

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.209

引用格式:晋科,徐征. 铁路信号电缆故障频域检测法[J]. 重庆大学学报, 2026,49(3): 25-37.



## 铁路信号电缆故障频域检测法

晋科,徐征

(重庆大学电气工程学院,重庆 400044)

**摘要:**铁路信号电缆的故障检测对铁路系统的安全运行具有重要意义。针对铁路信号电缆最为常见的高阻故障问题,通过测量多根 1 m 电缆的电气参数,分析铁路信号电缆结构的不均匀特性,并构建电缆不均匀参数的正态模型,建立铁路信号电缆的不均匀高阻故障仿真模型,验证了频域反射法(frequency domain reflectometry, FDR)在定位铁路信号电缆高阻故障方面的可行性。基于 FDR 法设计硬件系统,向电缆发射 0.1~5 MHz 扫频信号,并通过中频检波采集到了 FDR 方法所需回波信号,在上位机进行数据处理,实现了 1 000 m 内 0.1 M $\Omega$  和 0.5 M $\Omega$  的高阻故障定位,验证了 FDR 方法在检测铁路信号电缆高阻故障中的实际效果。

**关键词:**铁路信号电缆;故障检测;高阻故障;频域反射法

中图分类号:TM755

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)03-025-13

## A frequency-domain detection method for railway signal cable faults

JIN Ke, XU Zheng

(School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Fault detection of railroad signal cables is of great significance for ensuring the safe operation of railroad systems. To address the most common high-resistance fault problem in railroad signal cables, the inhomogeneous characteristics of cable structures are analyzed by measuring the electrical parameters of multiple 1 m cable segments. Based on these measurements, a normal model of inhomogeneous cable parameters is constructed, followed by the establishment of an inhomogeneous high-resistance fault simulation model for railroad signal cables. The feasibility of the frequency-domain reflectometry (FDR) method for locating high-resistance faults in railroad signal cables is then verified. Furthermore, a dedicated hardware system based on the FDR method is independently designed. This system transmits a 0.1 MHz to 5 MHz swept-frequency signal into the cable and collects the reflected signals required for FDR analysis through an intermediate-frequency detector. The collected data are subsequently processed on a host computer to realize the localization of high-resistance faults with resistance values of 0.1 M $\Omega$  and 0.5 M $\Omega$  within a cable length of 1 000 m. Experimental results confirm the effectiveness and accuracy of the FDR method for detecting and locating high-resistance faults in

收稿日期:2023-12-17 网络出版日期:2024-04-24

基金项目:东莞供电局 2022 年用户负荷人工智能分析算法及非接触式前端传感系统研究科技项目。

Supported by Research Project on Artificial Intelligence Analysis Algorithm of User Load and Non-contact Front-end Sensing System in Dongguan Power Supply Bureau in 2022.

作者简介:晋科(1999—),男,硕士研究生,主要从事电缆故障检测研究,(E-mail)20173343@cqu.edu.cn。

通信作者:徐征,教授,(E-mail)xuzheng@cqu.edu.cn。

railroad signal cables.

**Keywords:** railway signal cables; fault detection; high-resistance faults; frequency-domain reflectometry

铁路信号电缆是铁路动力控制系统专用电缆,是保障铁路系统正常运行的基石<sup>[1-2]</sup>。铁路信号电缆一旦发生故障,将影响铁路设施的正常运行,严重情况下还会引起人员伤亡及设备受损,引发重大安全事故。当前,铁路信号电缆的故障检测方法仍以电桥法、断线法、摇表法等传统电缆故障检测方法为主。这些方法多在故障发生后进行检测,时效性较差,且对以高阻故障为主的铁路信号电缆缺乏准确性,在实际电缆故障事故中,需要更换多段电缆来保证铁路的正常运行,耗费大量的人力物力,还因为时效性产生巨大的经济损失和安全隐患。因此,急需一种在电缆故障早期尚未形成安全隐患时,就能够完成故障检测及定位的测量系统,以保障铁路系统的正常运行。

现代电缆故障检测方法以行波法为主。行波法从原理上分为时域反射法(time domain reflectometry, TDR)<sup>[3-4]</sup>、频域反射法(frequency domain reflectometry, FDR)<sup>[5-8]</sup>和时频域反射法(time-frequency domain reflectometry, TFDR)<sup>[9-13]</sup>。Kameyama等<sup>[14]</sup>基于TDR方法提出最大长度序列(maximum-length sequence, M-sequence)的序列时域反射技术(sequence time domain reflectometry, STDR),提高了TDR方法的定位精度,同时可以识别多种阻抗不匹配类型。但TDR、STDR方法在定位软故障等轻微故障时,由于故障点阻抗不匹配的程度较低,无法正确识别故障。Ju等<sup>[15]</sup>将TFDR法运用在高压电缆绝缘诊断和故障定位中,实现了对电缆中的老化段和集中缺陷的定位。TFDR法基于时频互相关分析,对于微小故障具有更高的灵敏度,但是无法有效识别多次反射和散射产生的干扰信号,影响定位结果。FDR法通过向电缆注入2组扫频正弦信号,测量电缆的反射系数谱来实现故障定位,对于微小故障灵敏度更高。张巍<sup>[16]</sup>基于FDR法完成了同轴电缆故障识别的可行性实验,成功定位了同轴电缆老化故障;Tang等<sup>[17-18]</sup>基于FDR法实现了对电力电缆软故障的定位识别。

目前铁路信号电缆故障检测中行波法应用仅限于TDR,只能定位短路和断路故障,无法实现高阻故障的定位。对微小故障更加灵敏的FDR方法可以实现高阻故障的定位,针对铁路差分信号电缆高阻故障测量方面的空缺,聚焦FDR法测量高阻故障的研究,开展相关工作。

1)基于传输线理论测量电缆的电气参数构建了电缆的不均匀仿真模型,验证FDR法测量铁路信号电缆高阻故障的可行性。

2)根据FDR法原理设计铁路信号电缆高阻故障测量系统。

3)基于硬件测量系统,在实验室环境中测量铁路信号电缆高阻故障,验证FDR法的实际故障定位效果。

## 1 频域反射法基本原理

在分布参数模型中,电缆可以简化为图1中的多个RLGC参数微元的级联模型。

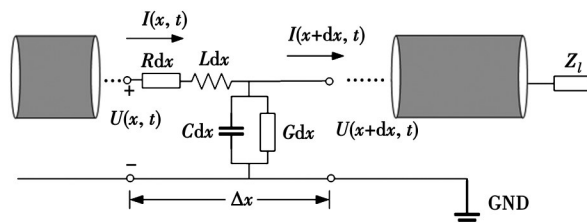


图1 传输线微元级联模型

Fig. 1 Model of transmission line microelement cascades

图1满足电报方程,通过传输线理论<sup>[19]</sup>可得距离末端 $x$ 处的电压、电流为

$$U(x) = U_i e^{-\gamma x} + U_r e^{\gamma x},$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_0} (U_i e^{-\gamma x} - U_r e^{\gamma x}), \quad (1)$$

