influence of false peaks on defect location, but also improve the location resolution.

Key words: reflection coefficient spectrum; Pisarenko harmonic decomposition; defect location; frequency domain reflection; power cable

0 引言

近年来,城市化发展迅速,居民对用电量的需求越来越高^[1-5]。电力电缆通常在超负荷下运行,这将导致局部缺陷的产生^[6]。能否准确定位局部缺陷的位置将决定工作人员是更换电力电缆还是继续投入运行。考虑到电缆价格昂贵,直接更换将会导致经济成本太高。因此,对电缆缺陷的准确定位具有重大经济意义。

现有的基于行波的缺陷定位方法主要包括:时域法(time domain reflectometry, TDR)^[7-9]、频域法(frequency domain reflection, FDR)^[10-12]和时频域法(time frequency domain reflectometry, TFDR)^[13-15]。TDR 和 TFDR 的本质都是向被测电缆中注入脉冲信号,该信号在缺陷处产生反射波,然后将反射波与注入脉冲信号做时延估计,以获得缺陷的位置,两种方法具有操作简单、计算方便的特点而被广泛应用于实际测试。然而, TDR 的注入信号缺少高频分量,导致 TDR 对缺陷的灵敏度较低^[16-18]。TFDR 虽然在 TDR 的基础上增加了注入信号的高频成分,提高了对缺陷的识别率,但是它不满足二次叠加原理,从而造成定位谱图中存在交叉相的伪峰,容易引起对缺陷的误判^[17]。且信号的衰减导致 TDR 和 TFDR 不适用于长距离电缆的缺陷定位^[19-20]。FDR 方法采用频带可调的线性扫频信号来获取被测电缆在不同频率下的反射系数谱。相比于 TDR 和 TFDR, FDR 方法能获取更多的电缆在高频信号下的信息^[21]。因此, FDR 对缺陷更敏感且适用于长距离电缆的检测。然而,由于反射系数谱是一个非周期信号,在快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)的过程中会产生大量的频谱泄露,导致伪峰的产生。且传统 FDR 需要工作人员凭借个人经验选择合适的窗函数才能获得较为准确的缺陷定位结果^[22]。此外,接头产生的多次反射(如交叉互联箱)同样会产生伪峰。如何抑制伪峰对定位结果带来的影响是亟待解决的问题。

本文提出了一种基于 Pisarenko 谐波分解的电缆缺陷定位新方法,该方法采用线性差分来拟合反射系数谱的概率密度分布,并建立一个自回归-滑动平均(auto-regressive moving average, ARMA)预测模型。理论上,任何一个反射系数谱的有理式数据的功率谱密度都可以用一个 ARMA 随机过程的功

率谱密度精确逼近。相比于传统的 FFT, ARMA 模型不受数据周期性的限制,因此该方法不受频谱泄露的影响,且克服了电缆中衰减引起的非周期对缺陷定位的影响。同时, Pisarenko 谐波分解算法基于信号自相关估计将信号的特征空间划分成信号子空间与噪声子空间,根据这两个子空间正交的原理构建特征多项式和代数方程组,从而计算出各种谐波分量的频率。值得注意的是,色散效应造成的伪频信号可以看做是一种噪声,它在估计过程中被划分到了噪声子空间中。且在自相关过程中,色散效应和多反射造成的伪频得到极大的抑制。Pisarenko 谐波分解从算法角度有效克服了电缆中的衰减、多反射以及色散效应对电缆缺陷定位造成的影响。通过仿真和 58 km 海底电缆的现场案例验证了该方法具有较高的可行性。

1 基本原理

1.1 电缆的分布参数模型

在实际测试中,通常需要满足被测电缆的长度要远大于测试信号的波长。因此,被测电缆可以被视为一种传输线分布参数网络,由分布在传输线上的线路电气参数所描述。由传输线理论^[23-24]可知,分布参数模型如图 1 所示。

