

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615037

基于时频分析的电缆故障定位方法研究*

白龙雷¹, 陶翰林¹, 李 浩¹, 丁文硕¹, 邹 亮²

(1. 烟台哈尔滨工程大学研究院 烟台 264000; 2. 山东大学电气工程学院 济南 250061)

摘 要: 同轴电缆长期运行过程中易受环境及老化因素影响而发生故障, 其中早期故障引起的特征阻抗变化较小、反射信号微弱, 难以准确检测。现有扩展频谱时域反射法 (SSTDR) 虽然具有较大的测距范围, 但受码元持续时间限制, 对早期故障敏感性不足; 而步进频率波反射法 (SFWR) 具有较高的故障识别灵敏度, 但存在数据处理复杂及测距范围有限等问题。针对上述问题, 提出一种基于时频分析的扩展频谱步进频率波反射 (SSFWR) 电缆故障定位方法。首先, 基于电缆分布式参数模型与有限元模型, 分析电缆早期故障引起的特征阻抗变化规律; 随后构建 SSFWR 信号, 实现扩展频谱信号与步进频率信号的融合调制; 通过对采集信号进行互相关处理获取故障反射信息, 并结合变分模态分解 (VMD)、短时傅里叶变换 (STFT) 及重排谱 (RSP) 分析, 实现故障特征增强与定位识别; 最后, 在同轴交联聚乙烯电缆上开展开路、短路、铜屏蔽层破损及缆芯断裂等故障实验验证。结果表明, 所提方法在参数设计条件下具有 3.4~3 245.7 m 的理论测距范围, 能够有效识别典型硬故障及早期故障特征; 相比传统互相关方法, 基于能量域互相关的时频分析方法能够更有效地抑制旁瓣杂波干扰, 增强微弱故障特征, 提高早期故障检测与定位能力, 验证了所提方法在电缆早期故障诊断中的有效性。

关键词: 电缆故障定位; 时频分析; 扩频步进调制; 变分模态分解; 短时傅里叶变换

中图分类号: TH701 TM755 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

Research on cable fault location method based on time-frequency analysis

Bai Longlei¹, Tao Hanlin¹, Li Hao¹, Ding Wenshuo¹, Zou Liang²

(1. Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai 264000, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Coaxial cables are susceptible to faults during long-term operation due to environmental influences and aging effects. Since incipient faults usually cause only slight variations in characteristic impedance and generate weak reflected signals, accurate detection remains challenging. The existing spread spectrum time-domain reflectometry (SSTDR) method provides a wide-ranging capability, but its sensitivity to incipient faults is limited by the chip duration of the modulation sequence. In contrast, stepped-frequency wave reflectometry (SFWR) offers high fault-identification sensitivity but suffers from complex data processing and a limited ranging. To address these problems, this paper proposes a spread spectrum stepped-frequency wave reflectometry (SSFWR)-based cable fault location method combined with time-frequency analysis. First, the variation law of characteristic impedance caused by incipient cable faults is analyzed based on a distributed parameter model and a finite element model of the cable. Subsequently, an SSFWR signal is constructed by integrating spread spectrum modulation with stepped-frequency waveform modulation. Fault reflection information is obtained through cross-correlation processing of the acquired signals, and variational mode decomposition (VMD), short-time Fourier transform (STFT), and reassigned spectrogram (RSP) analysis are further employed to enhance fault features and achieve fault localization. Finally, experimental validations involving open-circuit faults, short-circuit faults, copper shielding layer defects, and conductor core fracture defects are carried out on cross-linked polyethylene coaxial cables. The results show that the proposed method provides a theoretical ranging capability from 3.4 to 3 245.7 m under the designed parameter conditions and can effectively identify both typical hard faults and incipient fault characteristics. Compared with the conventional cross-correlation method, the energy-domain cross-

收稿日期: 2026-03-17 Received Date: 2026-03-17

* 基金项目: 国家自然科学基金 (52401402)、山东省自然科学基金 (ZR2024QE078) 项目资助

correlation-based time-frequency analysis method can more effectively suppress sidelobe clutter interference, enhance weak fault features, and improve the detection and localization performance of incipient faults, demonstrating the effectiveness of the proposed method for incipient cable fault diagnosis.

Keywords: cable fault location; time-frequency analysis; spread spectrum stepped-frequency modulation; VMD; STFT

0 引言

随着“双碳”战略目标的深入推进,我国对新能源的开发、研究与利用发展迅猛,而这些能源的传输都离不开电缆的作用。电力电缆因其绝缘间距小,送电可靠性、安全性更高,输电损耗小、载流量大等优势,在输配电网中广泛应用,支撑整个社会经济的正常运转。

而电缆的缺点也显而易见,由于其恶劣的敷设环境,电缆在长期使用过程中面临着严峻的考验^[1]。一方面,配电网低压电缆中间分支多,应力损伤显著,树障鼠害频发、漏电概率大等问题突出;另一方面,低压电缆穿管入地,发生破损漏电难以监测核查。同时,这些由于外部环境因素导致的电缆绝缘缺陷常常引起频繁的局部放电、闪络现象,进而演变成一种特殊的早期间歇性电弧故障^[2]。因此,快速检测电缆早期故障和定位故障对快速恢复供电、提高电缆的运维效率具有重要意义^[3]。

目前,电缆故障定位技术主要分为阻抗法和行波法两类^[4]。其中,阻抗法以平衡电桥法为代表,适用于开路等低阻故障检测,但对于高阻故障灵敏度较低,测量误差较大。行波法根据激励信号形式的不同,可分为时域反射法和频域反射法。时域反射法是较早实现工程应用的电缆故障检测技术,具有实现简单、定位直观等优点,但其抗干扰能力有限。为提高检测信号的抗干扰性能,研究人员提出了序列时域反射法,以伪随机序列作为激励信号。在此基础上,Furse等^[5]将伪随机序列与正弦载波相结合,提出了扩展频谱时域反射法(the spread spectrum time-domain reflectometry, SSTDR)。凭借优异的抗噪性能和在线检测能力,SSTDR已成为电缆故障在线监测的重要技术之一。目前,LIVE WIRE公司开发的基于SSTDR的专用集成芯片可将故障定位误差控制在1.5%以内,检测周期缩短至10 ms。白龙雷等^[6]提出了一种混合调制电缆故障定位方法,进一步扩展了SSTDR的检测范围,但仍主要适用于开路和短路等硬故障定位。

与时域反射法相比,频域反射法在电缆早期故障检测与定位方面具有更高的灵敏度,受到国内外学者的广泛关注,并逐渐发展出宽频阻抗谱法和步进频率波反射法(the stepped-frequency wave reflectometry, SFWR)^[7-8]。其中,宽频阻抗谱法通过分析电缆首端输入阻抗谱获取故障信息。近年来,相关研究围绕局部缺陷定位、老化状态评估以及故障特征提取等方面开展了大量工作^[9-11],

为电缆早期故障检测提供了重要的理论基础和技术支撑。另一方面,步进频率信号具有频率分辨率高、对阻抗变化敏感等特点,近年来逐渐应用于电缆故障检测领域。Lee等^[12-13]利用频率步进正弦信号作为激励源,通过最小二乘拟合和离散傅里叶变换实现电缆故障定位,并结合电感耦合器完成在线检测;Giaquinto等^[14-15]针对步进频率波反射技术提出了故障定位及重叠反射信号分离算法;常开兴^[16]建立了不同类型电缆缺陷模型,并利用步进频率信号实现电缆缺陷定位。上述研究表明,SFWR在电缆早期故障检测方面具有较高灵敏度,但其数据处理过程较为复杂,不利于工程应用和硬件实现。