式中: $x$ 表示距电缆末端的距离; $U_i$ 表示沿电缆正向传输的入射波; $U_r$ 表示沿电缆反向传输的反射波; $\gamma$ 为传播常数; $Z_0$ 为电缆的特征阻抗,为

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta, \\ Z_0 &= \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}. \end{aligned} \quad (2)$$

传播常数的实部 $\alpha$ 为衰减常数,表征波的幅值沿着位移方向衰减的快慢;虚部 $\beta$ 为相位常数,表示波在传播单位距离时引起的相位变化,两者共同描述波的传播特性。

反射系数定义为反射电压与入射电压的比值,将式(1)结合反射系数的定义,可以得到反射系数的表达式为

$$\Gamma(x) = \frac{U_r(x)}{U_i(x)} = \frac{U_r e^{-\gamma x}}{U_i e^{\gamma x}} = \frac{U_r}{U_i} e^{-2\gamma x}. \quad (3)$$

参考传输线理论可以进一步得到长度为 $l$ ,电缆首端反射系数为

$$\Gamma(l) = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} e^{-2\gamma l}. \quad (4)$$

电缆末端开路时,末端负载阻抗 $Z_l \rightarrow \infty$ ,反射系数的幅值为1,即入射信号在电缆末端发生全反射,此时首端反射系数为

$$\Gamma(l) = e^{-2\alpha l} (\cos(2\beta l) + j \sin(2\beta l)). \quad (5)$$

代入相位常数 $\beta = \frac{2\pi f}{v}$ ,反射系数实部的表达式转换为

$$\text{Re}(\Gamma(l)) = e^{-2\alpha l} \left( \cos\left(2 \times \frac{2\pi f}{v} \times l\right) \right) = e^{-2\alpha l} \left( \cos\left(2\pi \times \frac{2l}{v} \times f\right) \right) \quad (6)$$

式中, $v$ 为注入信号在电缆中的传播速度。式(6)表明,当自变量 $f$ 改变时,反射系数实部以 $v/2l$ 为周期进行衰减振荡。同理,反射系数虚部也以 $v/2l$ 为周期振荡,由于两者只在相位上差别 $90^\circ$ ,可以只分析反射系数实部谱(下文简称反射系数谱)。

通过式(6)可以看出,当电缆在 $l$ 处出现阻抗不匹配故障时,反射系数谱中会出现一个振荡频率为 $2l/v$ 的叠加信号,它与原电缆的振荡频率不同,可以通过不同的时频变换算法将其分离得到定位结果,图2为理想1000 m同轴电缆的500 m处故障FDR法定位结果。后文将结合傅里叶变换得到的幅度谱和文献[18]提出的功率谱法对铁路信号电缆的FDR法故障定位进行分析。

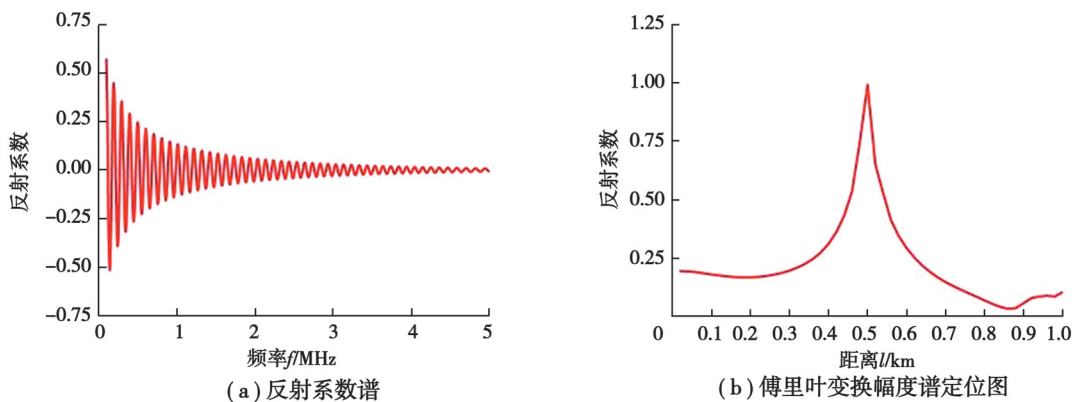


图2 1000 m同轴电缆理想FDR结果图

Fig. 2 Results of ideal FDR method for 1000 m coaxial cable

## 2 仿真建模

### 2.1 铁路信号电缆简介及其电气参数测量

铁路信号电缆的内部结构如图3所示,由2层铠装和护套构成外壳,内部无介质填充,共有9根内芯,其中8根两两对绞形成非屏蔽双绞线,每组对绞芯线间无外护套(图内对绞线外圆形外套仅为标注),与图4同轴电缆有着明显的差异。

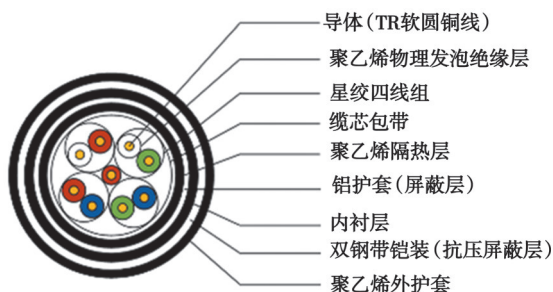


图3 铁路信号电缆截面图

Fig. 3 Cross section of railway signal cable

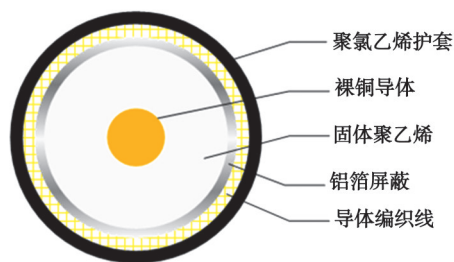


图4 同轴电缆截面图

Fig. 4 Cross section of coaxial cable

由FDR法的基本原理可知,构建长电缆的FDR法模型需要电缆分布参数。但铁路信号电缆无法直接应用同轴电缆的参数模型计算,故从传输线理论中分布参数模型的定义出发,通过测量1 m微元的参数构建长电缆的分布参数模型。选取一根标准SPTYA23型铁路信号电缆截取30根1 m电缆,采用通信电缆国标<sup>[20]</sup>方法,在0.1~5 MHz频带内使用WAYNE KERR 6500B型阻抗分析仪测量1 m电缆除绝缘电阻以外的集总参数,测量现场如图5所示。同时,用兆欧表测量多段电缆绝缘电阻值,均在该型号电缆出厂标准3 GΩ以上。