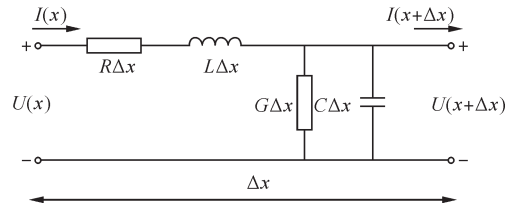


图 1 电缆的分布参数模型

Fig. 1 Distributed parameter model of power cables

图 1 中, Δx 为电缆的单位长度。电阻 R 和电感 L 可近似表示为:

$$\begin{cases} R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \\ L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} + \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2\mu_0}{\omega}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; $\omega=2\pi f$ 为角频率; f 为电磁波的频率; r_c 、 r_s 分别为缆芯半径和屏蔽层内半径; ρ_c 、 ρ_s 分别为缆芯电阻率和屏蔽层电阻率。电导 G 和电容 C 可以表示为:

$$\begin{cases} G = \frac{2\pi\sigma}{\ln(r_s/r_c)} \\ C = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln(r_s/r_c)} \end{cases} \quad (2)$$

式中 σ 、 ε 分别为电导率和介电常数。

1.2 带缺陷的电缆模型

当电缆局部区域的物理结构发生变化或老化时,缺陷区域的单位长度电容发生变化将使电缆产生缺陷。缺陷段的传播常数和特性阻抗变化将直接改变电缆的反射系数谱的成分。图2给出了测试信号在长度为 l 且在 x_0 处有1个长度为 d_0 的缺陷的电缆模型中的传输过程^[20]。

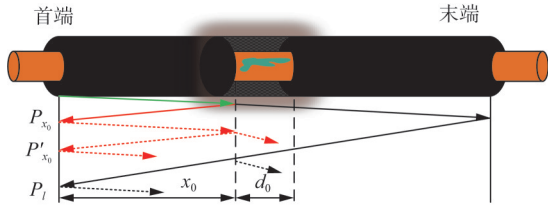


图2 带一个缺陷的电缆模型

Fig. 2 Cable model with a defect

在图2中, P_{x_0} 为缺陷处的一次反射波, P'_{x_0} 为缺陷处的二次反射波, P_l 为电缆末端的一次反射波。由文献[25]可知, P_{x_0} 的表达式为:

$$P_{x_0} = (1 - \rho_1^2) \rho_2 e^{-2\gamma(\omega)x_0} \quad (3)$$

式中: ρ_1 为电缆模型在首端的反射系数; ρ_2 为缺陷处的反射系数; $\gamma(\omega)$ 为电缆模型的传播系数。 P'_{x_0} 的表达式为:

$$P'_{x_0} = (1 - \rho_1^2)(-\rho_1) \rho_2^2 e^{-4\gamma(\omega)x_0} \quad (4)$$

值得一提的是,由于反射系数 ρ_1 和 ρ_2 的模是小于1的,因此缺陷处的二次反射波 P'_{x_0} 的幅值远小于一次反射波 P_{x_0} 的幅值。 P_l 的表达式为:

$$P_l = (1 - \rho_1^2)(1 - \rho_2^2) \rho_3 e^{-2\gamma(\omega)l} \quad (5)$$

式中 ρ_3 为电缆模型在末端的反射系数。因此,图2所示电缆模型的反射系数谱的表达式为:

$$\begin{aligned} \Gamma &= P_{x_0} + P'_{x_0} + P_l + \dots \\ &= \sum_{i=1}^p A_i e^{\theta_i} e^{-2\alpha x_i} [\cos(2\beta x_i) + j \sin(2\beta x_i)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: p 为反射波的数量; A_i 为第 i 个波的幅值; θ_i 为第 i 个波的相位; x_i 为第 i 个反射波的位置; α 为衰减变量; β 为相位变量,且有:

$$\beta = \frac{2\pi f}{v} \quad (7)$$

式中 v 为测试信号的平均波速。将式(7)代入式(6)中并取实部可得:

$$s(f) = \sum_{i=1}^p A_i e^{\theta_i} e^{-2\alpha x_i} \cos(2\pi \frac{2x_i}{v} f) \quad (8)$$

