

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802091

时频分析在真空热试验测试电缆故障检测中的应用

董浩 张曦 费泽林 杜春林

(北京卫星环境工程研究所 北京 100094)

摘要: 真空热环境试验是航天器研制过程中必不可缺的实验项目,实验过程中需配置大量测试电缆,因此测试电缆的故障检测具有重要意义。为有效提高对测试电缆故障的定位精度,对小波变换和分数阶傅里叶变换在电缆故障测试中的应用去进行研究。对时域反射测量法和频域反射测量法两种电缆故障检测方法的发射信号进行加噪处理,分别采用相应的时频分析方法对其进行消噪处理。仿真结果表明,小波变换和分数阶傅里叶变换具有良好的去噪效果,对提高测试电缆的故障定位精度具有重要意义。

关键词: 电缆故障;时频分析;小波变换;分数阶傅里叶变换;低信噪比

中图分类号: TN911.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.15

Application of time-frequency analysis in fault location of vacuum thermal test cable

Dong Hao Zhang Xi Fei Zelin Du Chunlin

(Beijing Satellite Environmental Engineering Research Institute, Beijing 100094, China)

Abstract: Vacuum thermal environment test is an indispensable experimental project in the development of spacecraft. A large number of test cables need to be configured during the experiment, so the fault detection of test cables is of great significance. In order to effectively improve the positioning accuracy of test cable faults, this paper studies the application of wavelet transform and fractional Fourier transform in cable fault test. The transmit signals of the TDR and FDR cable fault detection methods are subjected to noise addition processing, and the corresponding time-frequency analysis methods are respectively used for denoising. The simulation results show that the wavelet transform and the fractional Fourier transform have good denoising effect, which is of great significance to improve the fault location accuracy of the test cable.

Keywords: cable failure; time-frequency analysis; wavelet analysis; fractional Fourier transform; low signal to noise ratio

0 引言

真空热环境试验是航天器研制过程中一项必不可缺的试验项目,而空间模拟器是航天器真空热试验的关键设备,试验过程中需要大量的电缆配合测试,如热试验控温用的加热电缆、采集热电偶信号的测量电缆以及用于将容器外测试设备与星上被测设备连接进行测试的低频通用电缆等。这些电缆经过常年使用,很多电缆存在严重磨损的情况,航空插头进行插接时不再紧密,插头虚接虚焊情况频现,电缆线间绝缘、对地绝缘阻值下降,这些问题不仅给热试验准备工作带来了很大困难,有时甚至会造成试验临时停机,后果严重^[1]。

传统的电缆故障检测方法有电桥测量法、时域反射测

量法(time-domain reflectometry, TDR)和频域反射测量法(frequency-domain reflectometry, FDR)等^[2]。电桥检测法针对已知长度的电缆测试非常方便,成本低。但其测量精度和稳定度受人影响较大,技术水平相对较低。TDR方法在电缆一端输入脉冲电压,信号在沿线传输过程中,遇到阻抗不匹配的地方,就会发生反射。记录发射脉冲和反射脉之间的传输时间,即可计算出故障点的距离。FDR是将扫频信号发射到测试电缆中,并将反射信号经快速傅里叶逆变换转换为时域信息。根据电缆的相对传输速度,即可计算出距离。在检测反射信号过程中,TDR直接采用门限判决;FDR采用频率检测,对出现在频带内的信号判定反射信号^[3]。两者的判决原理都比较简单,而电缆检测过程是非常复杂的,在检测过程中存在各种干扰,因此

在强噪声背景条件进行去噪对于准确定位电缆故障位置是至关重要的。

本文主要研究时频分析在真空热试验电缆故障检测中的应用,着重分析小波变换及分数阶傅里叶变换在 TDR、FDR 故障检测方法在低信噪比情况下提取信号的能力^[4-5]。