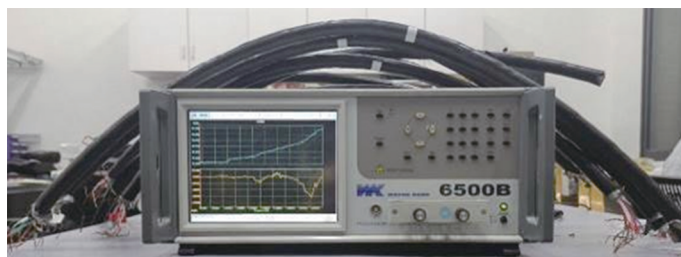


图5 WAYNE KERR 6500B型阻抗分析仪

Fig. 5 WAYNE KERR Model 6500B impedance analyzer

经过测量发现,它们的等效分布参数之间存在着一定差异。以100 kHz的参数为例,对多段电缆微元测量得到的参数进行Shapiro-Wilk检验,发现电缆的电阻、电容、电感参数均符合正态分布,该检验为统计学中常用的正态性检验,用来检测数据是否符合正态分布。故对测量参数进行正态拟合,图6为电缆参数的正态拟合Q-Q图。

如图6所示,其中串联电阻正态拟合模型的期望值为0.222 Ω,方差为0.009 1;串联电感正态拟合模型的期望值为2.020 1 μH,方差为0.002 62;并联电容正态拟合模型的期望值为13.601 pF,方差为0.029 1。铁路信号电缆本身分布参数是呈正态分布的不均匀参数,其中电容的不均匀程度最高,与均匀同轴电缆不同,需要根据此特性重新构建FDR法仿真模型,验证FDR法在测量铁路信号电缆高阻故障上的可行性。

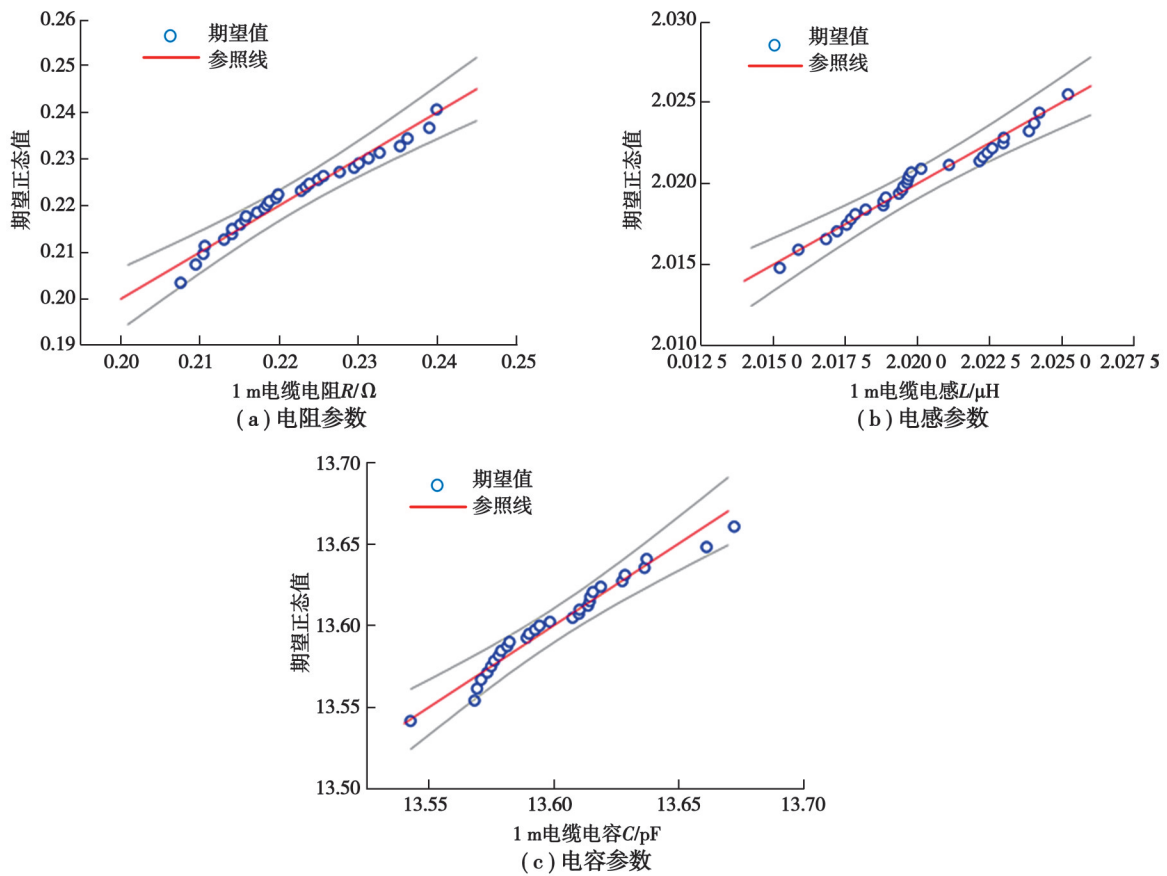


图 6 1 m 电缆正态参数图

Fig. 6 Normal parameter plot of 1 m cable

### 2.2 基于电缆的不均匀参数仿真

基于 2.1 节中电缆的测量参数和电缆参数波动的特性,搭建不均匀电缆模型,即将电缆看作多个 1 m 长微元的串联模型,根据拟合方程随机产生正态分布的电气参数值,分别导入电缆的各个微元。基于 FDR 法,在每个 1 m 长的串联模型中根据末端反射系数与阻抗计算首端反射系数与阻抗,即可得到整条电缆的不均匀电气参数仿真模型,具体流程如图 7 所示。

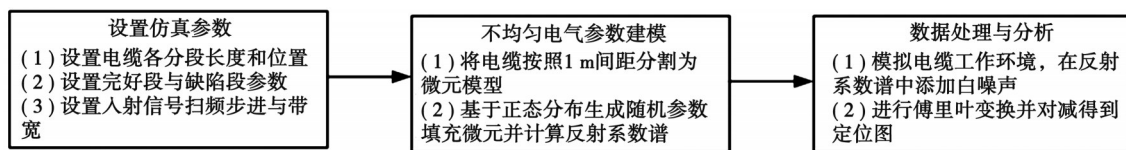


图 7 电缆故障定位仿真流程图

Fig. 7 Flowchart of locating simulation for cables with faults

依据图 7 建立高阻故障电缆仿真模型,设待测电缆长度  $l=1\ 000\ \text{m}$ ,末端设置为开路,采样步长  $f=5\ \text{kHz}$ 。为了验证 FDR 法在铁路信号电缆高阻故障定位上的可行性,对不同故障位置、故障长度、故障严重程度的电缆高阻故障模型进行仿真。

铁路信号电缆由于其结构特性,最常见的故障类型为高阻接地故障,即某一芯线的接地电阻由无穷大降低到了  $0.1\ \text{M}\Omega$  及以上,接地电阻越大代表故障程度越轻微。以此为标准设置故障处的接地电阻参数,仿真参数的具体设置如表 1 所示。表 1 中 #1 为不均匀模型与均匀模型对照组, #2、#3 为不同故障位置对照组, #4、#5 为不同故障程度对照组。