从式(8)可以看出,当以频率 f 为自变量时,在电缆在距首端 x_i 处存在阻抗发生失配时,反射系数谱的实部 $s(f)$ 会出现等效频率 $f_i = 2x_i/v$ 的分量^[26]。因此,可以通过式(9)对缺陷进行定位。

$$x_i = \frac{1}{2} v f_i \quad (9)$$

因此对电缆缺陷定位的关键在于估算反射信号的频率 f_i 。

2 基于Pisarenko谐波分解的反射系数谱的频率估计

Pisarenko谐波分解方法是Pisarenko在20世纪70年代初提出的一种谐波频率估计方法^[27],它是一种参数估计法,相比于传统的非参估计法,该方法具有更高的分辨率。且该方法在声呐、雷达等诸多领域中得到广泛应用。因此本文采用Pisarenko谐波分解方法来估计电缆反射系数谱中的频率。

首先采用一个线性差分模型将式(8)所示信号表示为:

$$s(n) + \sum_{i=1}^p a_i s(n-i) = 0 \quad (10)$$

式中: a_i 为差分系数; n 为样本序号。考虑到测试环境中存在噪声,式(10)可以改写为:

$$\begin{cases} x(n) + \sum_{i=1}^p a_i x(n-i) = w(n) + \sum_{i=1}^p a_i w(n-i) \\ s(n) = x(n) - w(n) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $x(n)$ 为真实值; $w(n)$ 为均值为0、方差 σ^2 为的高斯白噪声。显然,式(11)是一个特殊的ARMA过程,它的AR阶数与MA阶数相等,记作ARMA(p, p)。然后,令

$$\begin{cases} \mathbf{w} = [w(n), w(n-1), \dots, w(n-p)]^T \\ \mathbf{a} = [1, a_1, \dots, a_p]^T \\ \mathbf{x} = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-p)]^T \end{cases} \quad (12)$$

则式(11)可以改写为:

$$\mathbf{x}^T \mathbf{a} = \mathbf{w}^T \mathbf{a} \quad (13)$$

将式(13)两边左乘 $\mathbf{x}$ 并取期望值。

$$E[\mathbf{x}\mathbf{x}^T]\mathbf{a} = E[\mathbf{x}\mathbf{w}^T]\mathbf{a} \quad (14)$$

根据式(14), 令 $\mathbf{x}$ 的自相关矩阵为 $\mathbf{R}$ 和, 可以推导出:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}\mathbf{a} &= E[\mathbf{x}\mathbf{w}^T]\mathbf{a} \\ &= E[(\mathbf{s} + \mathbf{w})\mathbf{w}^T]\mathbf{a} \\ &= E[\mathbf{s}\mathbf{w}^T + \mathbf{w}\mathbf{w}^T]\mathbf{a} \\ &= E[\mathbf{w}\mathbf{w}^T]\mathbf{a} \\ &= \sigma^2 \mathbf{a} \end{aligned} \quad (15)$$

式中 σ^2 、 $\mathbf{a}$ 分别为 $\mathbf{R}$ 的特征值与特征向量。然后将 $\mathbf{a}$ 代入式(16)。

$$1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_p z^{-p} = 0 \quad (16)$$

式中 z 的表达式为:

$$z_i = \exp(j2\pi f_i) \quad (17)$$

在求出式(16)的特征根后, 根据式(18)获得反射系数谱中的频率。

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \arctan[\text{Im}(z_i)/\text{Re}(z_i)] \quad (18)$$