1 时频分析简介

1.1 小波变换

小波变换(wavelet transform, WT)是一种新的时频变换分析方法,它继承了短时傅里叶变换的思想,并通过采用“时间-频率”随着频率改变的窗口的方式,解决了短时傅里叶变换窗口不随频率变化的缺点。对信号进行平移伸缩等变换,实现对信号的任意细节多尺度细化分析,充分对信号的时间、频率的局部化进行分析。重点突出问题某些方面的特征。目前小波变换的主要研究内容为波的多尺度分析和信号去噪。

信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的小波变换定义为:

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{a,b}^* dt \quad (1)$$

式中: $a \in R^+$ 和 $b \in R$ 分别表示为尺度因子和平移因子; $\psi_{a,b}$ 为小波基函数。

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

对式(2)中变量 b 作傅里叶变换以及傅里叶逆变换,即可得到式(3),为小波变换的频域表达式。

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{a}F(\omega)\psi(a\omega)e^{j\omega b} d\omega \quad (3)$$

式中:如果变量 $a > 1$, 则 $\psi(t/a)$ 表示为 $\psi(t)$ 在时间轴上进行扩展;若 $a < 1$, 则 $\psi(t/a)$ 表示为 $\psi(t)$ 在时间轴上进行压缩,变量 b 影响小波函数在时间轴上的位置,但不影响信号波形^[6]。

1.2 分数阶傅里叶变换

分数阶傅里叶变换(fractional Fourier transform, FRFT)是传统傅里叶的一种变换,可以将其解释为将信号以坐标轴的原点为中心,将信号在时频平面内逆时针旋转角度 α ,具体如图 1 所示。

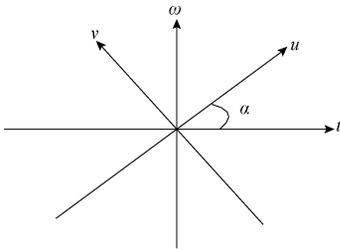


图 1 分数阶傅里叶变换

传统的傅里叶变换的意义在于通过对信号进行逆时针旋转 90° , 从而将信号在时间 t 轴上变换到频率 ω 轴上的表示。那么 FRFT 则可以看作将信号在时间 t 轴上逆时针旋

转角度 α 到 u 轴上的表示。因此,分数阶傅里叶变换的意义在于可以同时信号的时域和频域进行分析。信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的分数阶傅里叶变换定义为:

$$F_a(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)K_a(u, t)dt \quad (4)$$

式中: $K_a(u, t)$ 定义为分数阶傅里叶变换的核函数,具体如式(5)。

$$K_a(u, t) = \begin{cases} A_a e^{(j/2)(u^2+t^2)\cot\alpha - jut\csc\alpha}, & \alpha \neq k\pi \\ \delta(t-u), & \alpha = 2k\pi \\ \delta(t+u), & \alpha = (2k \pm 1)\pi \end{cases} \quad (5)$$

式中: $A_a = \sqrt{(1-j\cot\alpha)/2\pi}$; k 表示为任意整数; u 轴表示分数域;变量 u 表示分数频率; $\alpha = p\pi/2$ 为分数傅里叶变换的旋转角度; p 为傅里叶变换阶数^[7]。

2 小波变换在提高定位精度的作用

2.1 小波去噪原理

小波分析作为一种时频分析新技术,广泛的应用在信号处理中。其中小波两大研究内容分别为小波变换的多尺度分析和信号去噪。本节着重分析小波变换在脉冲反射法的电缆故障检测方法中的应用。一般的时域反射法(TDR)采用将低压脉冲信号发射到待测电缆中,对回波信号进行检测。从而确定故障位置。然而脉冲反射法在测距过程中不可避免的会采集到大量的噪声,噪声大小由测试测试周围环境的电磁噪声大小以及测距装置的抗干扰能力决定。当噪声信号较大时极有可能淹没反射信号的起始点,导致测量误差较大,增加了故障定位的难度。因此采取有效的消噪方法消除噪声,最大程度的保留有用信号,对提高采集信号的信噪比是十分必要的。有利于提高测距精度及判断波形。式(6)所示为一般含噪信号的一维模型。

$$s(i) = f(i) + \sigma \cdot e(i) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