同时采用傅里叶变换幅度谱方法与功率谱方法分别对反射系数进行时频变换处理,对比2种方法在高阻故障定位上的性能。功率谱是信号处理中常用的方法,是信号自相关函数的傅里叶变换,主要反映的是信号能量在频域上的分布,相较于傅里叶变换的幅度谱,其随机性低,在频域分析时往往会有更好的效果。

表1 高阻故障电缆的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of cables with high-resistance faults

编号	故障位置 $l/m$	接地电阻 $R/M\Omega$	编号	故障位置 $l/m$	接地电阻 $R/M\Omega$
1	500	0.1	4	500	0.5
2	200	0.1	5	500	1.0
3	800	0.1			

由图8可知,均匀模型的反射系数谱较为理想,不均匀模型则畸变严重,两者有较大差异,同时定位图中均匀电缆模型会得到较为理想的定位结果,无法真正验证FDR法在铁路信号电缆故障检测上的有效性。对于铁路信号电缆,不能采用均匀参数模型,与实际不符。

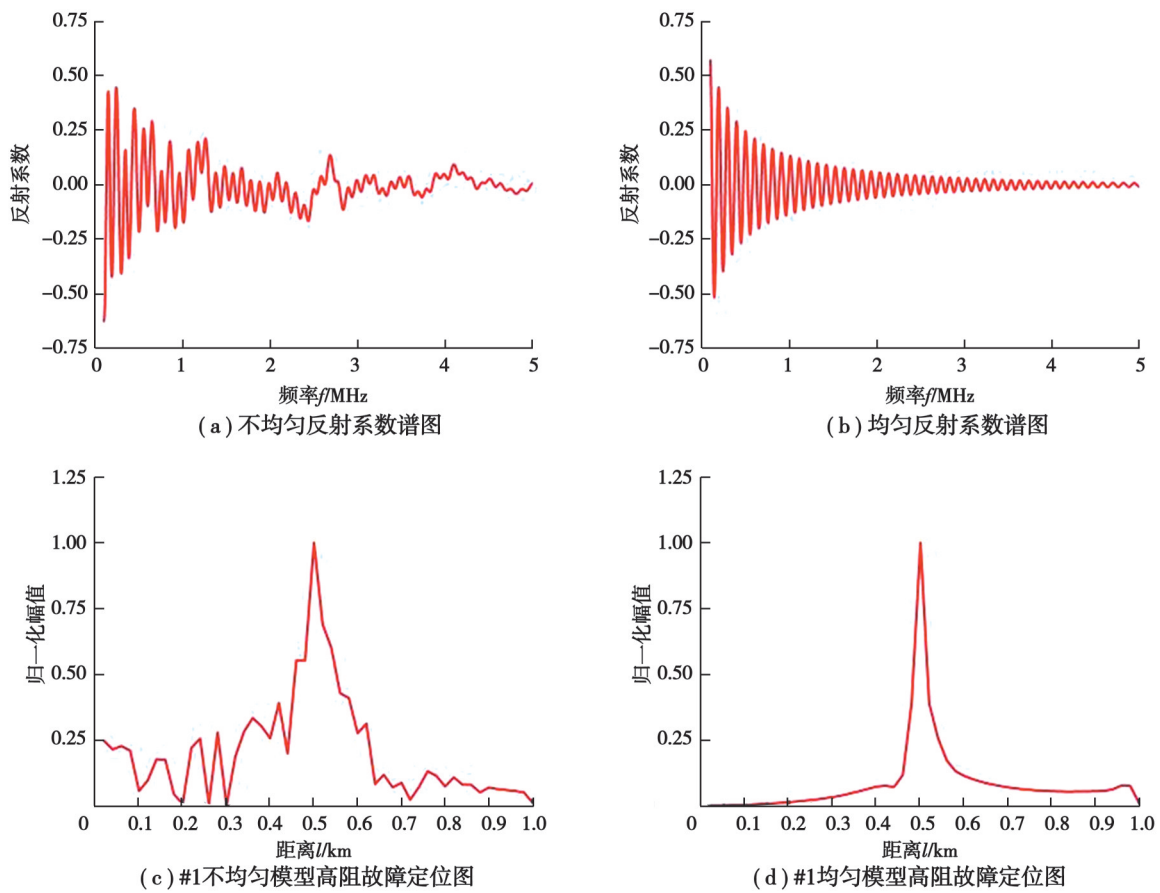


图8 均匀与不均匀模型对照组

Fig. 8 Homogeneous vs. inhomogeneous model control group

改变故障位置进行仿真,如图9所示,2种方法对于故障分别位于200、800 m处的#2、#3电缆的仿真实验均成功定位故障,但明显可以看出功率谱使得故障峰值周边杂波减小,降低了频谱泄露。同时可以看到由于800 m故障离首端过远,电缆本身信号衰减和不均匀,其故障定位出现了20 m的偏移,产生了2%的相对误差,且杂波峰值增大,故障处相对峰值明显减小。200 m故障则更靠近首端,衰减较少,定位没有出现偏差。

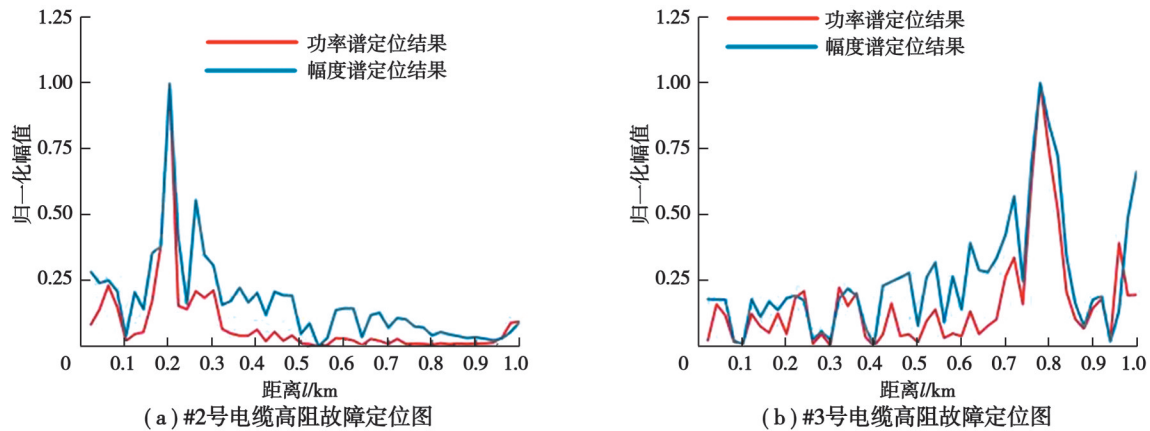


图9 不同故障位置定位图

Fig. 9 Location map of different fault locations

改变接地电阻取值,如图10所示,功率谱法同样降低了频谱泄露。随着故障程度逐渐轻微,故障处的反射峰值相较于其他杂波明显减小,定位点出现偏离,但当接地电阻达到 $1\text{ M}\Omega$ 后仍能定位故障,这表明FDR法对轻微的高阻故障也有较好的定位效果。