最后, 根据式(9)完成对电缆缺陷的精确定位。

本文算法的流程图如图3所示。

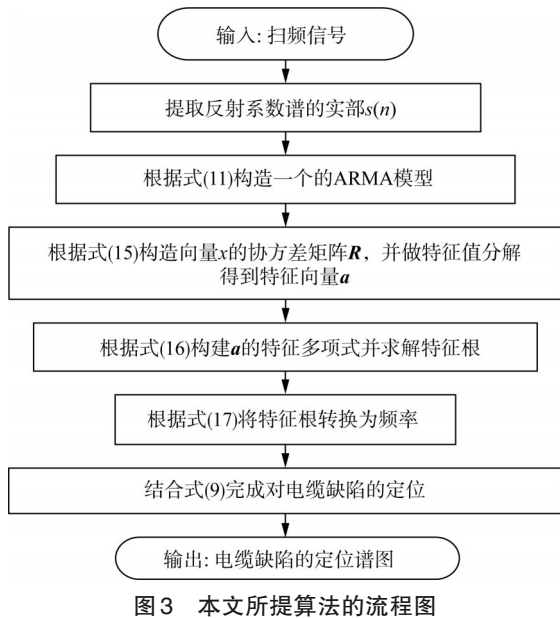


Fig. 3 Flow chart of the proposed algorithm in this paper

3 电缆模型的仿真分析

本文通过在MATLAB2017a版本中的仿真来验证所提方法的可行性。

3.1 不考虑首端影响条件下的仿真

首先, 本文根据图2建立一个带缺陷的电缆模型。具体参数设置如下: 缺陷到首端的距离 $x_0=200$ m, 缺陷的长度 $d_0=0.8$ m(约一个电缆接头的长度), 电缆的总长 $l=500$ m。扫频信号的起始频率设置为150 kHz, 截止频率设置为50 MHz, 扫频步长设置为0.01 MHz, 得到的反射系数谱如图4(a)所示。为了突出所提方法的优越性, 本文采用传统的FDR方法与所提方法做对比, 两种方法的定位结果如图4(b)所示。

图4(a)所示, 在没有首端影响下, 电缆模型的反射系数谱的实部是由多个指数衰减信号叠加而成, 这与式(8)所示的模型一致。由图4(b)可知, FDR和本文方法在200 m和500 m处都有峰值, 分

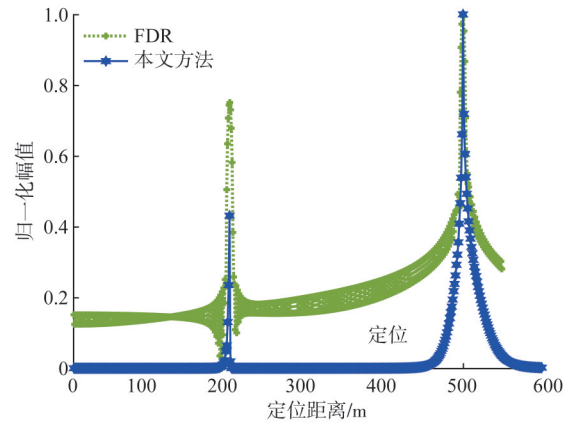
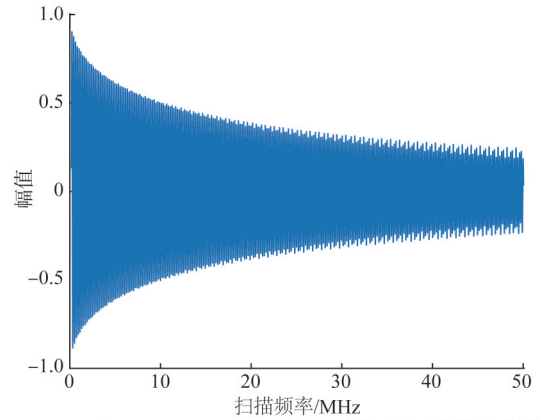


图4 不考虑首端影响条件下, 在150 kHz~50 MHz带宽内的电缆模型仿真结果

Fig. 4 Simulation results of cable model in the bandwidth of 150 kHz~50 MHz without considering the influence of the test terminal