式中: $f(i)$ 表示为原始信号; $e(i)$ 表示为噪声信号; $s(i)$ 表示带有一定噪声的信号。

经验分析,在实际应用中,常见的原始信号即有用信号为平稳或频率较低的信号。相反噪声信号通常处于高频信号。图 2 所示为采用 3 层小波分解对信号去噪过程。

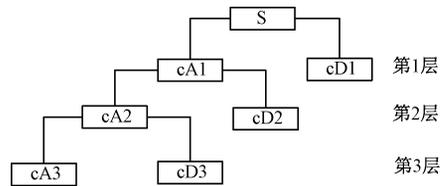


图 2 小波去噪过程

图 2 中对含噪信号 S 进行 3 层分解,其目的在于尽可能多的滤除信号中的高频噪声信号,并还原出原始信号部分。尽可能大的提高原始信比例。其中 $cA1, cA2, cA3$ 为

将信号分解后每1层的低频原始信号, cD1、cD2、cD3 表示为信号分解后每层高频噪声信号^[8]。

2.2 小波去噪过程

1) 首先需要对小波基函数进行选择, 确定小波分解层数后利用小波基函数并对信号进行小波分解。目前常用的小波基函数有3种, 分别为 dbN 小波、symN 小波和 coifN 小波。图3所示为分解层数与信噪比的关系。由图3可知, 分解层数在3~5范围内, 信号的输出信噪比较大。

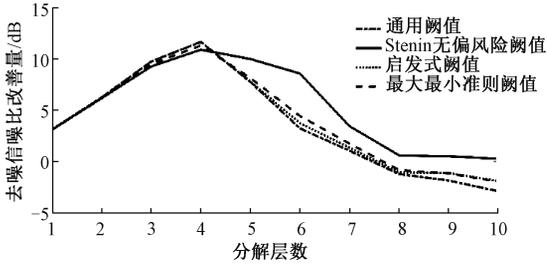


图3 分解层数与信噪比的关系

2) 阈值的确定。阈值的确定极大的影响小波变换去噪的性能。如果所选取的阈值比较小, 则经过处理后的小波系数中会包含较多的噪声; 如果选取的阈值过大, 则会造成原始信号的丢失。目前小波变换去噪过程中有4种阈值选择方法: (1) 通用阈值 T_1 , 根据原理为独立同分布的 N 各标准高斯变量中的最大值; (2) Stein 无偏似然估计阈值 T_2 ; (3) 启发式 SURE 阈值, 该方法综合了上面两种阈值选取规则; (4) 最大最小准则阈值 T_4 。图4所示为4种阈值选择方法的对比。

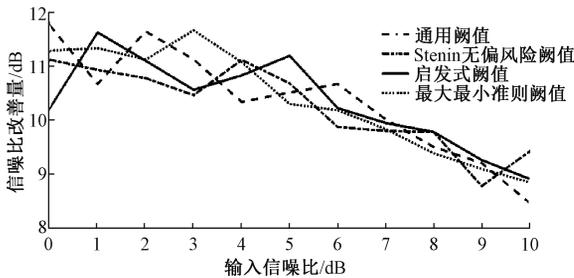


图4 4种阈值选择方法的对比

3) 选择合适的阈值函数对小波系数进行处理。目前常用阈值函数有硬阈值函数和软阈值函数两种方法, 硬阈值函数的表达式为:

$$\tilde{d}_{j,k} = \begin{cases} d_{j,k}, & |d_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |d_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (7)$$

软阈值函数的表达式为:

$$\tilde{d}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(d_{j,k}) (|d_{j,k}| - \lambda), & |d_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |d_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (8)$$

式中: $d_{j,k}$ 表示为小波分解系数; $\tilde{d}_{j,k}$ 表示小波系数的估计值; $\text{sgn}(\cdot)$ 表示为符号函数; λ 为小波变换的阈值。通常采