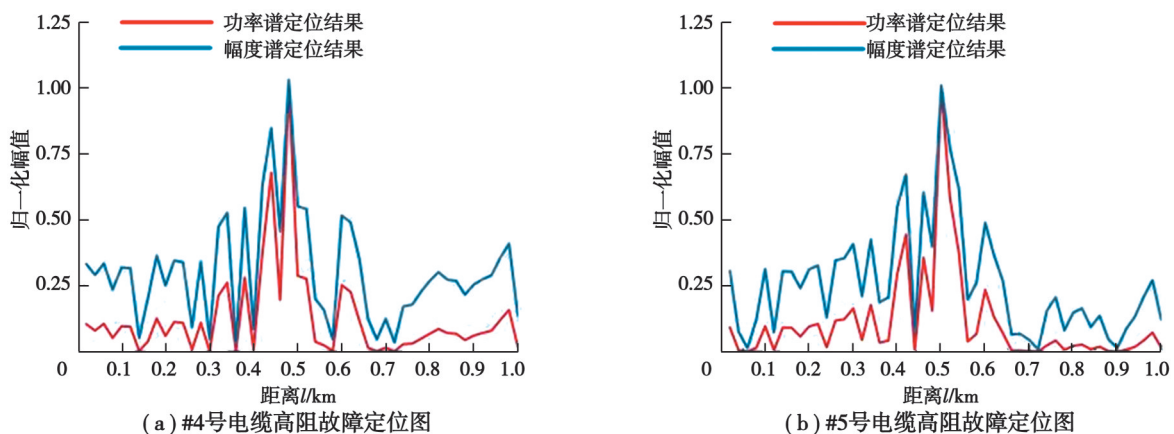


图10 不同故障程度定位图

Fig. 10 Location map of different fault parameters

### 3 硬件系统实现

为了进一步验证FDR法的实际故障定位效果,本节基于FDR法基本原理,设计硬件测量电路。

设计的铁路信号电缆故障检测系统如图11所示。整个系统都由可靠的标准 $12\text{ V}$ 直流电源供电。主要分为单片机、DDS扫频信号输出电路、放大电路、定向耦合器、中频检波电路、ADC,共6个模块。

1)设计系统采用STM32F407VET6单片机作为MCU,通过SPI通讯控制DDS和ADC。

2)DDS采用AD9106,是一个4路、12位输出电压、最高输出频率 $180\text{ MHz}$ 的正弦波发生器,用以产生FDR法所需 $0.1\sim 5\text{ MHz}$ 扫频信号及中频采样所需参考信号。

3)DDS输出扫频信号经放大电路放大后输出,放大电路核心运放采用TI公司的THS3091,THS3091输出电压噪声表现较好,仅为 $2\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。增益为5时,输入信号的带宽仍可达到 $135\text{ MHz}$ 。

4)放大电路输出连接定向耦合器2端口。定向耦合器是一种具有方向性的功率耦合元件,可用于将同一传输线中的入射信号和反射信号分离。将定向耦合器1号端口接电缆,与2号端口直通,发射扫频信号;

3号端口与信号接收电路连接,接收回波信号。

5)回波通过以乘法器为核心构成的中频采样电路进行中频处理,经过低通滤波电路后变为两路直流信号输送给ADC。

6)两路直流信号由24位多通道同步采样ADC进行模数转换。ADC采用TI公司的ADS1299,是一款差分模拟信号24位同步采样ADC,输入范围为 $\pm 5\text{ V}$ 。ADC所采集的数字信号由串口通讯传到上位机进行后续的数字信号处理和图形化显示。

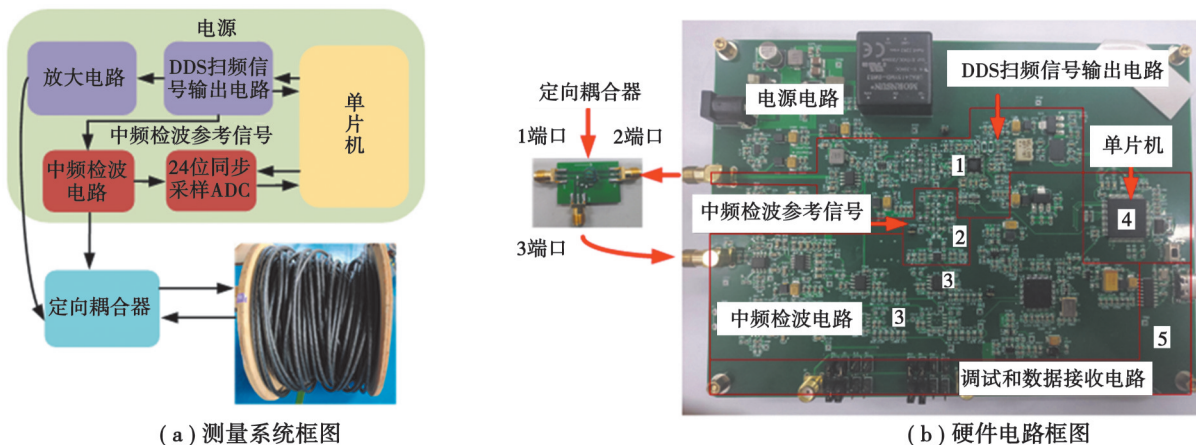


图 11 测量系统

Fig. 11 Measurement system

图 11(b)为硬件测量电路实物图,其中核心设计部分在于接收反射回波的中频检波电路,由于反射信号的频带较高(0.1~5 MHz),若直接对其采样,根据奈奎斯特采样定律,ADC的采样频率至少需要10 MHz。同时为了实现对高阻故障的灵敏测量定位,要求ADC的采样精度尽可能高(不小于16位),现有的ADC无法实现该参数。因此,需要在ADC前端引入乘法器进行中频处理,提取高频反射信号的幅值与相位并转换到低频,方便后续进行高精度采样。

通过图 12 中频检波电路,回波信号通过运放 AD8137 从单端信号转为双端信号,经过两路乘法器后通过低通滤波器输出两路直流信号,由 ADC 进行模数转换。在上位机对采集到的两路直流信号进行平方和相加,然后开根号,可以得到被测信号的幅值。两路直流信号相除后作反正切变换,可以得到被测信号相对于参考信号的相位。从而反推出电缆的回波信号,并得到首端反射系数谱。