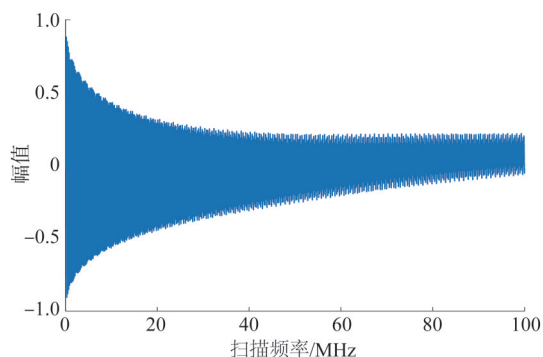
别代表缺陷和电缆的末端,表明FDR和本文方法均能有效定位出缺陷的位置。然而,在FDR的定位缺陷中存在一些频谱泄露,本文方法的定位曲线中不存在频谱泄露,且较为平滑。此外,对比FDR和本文方法的定位峰值,可以明显看出,本文方法对缺陷具有更高的定位分辨率。

3.2 首端影响条件下的缺陷定位仿真

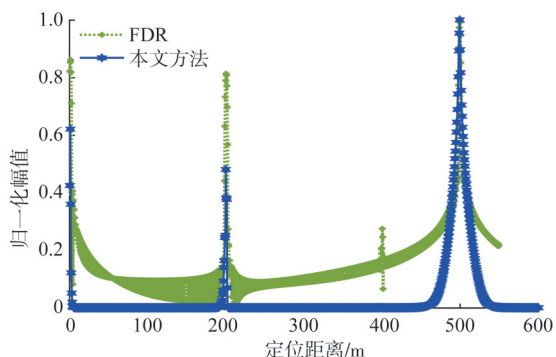
在实际的电力电缆测试中,电缆首端处的特性阻抗与测试夹具间的特性阻抗严重不匹配。因此,首端的影响通常是不能被忽略的。

在本节仿真中,本文设置测试线的长度 $l'=0.5$ m,电缆首端处的电容值设置为电缆本体电容值的0.5倍,扫描的截止频率为100 MHz,采样步长为0.02 MHz(与3.1节保持采样点数一直),其余参数与3.1节一致。在考虑首端影响后的反射系数谱实部如图5(a)所示。FDR方法与本文方法的定位曲线如图5(b)所示。

对比图5(a)和图4(a)可知,在首端的影响下图5(a)所示波形产生了畸变,即结果不再是围绕 $y=0$ 上下波动了。这是因为在测试端产生了一个低频的



(a) 在首端影响下, 150 kHz~100 MHz带宽内的电缆反射系数谱的实部



(b) FDR方法和本文方法对受到首端影响下的电缆缺陷定位结果

图5 在首端影响的条件下对电缆缺陷的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of cable defects under the condition of the influence of the test terminal

阻尼震荡信号,所以反射系数谱的实部的均值不再是0。同时,反射系数谱的实部不再只包含缺陷和末端的反射波,还有缺陷处的多次反射波,这使得后续定位更加复杂。在图5(b)中,FDR的定位缺陷除了0 m、200 m和500 m处有峰值外,还在400 m处有一个峰值(如绿色虚线所示)。这是缺陷处的二次反射波造成的,且很容易引起对缺陷的误判。而在本文方法的定位曲线上只在0 m、200 m和500 m处有峰值,分别代表了首端、缺陷和末端,没有任何伪峰的影响。这表明本文方法对伪峰具有抑制的能力。