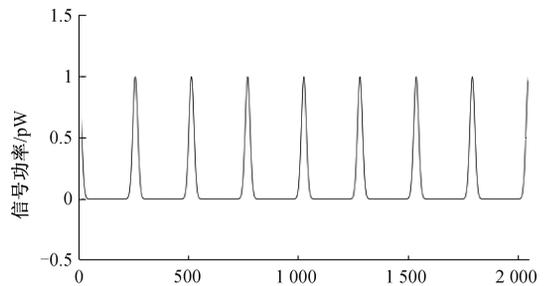
用硬阈值函数时, 小波系数的估计值会有在 $\pm\lambda$ 处不连续, 其余小波系数无偏差的问题; 软阈值函数虽然为连续函数, 但其估计出的小波系数有固定误差的存在, 影响小波变换的去噪性能^[9]。本文对软阈值函数进行改进, 式(9)为改进后的阈值函数。

$$d_{j,k} = \begin{cases} a\lambda^2 - \lambda + d_{j,k}, & d_{j,k} \geq \lambda \\ ad_{j,k}^2, & 0 < d_{j,k} < \lambda \\ -a\lambda^2 + \lambda + d_{j,k}, & d_{j,k} \leq -\lambda \\ -ad_{j,k}^2, & -\lambda < d_{j,k} < 0 \end{cases}, a < \frac{1}{\lambda} \quad (9)$$

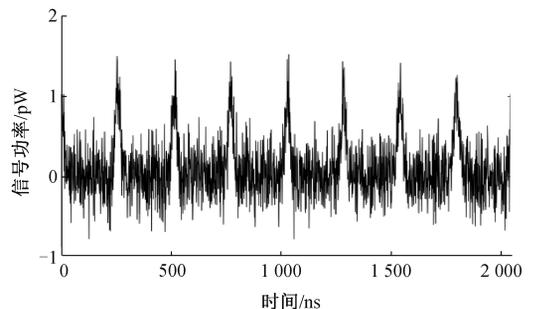
4) 小波重构。对经过分解后的每层原始信号进行重构, 还原出原始信号。

2.3 小波去噪仿真实例

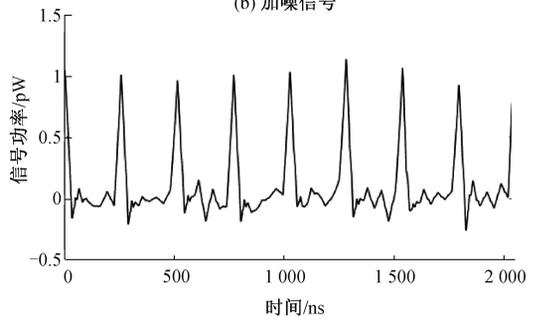
为验证小波去噪法在脉冲反射法电缆故障检测中的应用, 本节 TDR 发射的脉冲信号加噪信号进行仿真, 选择 dbN 小波基函数, 小波分解层数为5。采用通用阈值确定方法以及改进的软阈值函数完成滤波过程, 仿真过程如图5所示。



(a) 原始信号



(b) 加噪信号



(c) 改进软阈值函数去噪效果

图5 小波去噪仿真结果

图 5(a)为发射的连续脉冲信号,图 5(b)为加入噪声后的脉冲信号。图 5(c)为小波去噪后的信号。对比图 5(a)和图 5(c)可知,小波变换能够很好的对信号进行去噪,故而可以在电缆故障检测中有效地提高故障的定位精度。