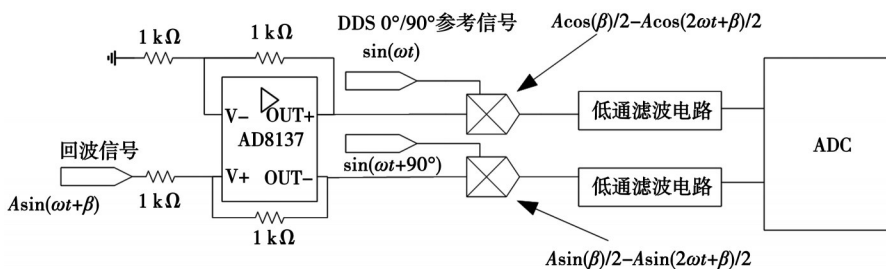


图 12 中频检波电路原理图

Fig. 12 Schematic diagram of intermediate frequency detection circuit



### 4 实验平台搭建及结果分析

#### 4.1 实验平台

为了验证 FDR 方法在铁路信号电缆高阻故障上的实际定位效果,续接 1 000 m 电缆,设置不同位置、不同故障程度的高阻故障,进行实验验证。

本实验制备的电缆样品为 SPTYA23 铠装铁路信号电缆,内含 4 组对绞线及 1 根单芯线,铜芯直径 1.0 mm,特征阻抗为 110 Ω。绝缘层为皮-泡-皮结构,采用氮气物理发泡,材料为高密度聚乙烯塑料。实验室现有电缆总长度为 250 m,通过芯线头尾接续改变电缆总长度,最大可接续长度为 1 000 m。整体实验平台如图 13 所示,主要包括 5 部分:上位机、SIGLENT 的 SPD3303X 型稳压电源、笔者自研的测量设备及后级放大设备、定向耦合器、用于电缆接续的转接板和 SPTYA23 电缆 250 m 实验样品。

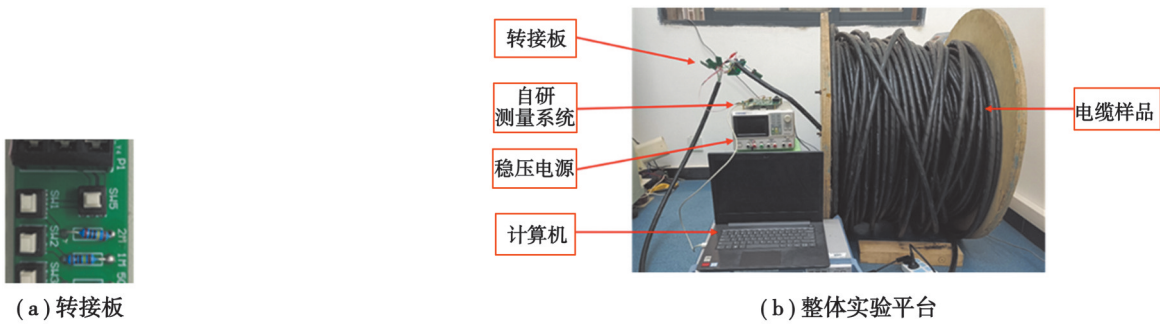


图 13 实验平台

Fig. 13 Experimental platform

实验采用的转接板如图 13(a)所示。开关 1~4 分别用于设置接续处与屏蔽层的跨接电阻,屏蔽层与地相连接,可选用阻值为 0.1、0.5、1、2 MΩ,文中目前采用 0.1 MΩ 和 0.5 MΩ 作为高阻故障,为电缆特征阻抗的 1 000 倍和 5 000 倍,1 MΩ 和 2 MΩ 故障为下一步计划测量故障。实验将 0.1~5 MHz 扫频信号以 5 kHz 步长注入电缆,共 981 个数据点。

#### 4.2 实验结果及分析

##### 4.2.1 高阻故障实验结果

通过硬件测量系统测量电缆的反射系数谱,结合功率谱和傅里叶变换幅度谱 2 种方法进行分析,可以得到 1 000 m 内 0.1、0.5 MΩ 的有效定位结果。

在图 14 中,250 m 处的 0.1 MΩ 和 0.5 MΩ 级别的故障都可以良好识别,故障识别位置均在 260 m 处,出现

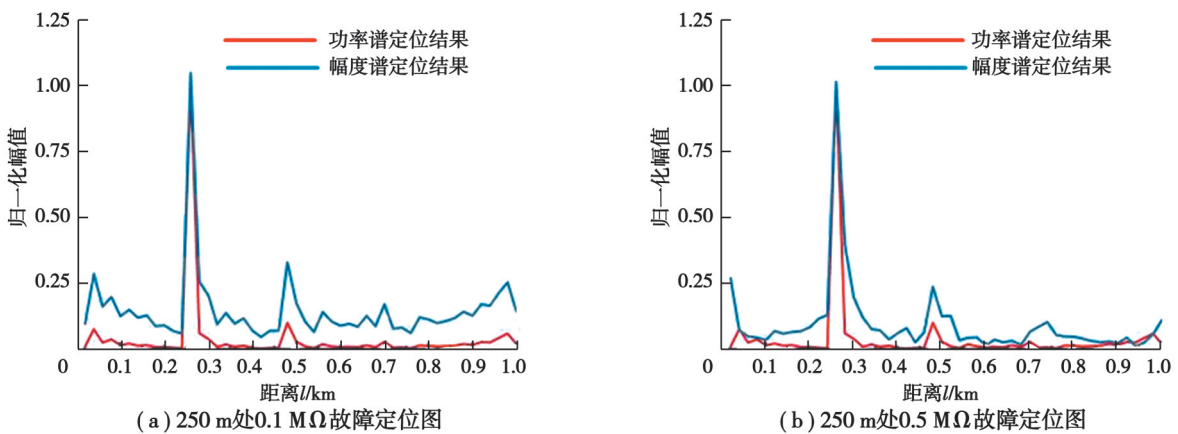


图 14 250 m 处故障定位图

Fig. 14 Fault location map at 250 m

了1%的相对误差,这是由于目前扫频信号的带宽限制了定位的空间分辨率,后续研究可以通过提高带宽解决相关问题。同时,从图中可以看出相较于傅里叶变换得到的幅度谱,功率谱降低了频谱泄露,使得结果更加突出。

在图15中,500 m处的2种高阻故障都可以有效地识别且没有出现故障的偏移,但是在不同转接处仍有高反射,整个空间域非故障点的杂波也进一步增加,这是因为铁路信号电缆本身不均匀性和转接处多次反射导致,随着电缆长度的增加,会进一步影响定位效果。当故障位置在750 m处时,因为上述多次反射导致只能识别出0.1 M $\Omega$ 故障,0.5 M $\Omega$ 故障的定位结果已无法得出。