针对SSTDR测距范围与早期故障识别能力难以兼顾,以及SFWR测距范围有限等问题^[17-18],本文提出一种基于时频分析的扩展频谱步进频率波反射方法。首先基于电缆分布式参数模型构建扩展频谱步进频率波反射(spread spectrum stepped-frequency wave reflectometry, SSFWR)信号,并分析其传播与反射特性;随后通过互相关处理获取故障反射信息,并结合变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)、短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)以及重排谱(reassigned spectrogram, RSP)分析,实现早期故障的特征增强与定位识别;最后搭建电缆故障检测实验平台,对电缆硬故障和早期故障开展实验验证,以验证所提方法的有效性。

1 扩展频谱步进频率波调制检测原理

1.1 电缆分布式参数模型分析

电缆对信号的传输特性可用传输线理论来描述,传输线对高频信号的传输特性取决于其长度与信号波长等因素,正弦信号的波长 λ 定义如式(1)所示。

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

式中: v 为高频信号的传播速度; f 为频率,信号频率越高,波长越短。当传输线的长度足够长,传输线特性在整个输入阻抗中占有重要比重,此时,需要采用分布式参数模型进行分析,如图1所示。

图1中, R 、 L 、 G 、 C 分别表示电缆单位长度的电阻、电感、电导和电容。电缆的特征阻抗 Z_0 公式如下:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2)$$

当高频信号在电缆中传输时, $R \ll j\omega L$, $G \ll j\omega C$,则

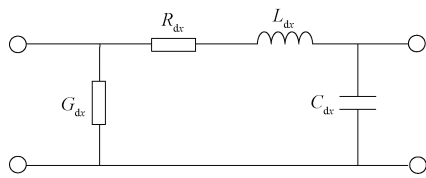


图 1 电缆分布式参数模型

Fig. 1 Cable distribution parameter model

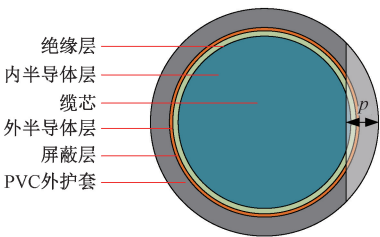


图 2 同轴电缆电磁模型

Fig. 2 Electromagnetic model of coaxial cable

此时特征阻抗可近似为：

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{3}$$

当电缆发生故障或缺陷时,该点处的特征阻抗发生变化,在电缆中传输的高频行波会在故障点处发生折射和反射现象。故障点处的特征阻抗为 Z_1 , ρ 为反射系数,为故障点处反射电压和入射电压的比值, γ 为透射系数,为透射电压与入射电压的比值。 ρ 和 γ 公式如下：

$$\begin{cases} \gamma = \frac{2Z_1}{Z_0 + Z_1} \\ \rho = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_0 + Z_1} \end{cases} \tag{4}$$

由式(4)可以看出,透射信号的极性与入射信号一致,信号强度与电缆的故障程度有关,反射信号的极性和强度与故障点处的特征阻抗有关。当电缆发生短路故障时,入射信号发生全反射,反射信号与入射信号极性相反,此时 $\rho = -1$,当电缆发生开路故障时,入射信号和反射信号极性相同,此时 $\rho = 1$ 。当电缆发生绝缘破损故障时,由于故障点处的特征阻抗变化较小,因此反射系数 ρ 的范围在 $[-1, 1]$,并且随缺陷严重程度而变化。

1.2 早期故障有限元分析

电缆的早期故障是一种由电缆局部绝缘破损引起的间歇性电弧故障^[17],通常不会立即引发保护动作跳闸,但随着时间推移,可能逐步发展为永久性故障。实际工程中,电缆早期故障类型较为复杂,包括热老化、水树枝、绝缘破损、机械挤压以及铜屏蔽层破损、缆芯局部断裂等多种形式。这些缺陷均会引起局部电磁场分布变化,从而导致单位长度电容、电导等分布参数发生改变,形成阻抗不连续点,并进一步影响信号传播特性。本文特征阻抗变化参考文献[16]。

分布式参数模型用于描述电缆中高频行波的传播与反射机理,而有限元模型则用于分析早期故障条件下电缆结构变化对分布参数的影响。为了进一步定量分析电缆早期故障对特征阻抗的影响,并完善分布式参数模型,本文采用 Ansys 仿真软件建立同轴电缆电磁模型,如图 2 所示。基于 Q2D Extractor 构建电缆电磁仿真模型,模拟早期故障对同轴电缆分布式参数的影响。

在仿真中,将绝缘破损过程简化为破损深度 p 逐渐

增加的结构演化模型,从电缆完好状态出发,首先破坏 PVC 护套,随后依次影响外半导体层、交联聚乙烯绝缘层、内半导体层直至缆芯。破损深度 p 的范围为 $0 \sim 14$ mm,其示意如图 3 所示。该模型主要描述绝缘破损类早期故障的结构演化特征。

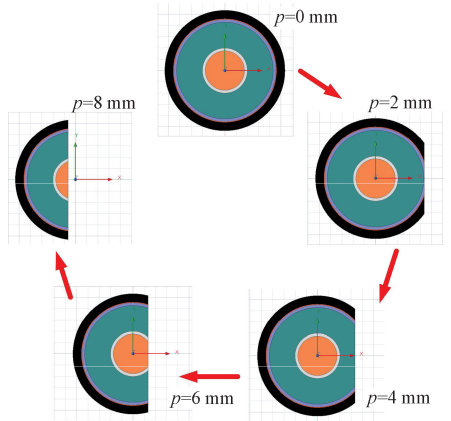


图 3 同轴电缆绝缘破损早期故障演化模型

Fig. 3 Evolution model of incipient insulation damage in coaxial cables

在仿真过程中,将工作频率设置为 15 MHz。在频率确定的条件下,电缆特征阻抗主要由其分布式参数决定。通过对破损深度进行参数扫描,分析不同破损程度下分布参数变化对特征阻抗的影响。通过对同轴电缆破损深度进行参数扫描,得到特征阻抗随破损程度变化趋势,如图 4 所示。

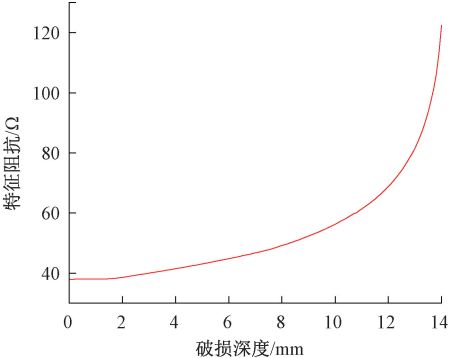


图 4 同轴电缆特征阻抗随破损程度变化情况

Fig. 4 The characteristic impedance of the coaxial cable with the degree of damage

由图4可知,随着电缆破损程度增加,特征阻抗总体呈现增大趋势。当破损由外护套向绝缘层和缆芯扩展时,电缆内部电场分布发生变化,导致分布参数偏移,从而引起特征阻抗增大。当破损进一步扩大并影响屏蔽层及缆芯结构时,特征阻抗变化速率进一步加快。

1.3 SSFWR 电缆故障定位原理

SSFWR 电缆故障定位方法如图5所示,参考信号与入射信号同相位,将调制出的步进频信号注入待测电缆,在电缆首端采集反射信号,将参考信号和反射信号进行互相关处理,得到电缆故障信息。