3 分数阶傅里叶变换在提高定位精度的作用

传统的傅里叶变换仅适用于对平稳信号进行一系列的分析,不适合对非平稳、时变的信号进行处理。分数阶傅里叶变换可以解释为将信号在正交的 Chirp 基函数上展开,在特定阶次分数阶傅里叶变换可表现为一个冲击函数,通常将此称为聚焦性。此特性使分数阶傅里叶变换十分适合对调频信号的处理。频域反射法(FDR)采用的是向待测电缆发射一段扫频信号,通过对反射信号的处理来判断故障的位置。电缆检测过程是非常复杂的,在检测过程中存在各种干扰,因此需要利用有效的噪声滤除技术对反射信号进行去噪,以此来提高故障定位精度。在采用 FDR 方法在电缆故障检测应用中,有用信号的提取好与噪声的抑制是十分重要的^[10]。传统滤波方法仅局限于在频域进行加窗处理,一旦遇到号与噪声具有较强的时频耦合的情况,传统的方法无法实现滤除噪声。这种情况下,采用分数阶傅里叶变换利用将信号的坐标一定的角度,在变换后去除信号、噪声之间的耦合,即可达到滤波噪声的目的。线性调频(linear frequency modulation, LFM)作为扫频信号的一种,常用于 FDR 的发射信号。本节对 LFM 信号分数阶傅里叶变换去噪过程进行仿真。

3.1 单分量 LFM

式(10)所示为单分量 LFM 的表达形式。

$$f(t) = A \exp[j(2\pi f_0 t + \pi \mu t^2)] \quad (10)$$

式中: $0 \leq t \leq T$; A 表示为 LFM 信号的幅度; f_0 表示为初始频率; μ 表示为调频率。根据式(10)对 LFM 信号进行仿真。利用 MATLAB 时频分析工具箱中 flmin 函数生成 LFM 信号^[11]。图 6 所示为单线性调频信号波形,图 7 所示为线性调频信号频谱,图 8 所示为单线性调频信号时频分布。

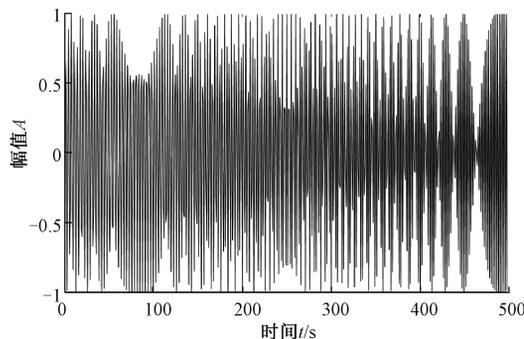


图 6 LFM 信号时域波形

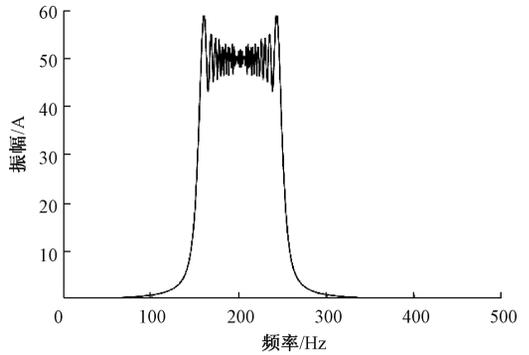


图 7 LFM 信号频域波形

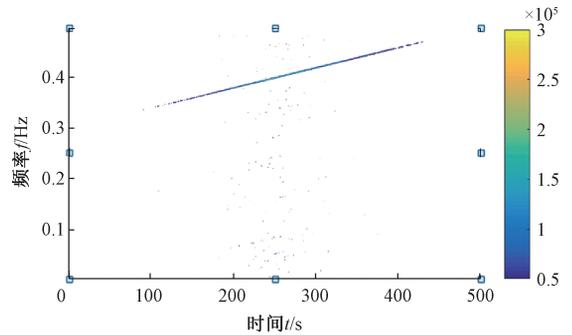


图 8 LFM 时频分布图

从图中可以看出信号频率随时间呈线性变化,与理论分析一致。

3.2 FRFT 去噪过程

1)首先对带有噪声的原始进行逆时针旋转 α 角度,将 t 轴变换到 u 轴上。

$$X_\alpha(u) = F_\alpha(u) + N_\alpha(u) \quad (11)$$

式中: $F_\alpha(u)$ 表示为 LFM 信号的分数阶傅里叶变换,通过将其旋转一定角度后,其信号的频谱会聚集在平面 u 轴一个窄带内; $N_\alpha(u)$ 表示为噪声信号的分数阶傅里叶变换,与有用信号相比,无论旋转多少角度,噪声信号均不会聚集 u 域内^[12],如图 9 和 10 所示。