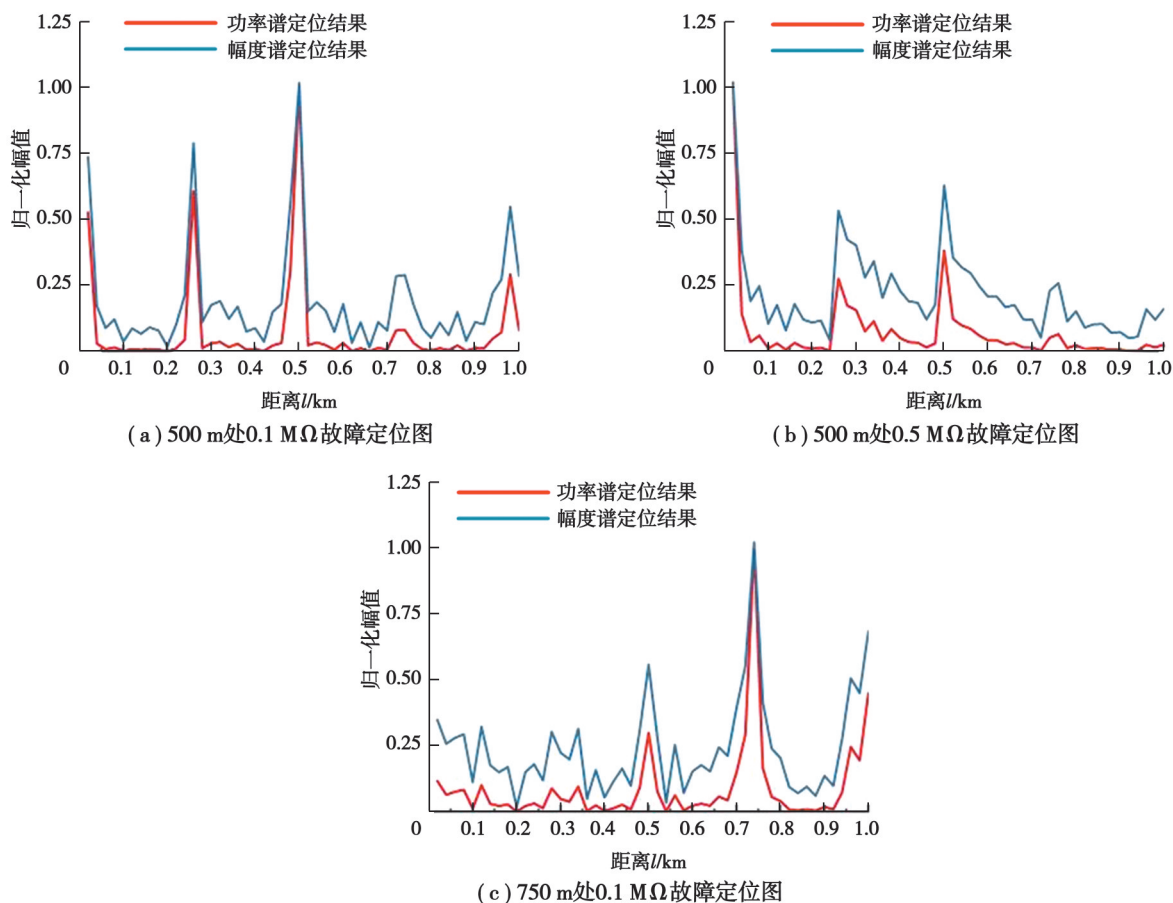


图15 500 m和750 m处故障定位图

Fig. 15 Fault location map at 500 m and 750 m

#### 4.2.2 常见故障实验结果

对于比较常见的断路及低阻和短路故障,在已有实验平台基础上进行了相关验证:1)断路故障,故障处电缆断开,发生全反射,且信号无法传到电缆末端,末端处无反射峰值。图16为在1 000 m电缆的500 m和750 m处发生断路故障时的故障定位图,可以看到在对应故障处有一个极大的反射峰值,为断路故障产生,而在1 000 m处无反射峰值。

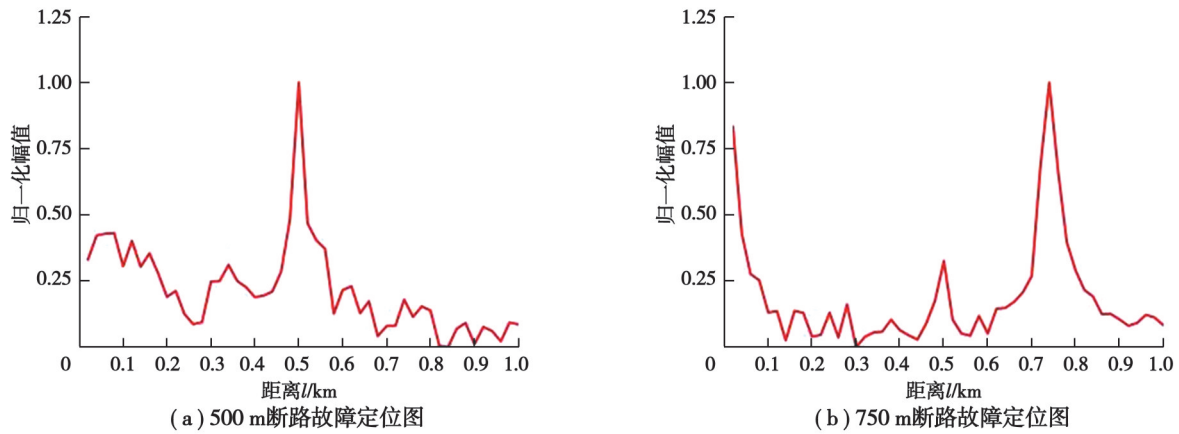


图 16 断路故障定位图

Fig. 16 Location of open circuit fault

2)低阻故障及短路故障:低阻故障通常指的是接地电阻小于  $0.1\text{ M}\Omega$  的故障,相较于高阻故障,低阻故障的故障程度更加严重,更加容易得到定位结果。而短路故障是更为严重的低阻故障,此时接地电阻极小,接近短路,故障处的阻抗不匹配程度更大,会产生更高的故障反射,也更容易得到故障定位。以  $1\ 000\text{ m}$  电缆为例,将原来各个转接处的故障改为  $0.02\text{ M}\Omega$  低阻故障进行试验,如图 17 所示,均能实现有效定位。