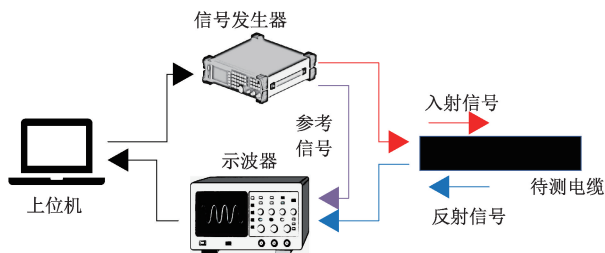


图5 SSFWR 电缆故障定位系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fault location of cables based on SSFWR technology

利用电缆首端采集的故障信号与参考信号的相似性来进行电缆的故障测距。数学上通过互相关函数来表征两个序列的相似性,对于长度为 N 的离散序列 $x(n)$ 和 $y(n)$,其互相关的计算公式如式(5)所示。

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^N x_i y_i \quad (5)$$

同理,利用自相关函数来表征 $x(n)$ 和本身序列延迟之后 $x(n+\tau)$ 的相似程度,计算公式如式(6)所示。

$$R_x(\tau) = \sum_{i=1}^N x_i x_{i+\tau} \quad (6)$$

SSFWR 信号调制的过程如图6所示,计算公式如式(7)所示。

$$x(f_i, t) = A m_1(f_i, t) m_2(f_i, t) \cdot \sin(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (7)$$

式中: A 为 SSFWR 信号的幅值;频率 f 的范围为 $1 \sim 31$ MHz,以 1 MHz 进行步进,每个频率的正弦波持续时间为 $1 \mu\text{s}$; $m_1(f_i, t)$ 为码元持续时间固定的 5 阶 m 序列,单个码元持续时间为 $1 \mu\text{s}$; $m_2(f_i, t)$ 为码元持续时间随正弦信号频率步进的 5 阶 m 序列; θ_i 表示步进正弦信号的初始相位; t 的持续时间为 $31 \mu\text{s}$ 。

反射信号的计算公式如式(8)所示。

$$y(f_i, t) = B_i m_1(f_i, t - \tau) m_2(f_i, t - \tau) \cdot \sin(2\pi f_i(t - \tau) + \theta_i) \quad (8)$$

由于各频率调制信号在电缆中传播衰减程度不同,导致反射信号不同频率成分的幅值不同,本文用 B_i 来表

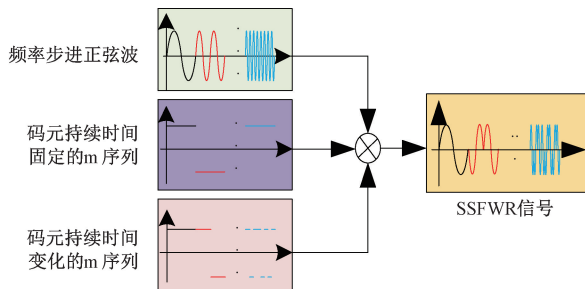


图6 SSFWR 信号调制原理

Fig. 6 The schematic diagram of SSFWR signal modulation

示不同频率成分反射的幅值, τ 表示传输信号的传输延迟,在电缆首端采集到的信号为入射信号和反射信号的叠加,计算公式如式(9)所示。

$$x_i(f_i, t) = x(f_i, t) + y(f_i, t) \quad (9)$$

对 SSFWR 信号进行互相关处理,得到两个峰值,分别代表入射和反射信号的位置,计算可得信号在电缆中的传播时间,故障点位置计算公式如下:

$$l = \frac{vt}{2} \quad (10)$$

式中: v 为行波在电缆中传播的速度; l 为故障的距离; t 为行波在电缆中传输的时间。

由图6可知,SSFWR 信号由频率步进的正弦波、码元持续时间固定的 5 阶 m 序列,码元持续时间随步进频率正弦波的周期变化的 5 阶 m 序列 3 部分相乘调制而成。通过该调制,所获得的 SSFWR 信号克服了 SSTDR 方法测距范围受码元持续时间限制的缺点,且保留了步进频信号对电缆早期故障敏感的优点,同时还简化了步进频信号的数据处理过程。

文献[7]总结了不同码元持续时间 m 序列的测距范围,该调制方式中包含了 31 种不同码元持续时间的 m 序列,已知测得的高频行波在同轴电缆中传播速度为 $209.4 \text{ m}/\mu\text{s}$,该方法的电缆故障检测范围可由式(11)求得,SSFWR 法电缆故障检测范围为 $3.4 \sim 3\,245.7 \text{ m}$ 。

$$\begin{cases} x_{\max} = \frac{vNT_{\max}}{2} \\ x_{\min} = \frac{vT_{\min}}{2} \end{cases} \quad (11)$$

1.4 基于 VMD 和 RSP 的电缆早期故障定位方法研究

在电缆故障定位系统中,对电缆首端采集到的入射信号和反射信号进行互相关处理,能够有效提取到电缆的开路和短路这类硬故障信息,但对于早期故障,进行互相关运算不能准确定位其位置。因此,还需对互相关结果进行进一步处理,以获得电缆早期故障信息。

本文采用 VMD 对互相关结果进行分析,然后用短时傅里叶变换获得互相关结果的能量谱。为减小测量盲区,

提高缺陷的辨识度,将获得的能量谱图进行重排 RSP,然后提取距离能量的二维曲线进行电缆早期故障定位。

变分模态分解是一种基于维纳滤波和希尔伯特变换的新自适应分解方法^[19]。该方法能有效滤除信号中的高斯噪声,具有较高的鲁棒性^[20],在处理微弱信号方面具有优势。

对于给定的待分解信号 $f(t)$,需要找到 K 个窄带模态分量,并且使每个窄带模态分量的带宽估计之和达到最小,通过希尔伯特变换,获得 $f(t)$ 的解析信号。

对信号梯度平方 $L2$ 的范数估计各本征模态的带宽,建立带有约束的最优化问题如式(12)所示。

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t. } \sum_{k=1}^K u_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $u_k(t)$ 表示第 k 个本征模态分量; ω_k 为第 k 个模态的中心频率; ∂ 为梯度算子, $\delta(t) + j/\pi t$ 为希尔伯特变换算子,通过引入拉格朗日算子法和二次惩罚因数 α 将约束问题转化为无约束问题,如式(13)所示。

$$\begin{aligned} \Gamma(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \\ \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{1}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \\ \|f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t)\| + \langle \lambda(t), f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \rangle \end{aligned} \quad (13)$$

通过交替更新 u_k^{n+1} 、 ω_k^{n+1} 、 λ 来求解上试的最优解。其中, $\{u_k\}$ 、 $\{\omega_k\}$ 、 λ 的更新公式如式(14)所示。

$$\hat{U}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{l \neq k} \hat{u}_l(\omega) - \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (14)$$

式中: $f(\omega)$ 表示待分解信号 $f(t)$ 的功率谱; $\hat{u}_k(\omega)$ 表示第 k 个模态分量的功率谱。中心频率的计算公式如式(15)所示。

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\bar{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\bar{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (15)$$