4 实际案例分析

为了验证本文所提算法的实用性,将本文方法用于对一组现场案例进行处理分析。该案例是国内乃至世界上最长的一根三相500 kV的海底光电复合电缆,型号是290/500 kV-3×800,长度约为58 km。它的首端为陆地GIS终端油浸插拔接头,末端为海上升压站。采用实验室自行研制的第1代测试设备对该海缆进行测试,测试现场如图6所示。该设备的参数如下。输出测量电压:AC 5 V;频率范围:150 kHz~3 GHz;最大测试点数量:20 000点;适用电压等级:任何电压等级的电缆;定位门限调节:-200 dB~0 dB;Kaiser窗调节因子:0~12。测试海缆的具体测试参数为:起始频率为150 kHz,截止频率为0.4 MHz,采样点数量为3 000个。C相采样的反射系数谱实部如图7(a)所示。同样采用FDR和本文方法对该C相的数据进行处理得到的定位曲线如图7(b)所示。

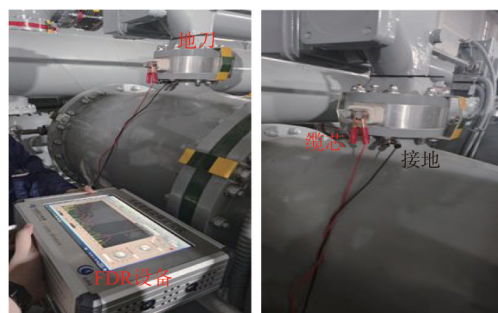


图6 58 km海底电缆的测试现场

Fig. 6 Test site of 58 km submarine cable

图7(a)的反射系数谱的实部波形符号指数衰减模型,畸变很小。表明该58 km海缆的C相处于正

常状态。从图 7(b)可知, FDR 和本文方法均能够有效定位 C 相的末端。然而, 在 FDR 的定位曲线中, 分别在 19.18 km 和 37.81 km 处存在两个峰值, 这很容易造成测试人员的误判, 且存在大量噪声。而本文方法的定位曲线较为光滑且没有伪峰。

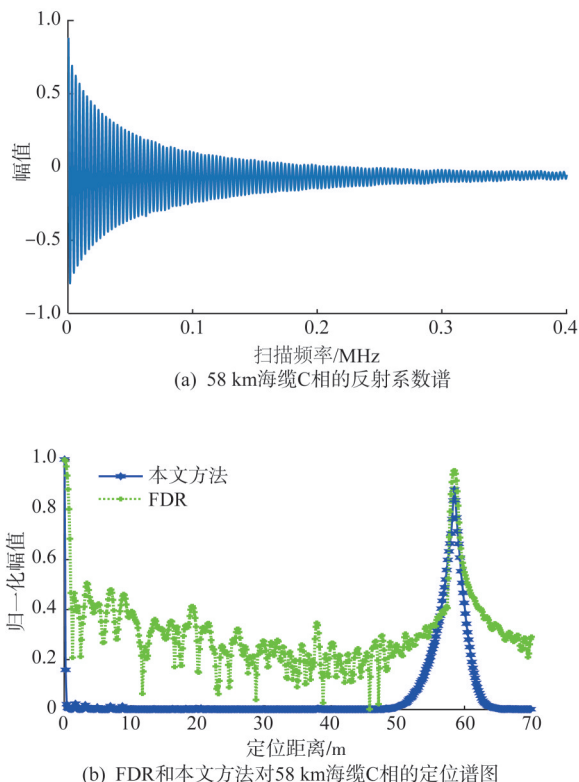


图 7 58 km 海缆 C 相的测试结果

Fig. 7 Test results of C-phase of 58 km submarine cable

5 结论

针对传统 FDR 方法的定位谱图存在频谱泄露和伪峰的问题, 提出了一种基于 Pisarenko 谐波分解的电缆缺陷定位方法。该方法具有以下特征。

- 1) 采用线性差分模型代替了传统的 FFT, 避免了反射系数谱的非周期性带来的频谱泄露问题;
- 2) 构造了一个 ARMA 模型, 将传统的非参估计转换为参数估计, 提高了对缺陷的定位分辨率;
- 3) 仿真分析和现场 58 km 海缆的测试均验证了本文方法可以有效抑制伪峰, 使得定位曲线更平滑, 提高了缺陷定位的可靠性。

参考文献

[1] 刘鹏程, 田立斌, 冯杰, 等. 基于 S 变换与时频域反射的电缆缺陷定位方法[J]. 绝缘材料, 2023, 56(3): 47-53.