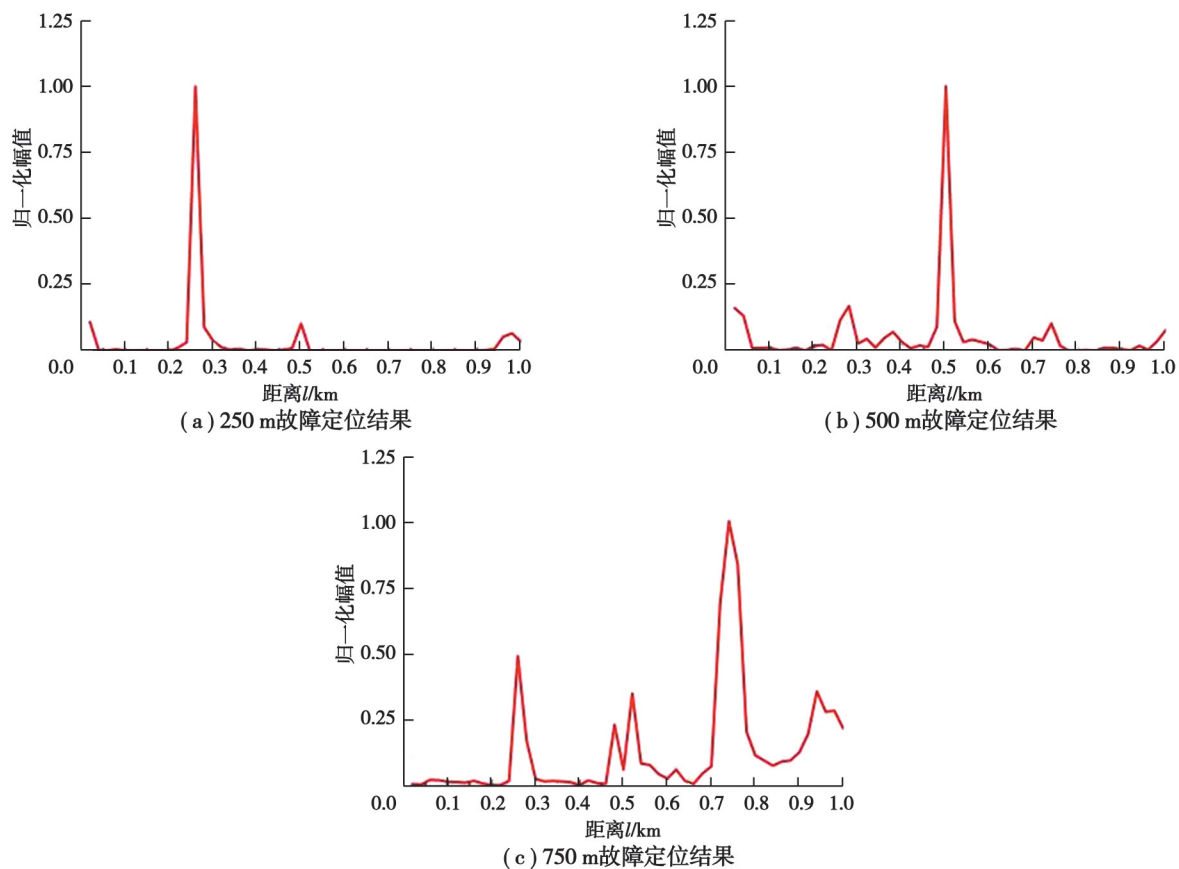


图 17  $0.02\text{ M}\Omega$  低阻故障定位图

Fig. 17  $0.02\text{ M}\Omega$  low resistance fault location

综上所述,FDR法可以实现铁路信号电缆高阻故障和常见断路、短路、低阻故障的有效识别,但随着电缆长度的增加,实际铁路现场的长串接电缆的不均匀性和转接处会对定位产生较大影响,针对此类现象需做进一步研究。

## 5 结束语

针对铁路信号电缆在高阻故障测量方面的空缺,根据电缆特性建立了一套考虑电缆本身不均匀性的频域反射法仿真模型,验证了频域反射法在电缆高阻故障检测方面的可行性。自主设计了一套频域反射检测系统,结合功率谱和傅里叶变换幅度谱在实验室环境下实现了1 000 m长电缆0.1、0.5 M $\Omega$ 的高阻故障定位,为后续进一步推动铁路信号电缆高阻故障检测研究提供了有效参考。

### 参考文献

- [ 1 ] Chen Q, Xiao Q, Yan J. Test and research of digital signal cable for high-speed railway[C]//2022 11th International Conference of Information and Communication Technology (ICTech). February 4-6, 2022, Wuhan, China. IEEE, 2022: 153-157.
- [ 2 ] Yu J J. A domestical safety computer platform for railway signal system[C]//2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). March 12-14, 2021, Chongqing, China. IEEE, 2021: 26-30.
- [ 3 ] Shi X D, Liu Y, Xu X Y, et al. Online detection of aircraft ARINC bus cable fault based on SSTDR[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 2482-2491.
- [ 4 ] Gu X. On-line test and fault location of aviation general-purpose cables based on TDR[C]//2022 3rd International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning & International Conference on Computer Engineering and Applications (CVIDL & ICCEA). May 20-22, 2022, Changchun, China. IEEE, 2022: 1-4.
- [ 5 ] Rao X J, Xu Z L, Guan H F, et al. Cable defect location by using frequency domain reflectometry with synchrosqueezing generalized S-transform[C]//2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE). April 27-30, 2023, Chengdu, China. IEEE, 2023: 1178-1182.
- [ 6 ] Zhang H T, Mu H B, Zou X Y, et al. A novel method for identifying cable defect and improving location accuracy based on frequency domain reflectometry[C]//2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). May 28-30, 2021, Wuhan, China. IEEE, 2021: 1-5.
- [ 7 ] Ohki Y, Hirai N. Experimental verification of good spatial resolution of fault location in a cable by frequency domain reflectometry[C]//2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). October 25-28, 2020. Phuket, Thailand. IEEE, 2020: 126-129.
- [ 8 ] Lu X, Zhang H, Mu H, et al. A cable hybrid type defect localization method based on frequency domain reflectometry[C]//22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2021). November 21-26, 2021, Hybrid Conference, Xi'an, China. London: IET, 2022: 994-998.
- [ 9 ] Lee G S, Kwon G Y, Bang S S, et al. Monitoring electrical and thermal characteristics of HTS cable systems *via* time - frequency domain reflectometry[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 9000605.
- [ 10 ] Kwon G Y, Lee C K, Lee G S, et al. Offline fault localization technique on HVDC submarine cable *via* time - frequency domain reflectometry[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1626-1635.
- [ 11 ] Zhu G Y, Liu Z G, Zhou K, et al. A novel dampness diagnosis method for distribution power cables based on time-frequency domain conversion[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 3510609.
- [ 12 ] Arman A S, Ali M, Glass S W, et al. Full-wave and circuit-based simulations of cable insulation aging/damage using time-frequency domain reflectometry[C]//2021 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). December 12-15, 2021, Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2022: 531-534.
- [ 13 ] Feng B, Zhang L, Hou S, et al. Research on cable defect location method based on joint time-frequency analysis[C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). April 11-15, 2021, Chongqing, China. IEEE, 2021: 1-4.

- [14] Kameyama D, Iokibe K, Toyota Y. Preliminary investigation of impedance discontinuity detection on wire network using sequence time domain reflectometry[C]//2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE. September 23-25, 2020, Rome, Italy. IEEE, 2020: 1-5.
- [15] Ju D F, Chu G B, Liang Y, et al. Fault identification and localization for cables based on time-frequency domain reflection[C]//2023 IEEE International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT). April 28-30, 2023, Jilin, China. IEEE, 2023: 896-900.
- [16] 张巍. 基于频域反射法的电缆故障定位测量系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.  
Zhang W. Cable fault location measurement system design based on frequency domain reflectometry method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [17] Tang Z R, Zhou K, Meng P F, 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: 9005110.
- [18] Tang Z R, Xu Y F, Zhou K, 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: 3510410.
- [19] David M P. 微波工程[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2019.  
David M P. Microwave engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019. (in Chinese)
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 通信电缆试验方法: GB/T 5441—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for communication cable: GB/T 5441—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)