短时傅里叶变换能量谱公式如式(16)所示。

$$E(\tau, f, h) = |\text{STFT}(\tau, f, h)|^2 \quad (16)$$

式中: f 为归一化频率; h 表示窗函数,这里选取 hanning 窗进行数据处理,为了减小定位盲区,将能量谱图进行重排,使能量分布更集中。谱图重排得计算公式如下:

$$\begin{aligned} \hat{t}(t, f) &= t - \text{Re} \left\{ \frac{\text{STFT}(t, f; h) \text{STFT}^*(t, f; h)}{|\text{STFT}(t, f; h)|^2} \right\} \\ \hat{f}(t, f) &= f + \text{Im} \left\{ \frac{\text{STFT}(t, f; H) \text{STFT}^*(t, f; h)}{|\text{STFT}(t, f; h)|^2} \right\} \\ H &= \frac{dh(t)}{dt} \end{aligned} \quad (17)$$

重排后的谱图为:

$$\text{RSP}_x(t', f') = \iint_{-\infty}^{\infty} \text{STFT}_x(t, f) \delta(t' - \hat{t}) \delta(f' - \hat{f}) dt df \quad (18)$$

最后根据行波波速和时间,提取故障距离和能量的二维曲线,即可确定早期故障的位置。

2 仿真实验

2.1 电缆硬故障定位仿真

为了验证 SSFWR 方法针对同轴电缆硬故障检测方面的能力,基于电缆的分布式参数模型,在 Simulink 平台搭建了不同长度和故障类型的电缆故障模型进行测试。

电缆的仿真参数如表 1 所示,设置无故障电缆的特征阻抗为 50Ω ,故障类型包括 4、20、400 m 处的开路故障和短路故障。

表 1 电缆仿真参数

Table 1 The simulation parameters of cable		
电缆长度/m	特征阻抗/ Ω	行波波速/($\text{m} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)
4、20、400	50	209.4

SSFWR 开路故障仿真检测结果如图 7 所示,SSFWR 短路故障仿真检测结果如图 8 所示。

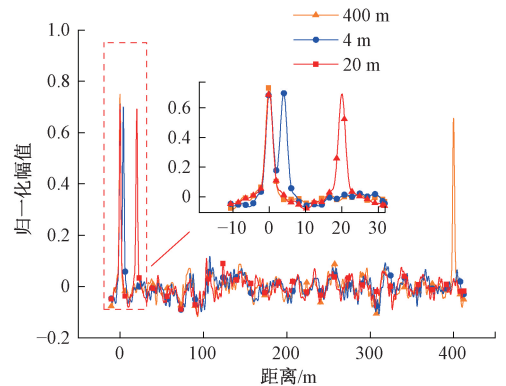


图 7 SSFWR 开路故障仿真检测结果

Fig. 7 Simulation results of SSFWR open-circuit fault detection

SSFWR 电缆硬故障结果如表 2 所示,可知 SSFWR 方法在定位电缆开路故障和短路故障时,最大测量误差为 0.5%,最小测量误差为 0.01%。由图 7 和 8 仿真检测结果可知,其中开路故障表现为正反射峰,短路故障表现为负反射峰,反射峰位置与实际故障位置基本一致。

进一步分析可知,在 4、20 和 400 m 不同故障距离条件下,SSFWR 方法均能够实现较稳定的故障定位。随着故障距离增加,定位误差未出现明显增大。相较于传统

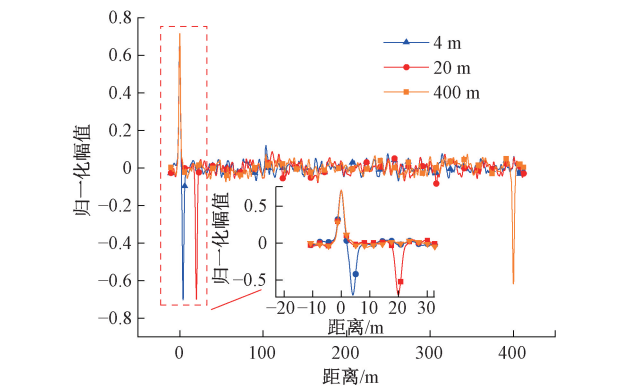


图 8 SSFWR 短路故障仿真检测结果

Fig. 8 Simulation results of SSFWR short-circuit fault detection

表 2 SSFWR 电缆硬故障结果分析

Table 2 Analysis of hard cable fault results based on SSFWR			
故障位置/m	故障类型	实测距离/m	误差/%
4	开路	3.979	0.5
	短路	3.979	0.5
20	开路	20.102	0.5
	短路	19.893	0.5
400	开路	399.954	0.01
	短路	399.954	0.01

扩展频谱时域法,SSFWR 方法的主峰更加突出,旁瓣干扰较小,从而减小了故障检测盲区,提高了定位精度。

2.2 电缆早期故障定位仿真

在仿真中,将一段缺陷电缆串联在两段健康电缆中间构成传输线缺陷模型,通过改变缺陷电缆的特征阻抗来模拟不同程度的电缆局部缺陷^[21],缺陷仿真参数设置如表 3 所示。在电缆的首端注入 SSFWR 信号,将数据做互相关处理,得到结果如图 9 所示。

表 3 早期故障仿真参数

Table 3 Simulation parameter for cable defects		
编号	缺陷位置/m	特征阻抗/ Ω
1	20~20.05	50
2	20~20.05	40
3	20~20.05	45
4	20~20.05	52
5	20~20.05	60

由图 9 可知,当电缆发生绝缘破损时,互相关结果会在早期故障处形成一个反射峰。随着缺陷程度的增加,

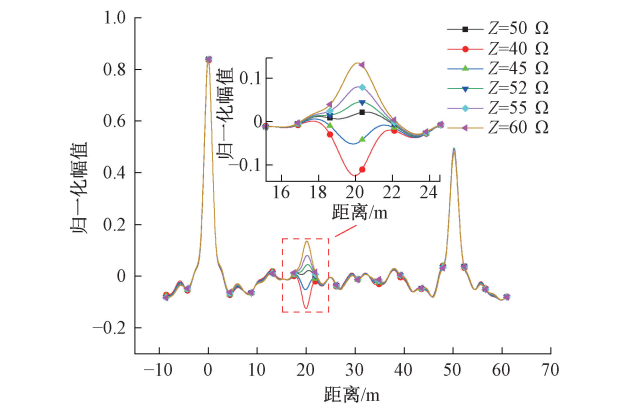


图 9 早期故障互相关定位结果

Fig. 9 Cross-correlation localization results of early faults

反射峰愈加明显。但低频信号对特征阻抗变化不明显,低频段反射信号的丢失会导致反射峰的幅值变小,且一次互相关运算无法过滤所有杂波,在仿真中,无法完全模拟实际情况,互相关结果的参考价值有限。

为了更好地定位早期故障,提高该方法的实际应用价值,在互相关计算基础上,选取最大峰和次级峰之间的数据部分,进行进一步分析。对数据进行变分模态分解,第 1 模态分量如图 10 所示,在第 1 模态分量的最大峰和次大峰之间存在其他峰值点,该处即为缺陷位置,对第 1 模态分量进行短时傅里叶变换,并进行谱图重排,结果如图 11 所示。早期故障定位结果如图 12 所示。