LIU Pengcheng, TIAN Libin, FENG Jie, et al. Defect location method of cable based on S-transform and time-frequency domain reflectometry[J]. Insulating Materials, 2023, 56(3): 47-53.

[2] 赵书静, 龚梁涛, 詹博博, 等. 电缆局部缺陷的步进频连续波定位方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 2121-2130.

ZHAO Shujing, GONG Liangtao, ZHAN Bobo, et al. Location method for local defects of cable based on stepped frequency continuous wave technology [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2121-2130.

[3] 冀大雄, 周佳龙, 钱建华, 等. 海底电缆检测方法发展现状综述[J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 36-49.

JI Daxiong, ZHOU Jialong, QIAN Jianhua, et al. Current development review of submarine cable detection methods[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 36-49.

[4] 牛荣泽, 张凯, 谢芮芮, 等. 基于随机森林的电缆管网综合监测系统研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 74-81.

NIU Zerong, ZHANG Kai, XIE Ruirui, et al. Research on monitoring system of cable network pipeline based on random forest[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 74-81.

[5] 张晓新, 董灵斌, 林峰, 等. 自取电的电缆故障类型及故障分段定位的研究[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 116-122.

ZHANG Xiao, DONG Lingbin, LIN Feng, et al. Research on fault types and fault segment location of self-feeding cable[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 116-122.

[6] 饶显杰, 周凯, 黄永禄, 等. 频域反射法中阻抗变化类型判断技术[J]. 电工技术学报, 2021, 36(16): 3457-3466.

RAO Xianjie, ZHOU Kai, HUANG Yonglu, et al. Type judgement technology of impedance variation in frequency domain reflection method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(16): 3457-3466.

[7] 董海迪, 张瑞, 王浙娜, 等. 基于时域反射法的电力电缆网络故障诊断方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 32-36.

DONG Haidi, ZHANG Rui, WANG Xina, et al. Research on fault diagnosis method of power cable network based on time domain reflectometry [J]. Computer Measurement & Control, 2024, 32(3): 32-36.

[8] 王兴, 张琪, 陈亮, 等. 时域反射法在核级电缆状态监测的应用[J]. 电子技术应用, 2021(S1): 28-31.

WANG Xing, ZHANG Qi, CHEN Liang, et al. The use of time-domain reflectometry (TDR) in early detection of the nuclear cable defects[J]. Application of Electronic Technique, 2021(S1): 28-31.

[9] 王晓宁. 基于 TDR 和 TDC 的铁路电缆故障检测仪[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.

[10] 唐作鑫, 周凯, 徐叶飞, 等. 考虑衰减补偿的频域反射单元平均恒虚警率电缆缺陷识别方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5194-5205.

TANG Zuoxin, ZHOU Kai, XU Yefei, et al. Frequency domain reflectometry cell average constant false alarm rate cable defect identification method considering attenuation compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5194-5205.

[11] 陈璐, 李光茂, 杨森, 等. 频域响应法在电力电缆缺陷定位中的研究综述[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 53-64.