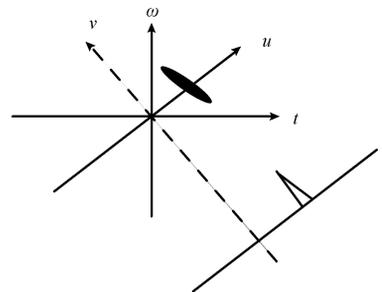


图 9 LFM 信号在分数阶 Fourier 上的投影

2)在旋转后的平面内旋转合适带宽的窗函数对噪声信号进行滤除^[13]。

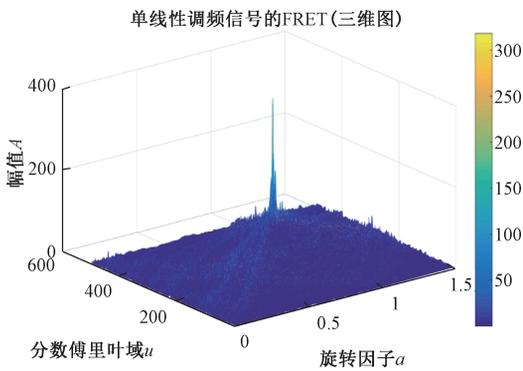


图10 FRFT良好的频谱聚焦性

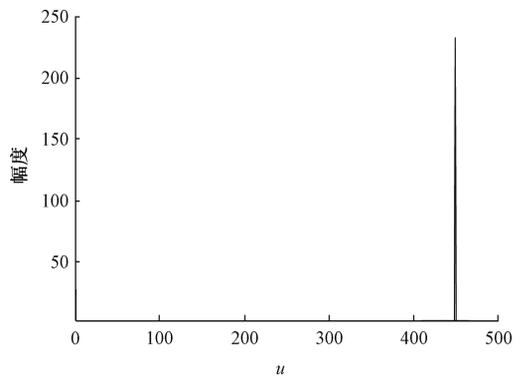


图13 滤波后频谱图

3) 滤除噪声信号后对其进行逆分数阶傅里叶变换即可还原出原始信号^[14]。

3.3 分数阶傅里叶去噪仿真实例

对 LFM 进行加噪处理, 噪声背景下的信号时域波形如图 11 所示。

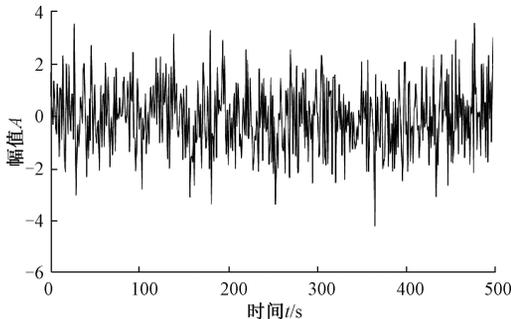


图11 含噪 LFM 信号时域波形

图 12 和 13 所示分别为带噪声的单线性调频信号经过分数阶傅里叶变换滤波前、后的对比图, 原始 LFM 信号由于其聚焦特性在 u 域内产生了聚焦性, 相反噪声经过分数阶傅里叶变换后分布在 u 轴上^[15]。采用合适的窗函数即可实现对噪声信号的滤除。