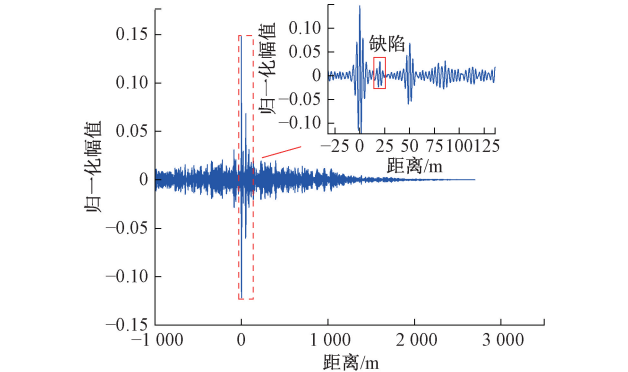


图 10 变分模态分解第 1 模态分量

Fig. 10 The first modal component of variation modal decomposition

由图 12 可知,当电缆在距离首端 20 m 处发生缺陷时,特征阻抗发生变化,与无缺陷电缆相比,随着特征阻抗变化程度的加大,该处的谱线变化越来越剧烈,并且与互相关相比,杂波的干扰更小,定位结果为 20 ± 2 m,随着缺陷程度的增加,定位精度逐渐升高。通过对数据进一步处理,提高了该方法在早期故障检测方面的适用性。

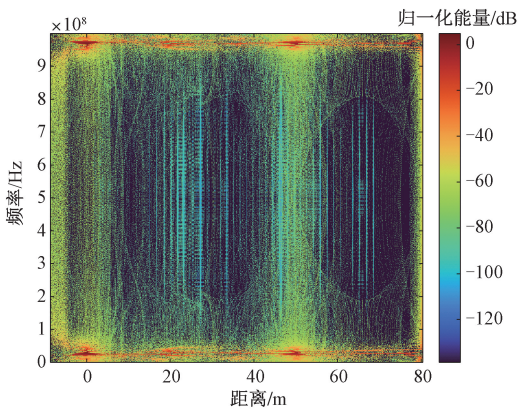


图 11 第 1 模态分量能量重排谱图
Fig. 11 Energy rearrangement spectrum of the first modal component

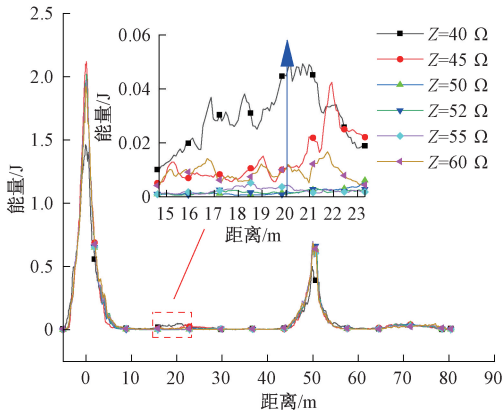


图 12 早期故障能量域互相关定位结果
Fig. 12 Energy-domain cross-correlation localization results of incipient faults

3 实验验证

3.1 电缆硬故障定位实验验证

为验证本文所提 SSFWR 方法在电缆硬故障定位中的有效性,本文在实验室搭建了电缆故障检测平台,实验平台如图 13 所示。实验对象为带屏蔽层的同轴交联聚乙烯电缆^[22],电缆硬故障参数如表 4 所示。通过在电缆不同位置设置开路与短路故障,以模拟电缆硬故障状态。

表 4 同轴电缆硬故障参数设置

Table 4 Setting parameters for coaxial cables

编号	故障位置/m	故障参数
1	20	开路/短路
2	30	开路/短路
3	50	开路/短路

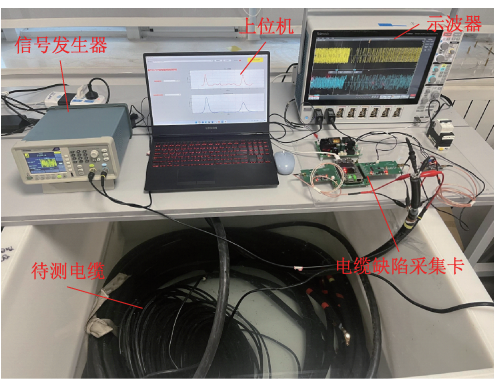


图 13 SSFWR 电缆故障检测平台
Fig. 13 Experimental platform of cable fault location based on SSFWR

实验平台主要包括信号发生器、示波器、电缆缺陷采集卡及计算机等。实验过程中,信号发生器产生两路幅值与相位相同的 SSFWR 信号,其中一路注入待测电缆,另一路作为参考信号,用于后续故障定位分析。

SSFWR 实测信号如图 14 所示,其中图 14(a)为 SSFWR 入射信号,图 14(b)为在电缆首端采集到的混合信号。实验时,首先根据表 4 设置不同故障位置及故障类型,并保持实验环境与仪器参数一致;随后由电缆缺陷采集卡同步采集电缆首端反射信号与参考信号,并传输至计算机进行数据处理与故障定位。为减小随机噪声及实验误差对定位结果的影响,在相同实验条件下,对每种故障状态均重复开展 5 次测量实验。

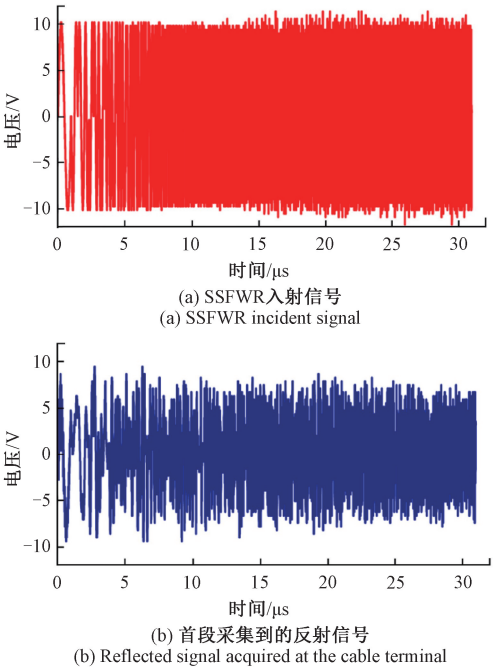


图 14 SSFWR 入射信号和反射信号
Fig. 14 The SSFWR incident signal and reflected signal

实验结果表明,各次测量得到的故障定位结果波动较小,具有良好的重复性与稳定性。

电缆硬故障检测结果如图 15、16 所示,分别表示同轴电缆的开路和短路故障实验检测的结果。电缆故障定位结果如表 5 所示。由表 5 可知,在本文构建的实验条件下,SSFWR 方法能够对开路和短路故障实现有效识别,在所测试距离范围内定位误差均控制在 3% 以内,表现出较好的故障定位能力。

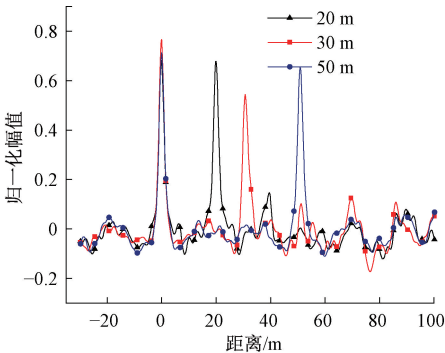


图 15 SSFWR 开路故障实验检测结果

Fig. 15 Experimental results of SSFWR open-circuit fault detection

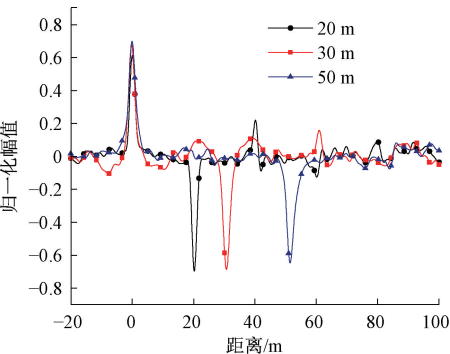


图 16 SSFWR 短路故障实验检测结果

Fig. 16 Experimental results of SSFWR short-circuit fault detection

表 5 电缆故障定位结果

Table 5 Fault location results of cable faults				
电缆类型	编号	故障类型	实测距离/m	误差/%
同轴电缆	1	开路/短路	19. 789/20. 068	1. 1/0. 34
	2	开路/短路	30. 833/30. 520	2. 7/1. 7
	3	开路/短路	50. 866/51. 284	1. 7/2. 6