CHEN Lu, LI Guangmao, YANG Sen, et al. Research review of frequency domain response method and Its application in

- defect location of power cables [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 53 – 64.
- [12] TANG Zhirong, ZHOU Kai, XU Yefei, et al. A reflection coefficient estimation method for power cable defects based on three-point interpolated FFT [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73(12): 1 – 8.
- [13] 王志武, 涂画, 李力行, 等. 基于时频域反射法的核电站仪控电缆缺陷检测[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 240 – 249.
- WANG Zhiwu, TU Hua, LI Lixing, et al. Defect detection of I&C cable in NPP based on TFDR[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 240 – 249.
- [14] 操雅婷, 周凯, 孟鹏飞, 等. 基于正交匹配-伪魏格纳分布的电缆缺陷定位[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4489 – 4498.
- CAO Yating, ZHOU Kai, MENG Pengfei, et al. Cable defect location based on orthogonal matching Pursuit and Pseudo Wigner-Ville distribution [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4489 – 4498.
- [15] 王昱皓, 周凯, 汪先进, 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): 2584 – 2594.
- WANG Yuhao, ZHOU Kai, WANG Xianjin, et al. Power cable defects location based on improved time-frequency domain reflectometry [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2584 – 2594.
- [16] 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]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3236 – 3245.
- LI Rong, ZHOU Kai, RAO Xianjie, et al. Identification and location of cable faults based on input impedance spectrum [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3236 – 3245.
- [17] 梁骥. 基于改进时频域反射电缆缺陷定位方法的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- [18] TANG Zhirong, ZHOU Kai, MENG Pangfei, et al. A frequency-domain location method for defects in cables based on power spectral density [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71(7): 1 – 10.
- [19] TANG Zhirong, XU Yefei, ZHOU Kai, et al. A frequency sweep location method for soft faults of power cables based on MUSIC-pseudospectrum [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72(3): 1 – 10.
- [20] ZHOU Kai, TANG Zhirong, MENG Pangfei, et al. A novel method for sign judgment of defects based on phase correction in power cable [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73(10): 1 – 9.
- [21] HIRAI N, YAMADA T, OHKI Y. Comparison of broadband impedance spectroscopy and time domain reflectometry for locating cable degradation [C]// IEEE International Conference on Condition Monitoring & Diagnosis, September 23 – 27, 2012, Bali, Indonesia. New York: IEEE, 2012: 229 – 232.
- [22] TANG Zhirong, ZHOU Kai, HUANG Jingtao. A soft fault location method for power cable based on AR Model [C]// 2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), May 07 – 10, Shanghai, China. New York: IEEE, 2023: 1 – 4.
- [23] 董寅超, 赵林海, 冯栋. 基于传输线理论的列车分路阻抗研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(10): 87 – 95.
- DONG Yinchao, ZHAO Linhai, FENG Dong. Research on train shunting impedance based on transmission line theory [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(10): 87 – 95.
- [24] JING Liwen, WANG Wenjie, LI Zhao, et al. Detecting impedance and shunt conductance faults in lossy transmission lines [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(7): 3678 – 3689.
- [25] 谢敏, 李烨, 俞骏, 等. 频域反射法阻抗匹配技术及其在电缆衰减补偿与相速度计算中的应用[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1762 – 1769.
- XIE Min, LI Ye, YU Jun, et al. Impedance matching technology for frequency domain reflectometry and its application in cable attenuation compensation and phase velocity calculation [J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1762 – 1769.
- [26] HUANG Jingtao, ZHOU Kai, XU Yefei, et al. Upper sweeping frequency selection for cable defect location based on STFT [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72(5): 1 – 9.
- [27] 王志群, 朱守真, 周双喜. 基于Pisarenko谐波分解的间谐波估算方法[J]. 电网技术, 2004(15): 72 – 77, 82.
- WANG Zhiquan, ZHU Shouzheng, ZHOU Shuangxi. Inter-harmonics estimation by pisarenko harmonic decomposition method [J]. Power System Technology, 2004(15): 72 – 77, 82.

收稿日期: 2023-11-07; 网络首发日期: 2024-06-29

作者简介:

冯杰(1985), 男, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统分析、运行与控制及电缆故障检测工作;

王大兴(1985), 男, 高级工程师, 硕士, 从事高电压与绝缘技术研究工作;

唐志荣(1993), 男, 通信作者, 博士研究生, 从事电缆缺陷诊断与信号处理工作, 913865538@qq.com。