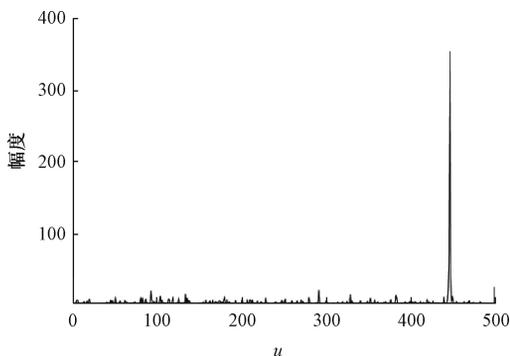


图12 最佳阶次处信号频谱图

对滤除后的信号进行逆傅里叶变换即可还原出原始信号。如图 14 所示。

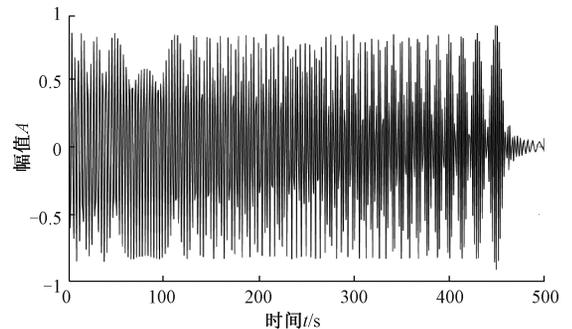


图14 滤波后还原的信号时域图

对比图 6 和 14 可知, FRFT 对 LFM 具有良好的去噪效果, 恢复信号疏密程度与已经能够很好的与原始信号相吻合。

4 结 论

本文对小波变换和分数阶傅里叶变换在电缆故障定位中的应用进行了研究, 探讨了小波变换以及分数阶傅里叶变换的去噪性能。以 TDR 和 FDR 电缆故障测试方法中的发射信号为仿真原始信号, 分别对加噪后的信号进行去噪仿真。仿真结果表明, 对于 TDR 发射信号, 采用改进的软阈值函数小波变换去噪能够很好的完成滤波处理; 对于 FDR 发射信号, 分数阶傅里叶以其对线性调频信号频谱的聚焦性, 能够将低信噪比的发射信号恢复出来。对后续的故障定位以及对故障分类来说具有重要意义。

参考文献

- [1] 柏思忠. 基于 SOPC 和 TFDR 的电缆故障检测仪设计和实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [2] 王宏禹. 非平稳信号分析和处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [3] 张晔. 信号时频分析及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社[等], 2006.
- [4] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安: 西安电子科

- 技大学出版社,1992.
- [5] 吴伟,蔡培升.基于 MATLAB 的小波去噪仿真[J].信息与电子工程,2008(3):220-222,229.
- [6] 熊小伏,林金洪.基于小波重构的电力电缆故障测距方法[J].电网技术,2003(6):36-38,70.
- [7] GALLI A W, NIELSEN O M. Wavelet analysis for power system transients [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1999,12(1):16-25.
- [8] BAHOURA M, ROUAT J. Wavelet speech enhancement based on the teagerenergy operator [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001,8(1):10-12.
- [9] 齐林,陶然,周思永,等.基于分数阶傅里叶变换的线性调频信号的自适应时频滤波[J].兵工学报,2003(4):499-503.
- [10] 黄文玲,杨鹏.基于扫频滤波器线性调频信号的滤波算法[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(11):1656-1658,1674.
- [11] ALMEIDA L B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 42(11):3084-3091.
- [12] KUTAY A, OZAKTAS H M, ANKAN O, et al. Optimal filtering in fractional Fourier domains [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002,45(5):1129-1143.
- [13] 包永强,赵力,邹采荣.分数傅里叶变换域上含噪语音的联合滤波[J].信号处理,2006,22(6):899-902.
- [14] 李靖,王树勋,汪飞.基于分数阶傅里叶变换的 chirp 信号时频分析[J].系统工程与电子技术,2005(6):988-990,1015.
- [15] ERDEN M F, KUTAY M A, OZAKAS H M. et al. Repeated filtering in consecutive fractional Fourier domains and its application to signal restoration [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(5):1458-1462.

作者简介

董浩,硕士、助理工程师,主要研究方向为真空热试验测控技术。

E-mail:920567145@qq.com