3. 2 电缆早期故障定位实验验证

在电缆实际运行中,发生绝缘破损的概率远大于短路和开路故障,因此,本文基于 SSFWR 方法,在实验室搭

建了同轴电缆铜屏蔽破损检测平台,早期故障样品如图 17 所示。图 17 (a) 为电缆铜屏蔽层破损缺陷,图 17 (b) 为缆芯部分断裂缺陷。电缆的铜屏蔽缺陷设置如表 6 所示。

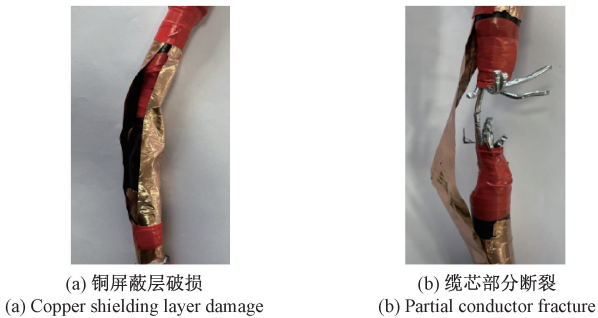


图 17 早期故障样品
Fig. 17 Cable defect samples

表 6 同轴电缆铜屏蔽破损缺陷设置
Table 6 Defect setting of copper shielding damage in coaxial cables

编号	缺陷位置/m	铜屏蔽覆盖面积/%
1	20~20. 3	100
2	20~20. 3	75
3	20~20. 3	50
4	20~20. 3	25
5	20~20. 3	10
6	20~20. 3	导线

表 6 中,模拟了同轴电缆铜屏蔽层不同程度破损缺陷,示意图如图 18 所示。图 18 (a) 为电缆铜屏蔽层破损缺陷,图 18 (b) 为电电缆芯破损缺陷。逐步切除同轴电缆的铜屏蔽层,当铜屏蔽层完全切除后,用导线对屏蔽层进行跨接连接。其时域互相关定位结果如图 19 所示,能量域互相关定位结果如图 20 所示。

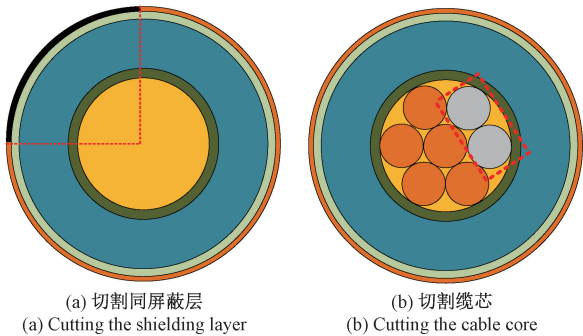


图 18 早期故障示意图
Fig. 18 Schematic of incipient faults

由图 19、20 可知,当同轴电缆仅破坏外部绝缘层,缆芯及铜屏蔽层均未破损时,在缺陷处未见到明显的反射波信号,随着铜屏蔽层破损程度的增加,缺陷处的特征阻抗逐渐变大,缺陷处反射信号幅值逐渐增大,对比图 19 和 20 可知,当铜屏蔽覆盖面积由 100%降低至 25%时,两种方法均无法实现电缆缺陷定位,当铜屏层仅连接 10%时,能量域互相关定位曲线在距电缆首端 21.5 m 附近出现明显反射峰值。

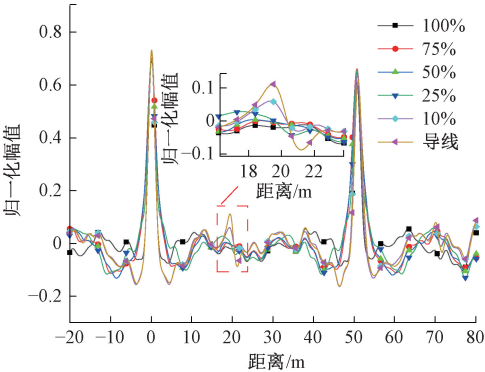


图 19 同轴电缆铜屏蔽层缺陷互相关定位结果
Fig. 19 Cross correlation localization results of defects in copper shielding layer of coaxial cable

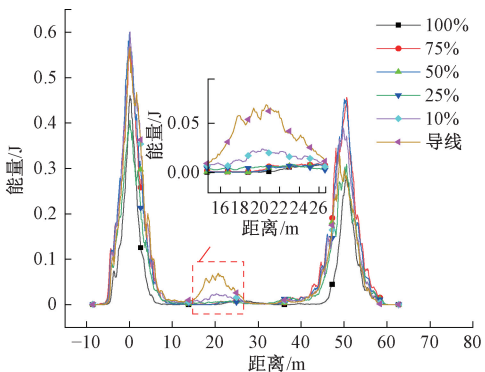


图 20 同轴电缆铜屏层缺陷能量域互相关定位结果
Fig. 20 Energy-domain cross-correlation localization results for copper shielding layer defects in coaxial cables

考虑到早期故障反射信号较弱,且能量域处理会导致峰值区域出现一定扩展,因此定位结果与实际缺陷位置存在一定偏差,其相对误差为 7.5%,而互相关定位曲线则无法识别该缺陷,当同轴电缆铜屏蔽层完全切除,并用导线将屏蔽层连接起来时,两种方法均能实现电缆缺陷检测,互相关定位结果为 19.5 m,能量域互相关定位结果为 20.4 m,后者的绝对误差更小,对比可知,能量域互相关定位结果的旁瓣杂波明显减少。

本文采用的同轴电缆型号为 YJV8.5/15 kV-35 mm²,缆芯为多股线结^[23],由 7 根相同的细铝线组成。在模拟早

期故障电缆缺陷时,将多股线分批剪断来模拟同轴电缆缆芯断裂缺陷,缺陷设置如表 7 所示,缆芯局部断裂示意图如图 17(b)所示。

表 7 同轴电缆缆芯断裂缺陷设置		
Table 7 Defect setting of coaxial cable core fracture		
编号	缺陷位置/m	缆芯断裂股数
1	20~20.3	0
2	20~20.3	2
3	20~20.3	4
4	20~20.3	6
5	20~20.3	7

图 21 所示为同轴电缆缺陷互相关定位曲线互相关定位结果,图 22 所示为同轴电缆缆芯断裂缺陷能量域互相关定位结果,通过分析可知,仅对入射信号和反射信号进行互相关处理,无法获得电缆缺陷位置,从图 22 局部放大图来看,通过对数据进行能量域处理,能够准确定位缆芯断裂位置,同轴电缆缺陷最大定位误差 9.4%,最小定位误差为 1.1%,本文所提方法在同轴电缆缆芯断裂缺陷定位效果上优于传统互相关算法。

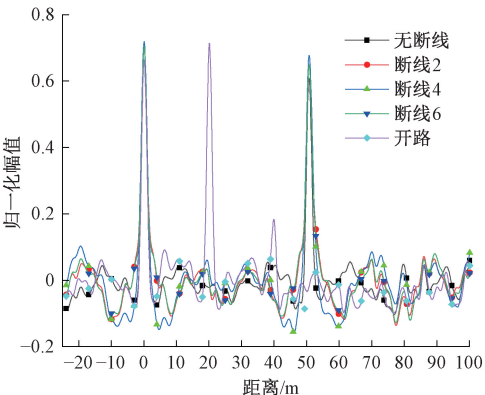


图 21 同轴电缆缆芯断裂缺陷互相关定位结果
Fig. 21 Cross correlation results of coaxial cable core fracture defects

实验结果表明,基于 SSFWR 方法的电缆故障定位方法,具有宽范围的电缆故障检测能力,同时,将互相关结果进行变分模态分解、短时傅里叶变换、谱图重排等操作,实现了基于 SSFWR 方法的早期故障定位。

4 结果分析与讨论

4.1 SSTDR 方法和 SSFWR 方法的比较

文献[8]提到传统 SSTDR 方法由于自身测试信号调制机理的限制,即 m 序列的周期性以及不同码元持续时

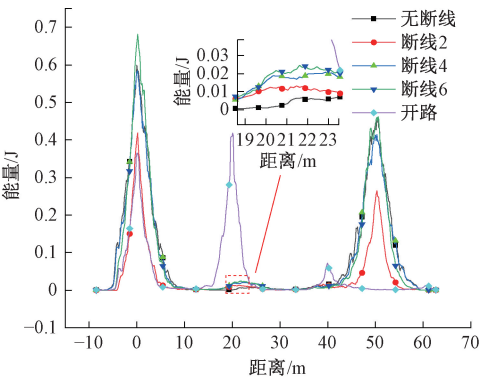


图 22 同轴电缆缆芯断裂缺陷能量域互相关定位结果
Fig. 22 Energy-domain cross-correlation localization results for coaxial cable core fracture defects

间会影响测距范围的问题,导致其测距时存在“高频信号测试距离短、低频信号测试盲区大”的局限,限制了其在长距离输电电缆故障诊断与定位中的推广应用。第 3 节实验主要验证 SSFWR 方法在电缆故障检测中的定位能力与早期故障识别性能,现基于实验中实测得到的电缆传播波速,对 SSFWR 方法的理论测距范围进行分析,并与 SSTDR 和 SFWR 方法进行比较。

在实验前,测得波速在电缆中传播的速度为 $209.4\text{ m}/\mu\text{s}$,以 5 阶 m 序列为例,总结了同一阶次下两种方法的电缆故障检测距离。其中,表 8 是 SSTDR 方法中不同码元持续时间对应的电缆故障检测范围,表 9 是 SSFWR 方法中以 1 MHz 为单位从 1 MHz 步进到 31 MHz 过程中,每个频率下的码元持续时间对应的电缆故障检测范围。

表 8 SSTDR 中码元持续时间与测距范围关系
Table 8 The relationship between symbol duration and ranging range in SSTDR

码元持续时间/ μs	最短测距/m	最长测距/m
10	1047	32 457
1	104.70	3 245.70
0.2	20.94	649.20
0.1	10.47	324.57
0.04	4.19	129.83

由表 8 可以看出,随着 m 序列码片时间的不断增加,该方法的测距盲区和最大测量范围都逐渐增大,而测量盲区的增大又会限制了该方法的现场应用。另外,国内外基于 SSTDR 方法的电缆故障检测研究在开路和短路领域有比较好的效果,而对于早期故障的检测存在一定的局限性。

由表 9 可以看出,SSFWR 方法采用包含 31 种不同码元持续时间的 m 序列调制方式,并通过 1~31 MHz 的

表 9 SSFWR 方法中码元持续时间与测距范围关系
Table 9 The relationship between symbol duration and ranging range in SSFWR

频率/MHz	码元持续时间/ μs	最短测距/m	最长测距/m
1	1	104.70	3 245.70
2	0.5	52.35	1 622.85
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
15	0.067	6.98	216.38
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
30	0.033	3.49	108.19
31	0.032	3.38	104.7

频率步进,实现了更灵活的测距范围调节。理论计算表明,其故障检测范围可覆盖 $3.4\sim3\,245.7\text{ m}$,改善了 SSTDR 方法因固定码元持续时间导致的测距范围受限问题。同时,SSFWR 通过引入高频分量提高了对弱故障特征的敏感性。这一特性使 SSFWR 能够更有效地识别电缆的早期故障,弥补了传统 SSTDR 方法在早期故障检测方面的不足。

4.2 SFWR 方法和 SSFWR 方法的比较

文献[16]提到 SFWR 方法的电缆定位原理是通过采集入射信号和反射信号,然后获得反射信号相对于入射信号的相位延迟来实现的,经过推导可得步进频率波反射法最大测量距离和分辨率计算公式如式(19)所示。

$$\begin{cases} l_{\max} = \frac{v}{2\Delta f} \\ \Delta l = \frac{v}{2n\Delta f} \end{cases} \quad (19)$$

式中: v 表示行波波速; Δf 表示步进频率的间隔; n 为步进频率波的总个数。由此可知,该方法的测量距离有限。同样以本实验中用到的同轴交联聚乙烯电缆为例,取 $v=209.4\text{ m}/\mu\text{s}$,步进频率间隔取 1 MHz,频率从 1 MHz 步进到 31 MHz,步进频率波个数为 31,比较 SFWR 方法与 SSFWR 方法在电缆故障检测中的适用性。

SFWR 与 SSFWR 方法在相同频率参数下的测距性能如表 10 所示,可以看出,在相同的测试条件下,SFWR 方法和 SSFWR 方法虽具有相同的分辨率,但最大测距距离存在显著差异,SFWR 方法仅能实现 104.7 m 的测量范围,在长距离电缆故障诊断定位中难以满足长距离电缆故障定位需求。此外,该方法数据处理复杂,难以在硬件上部署实现,采用单频信号注入仍会存在盲区问题,抗干扰性能差,无法在低信噪比下工作。

相比传统 SSTDR 与 SFWR 方法,本文构建的 SSFWR 信号在理论分析中表现出更大的测距范围,并兼顾了高

表 10 SFWR 与 SSFWR 方法在相同频率参数下的测距性能对比

Table 10 Comparison of ranging performance of SFWR and SSFWR method under the same frequency parameters

方法	频率范围/ MHz	步进间隔/ MHz	最大测距/ m	分辨率/ m
SFWR	1~31	1	104.7	3.4
SSFWR	1~31	1	3 245.7	3.4

频检测灵敏度与宽范围测距能力,为后续时频分析定位提供了有效的信号基础。

5 结 论

本文结合 SSTDR 与 SFWR 的特点,提出了一种基于时频分析的电缆故障定位方法。通过构建 SSFWR 信号,并结合变分模态分解、短时傅里叶变换及重排谱分析,实现了电缆硬故障与早期故障的定位识别。实验结果验证了所提方法在电缆故障定位中的有效性,得出如下结论:

- 1) 所提 SSFWR 方法在参数设计条件下具有较大的理论测距范围,并能够在所测试距离范围内实现对开路、短路等典型硬故障的有效识别,表现出较好的故障定位能力。
- 2) 针对电缆早期故障弱反射特征难以识别的问题,本文结合变分模态分解、短时傅里叶变换及能量域互相关分析方法,实现了早期故障特征增强与定位识别,提高了早期故障检测能力。

参考文献

[1] 张伟超,张鹏宇,王暄,等. 电缆接头局部放电高频柔性传感器技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(10): 282-293.

ZHANG W CH, ZHANG P Y, WANG X, et al. Research on high-frequency flexible sensor technology for partial discharge in cable joints[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(10): 282-293.

[2] YUE K Y, ZHENG Y, WANG ZH G, et al. Early fault identification method of distribution cable based on PSO-DBN [C]. 2025 6th International Conference on Electrical, Electronic Information and Communication Engineering (EEICE). New York: IEEE, 2025: 957-960.

[3] 李斌,蒋鑫. 基于多策略融合的电缆接头故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报,2026,47(5):231-245.

LI B, JIANG X. Fault diagnosis method for cable joints based on multi-strategy fusion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2026,47(5):231-245.

[4] 王东林,周胜,易畅. 行波法在配电线路故障定位中的应用[J]. 电工技术, 2025(20): 180-182.

WANG D L, ZHOU SH, YI CH. Application of traveling wave method in fault location of distribution lines[J]. Electrical Engineering, 2025(20): 180-182.

[5] FURSE C, SMITH P, SAFAVI M, et al. Feasibility of spread spectrum sensors for location of arcs on live wires[J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(6): 1445-1450.

[6] 白龙雷,范道平,罗博,等. 基于混合调制海底直流电缆故障定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2025,45(4): 1623-1632.

BAI L L, FAN D P, LUO B, et al. Research on fault location method for submarine DC cable based on mixed modulation[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2025,45(4): 1623-1632.

[7] 付佳佳,刘彩霞,李玉洁,等. 基于步进频率波反射的低压电缆局部绝缘破损诊断及定位技术研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(10): 118-126.

FU J J, LIU C X, LI Y J. Research on diagnosis and location technology of partial insulation damage of low-voltage cables based on stepped frequency wave reflection[J]. Insulating Materials, 2025, 58(10): 118-126.

[8] SONG C, MU H B, ZOU X Y, et al. Time-frequency fusion algorithms for cable fault diagnosis based on stepped-frequency waveform reflection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1-11.

[9] 朱光亚,潘松焜,沈青,等. 基于反射系数修正与局部能量提取的电缆故障在线定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(7): 2716-2727.

ZHU G Y, PAN S K, SHEN Q, et al. On-line cable fault location method based on reflection coefficient correction and local energy extraction[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2026, 46(7): 2716-2727.

[10] ZHAO K, GRIVET-TALOCIA S, MANFREDI P, et al. Size assessment of power cable shield corrosion defects

- using double-frequency time-frequency-domain reflectometry[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 1-11.
- [11] SONG C, MU H B, ZOU X Y, et al. Application of stepped-frequency waveform reflectometry to locating and characterizing line-like aging faults in cables [J]. *Measurement*, 2025, 254: 117866.
- [12] LEE Y H, KWON G Y, SHIN Y J. Contactless monitoring technique for live shielded cable via stepped-frequency waveform reflectometry and inductive coupler[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 69(9): 9494-9503.
- [13] LEE C K, KWON G Y, LEE Y H, et al. Insulation characteristics and fault analysis of HTS cable via stepped frequency waveform reflectometry[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(5): 1-5.
- [14] GIAQUINTO N, SCARPETTA M, SPADAVECCHIA M. Separation of overlapping reflected signals in stepped-frequency waveform reflectometry [C]. 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). New York: IEEE, 2020: 1-6.
- [15] GIAQUINTO N, SCARPETTA M, SPADAVECCHIA M. Algorithms for locating and characterizing cable faults via stepped-frequency waveform reflectometry [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(9): 7271-7280.
- [16] 常开兴. 基于步进频率波形反射的电力电缆局部缺陷检测方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- CHANG K X. Local defect detection method of power cable based on stepped frequency waveform reflectometry[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [17] XING Y H, YIN Y L. Incipient fault diagnosis in power cables based on WOA-CEEMDAN and a TCN-BiLSTM network with multi-head attention[J]. *Applied Sciences*, 2026, 16(8): 3908.
- [18] SEONG H M, CHANG H H, SEUNG J C. Statistical estimation of propagation constants using stepped-frequency waveform reflectometry [C]. 2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). New York: IEEE, 2024: 659-661.
- [19] 潘红宇, 吕峥, 欧建臻, 等. 基于 VMD 融合降噪的 FBG 光谱寻峰算法 [J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(4): 260-269.
- PAN H Y, LYU ZH, OU J ZH, et al. Peak-seeking algorithm for FBG spectrum based on VMD fusion denoising[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(4): 260-269.
- [20] CHEN J B, YAN Y, ZHAO K, et al. Improved double-sided partial discharge location method for high-voltage cables via pulse-injected time synchronization[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 1-15.
- [21] HUANG J T, ZHOU K, ZHAO Q, et al. Diagnosis and localization of moisture defects in hv cable water-blocking buffer layer based on characteristic impedance variation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024, 31(6): 3322-3330.
- [22] LIU CH Q, CHEN D SH, HOU Y M. Underground XLPE coaxial cable length calculation and fault detection based on broadband impedance spectroscopy[J]. *Measurement Science and Technology*, 2025, 36(1): 016146.
- [23] BUGAJSKA A, DESANIUK T. Impedance-based short-circuit fault location method in coaxial cables[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 115231-115279.

作者简介



白龙雷, 2014 年于西南交通大学获得学士学位, 2020 年于西南交通大学获得博士学位, 现任哈尔滨工程大学烟台研究院副教授, 主要研究方向为电气设备智能化故障检测与诊断等方面的研究。

E-mail: longlei0107@hrbeu.edu.cn

Bai Longlei received his B. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2014, and Ph. D. degree from Southwest Jiaotong University in 2020. Now he is an associate professor at Yantai Research Institute of Harbin Engineering University. His main research interests include intelligent fault detection and diagnosis of electrical equipment.



陶翰林, 2023 年于中国地质大学(武汉)获得学士学位, 现为哈尔滨工程大学硕士研究生, 主要研究方向为电缆故障检测。

E-mail: 13997871958@hrbeu.edu.cn

Tao Hanlin received his B. Sc. degree from China University of Geosciences (Wuhan) in 2023. Now he is an M. Sc. candidate at Harbin Engineering University. His main research interests include cable fault detection.



李浩,2024 年于西南交通大学获得学士学位,现为哈尔滨工程大学硕士研究生,主要研究方向为电缆故障检测。

E-mail:17839637579@ 163. com

Li Hao received his B. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2024. Now he is an M. Sc. candidate at Harbin Engineering University. His main research interests include cable fault detection.



丁文硕,2025 年于西安工业大学获得学士学位,现为哈尔滨工程大学硕士研究生,主要研究方向为电缆故障检测。

E-mail:18239317812@ 163. com

Ding Wenshuo received her B. Sc. degree

from Xi'an Technological University in 2025. Now she is an M. Sc. candidate at Harbin Engineering University. Her main research interests include cable fault detection.



邹亮(通信作者),2004 年于山东大学获得学士学位,2007 年于山东大学获得硕士学位,2011 年于山东大学获得博士学位,现为山东大学教授、博士生导师,主要研究方向为高压和绝缘技术。

E-mail;zouliang@ sdu. edu. cn

Zou Liang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong University in 2004, M. Sc. degree from Shandong University in 2007, and Ph. D. degree from Shandong University in 2011. Now he is a professor and Ph. D. supervisor at Shandong University. His main research interests include high voltage and insulation technology.