

软阈值消噪法在电缆故障测距中的应用

张炳达¹ 瞿敏¹ 陈伟乐²

¹(天津大学电气与自动化工程学院 天津 300072) ²(香港理工大学电机工程系 香港)

摘要 依据不同信号的小波变换系数模极大值的传播特性,针对电缆故障测距中信号样本的特点,提出了一种改进的软阈值消噪法。实验结果表明,该方法能有效地恢复脉冲行波的原貌,为电缆故障精确定位创造了条件。

关键词 电缆故障 行波测距 小波变换 软阈值消噪法

The Application of Soft-threshold De-noising in Cable Fault Location

Zhang Bingda¹ Qu Min¹ Chen Weile²

¹(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

²(Dept. of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University Hong Kong)

Abstract Based on the propagation property of module maximum of wavelet transform coefficients under different signals and the characteristics of signal sample in cable fault location, an improved means of soft-threshold de-noising is put forward. The test results indicate that the means can restore the pulse traveling wave signal efficiently, thus provide the advantage for accurate cable location.

Key words Cable fault Traveling wave location Wavelet transform Soft-threshold de-noising

1 引言

目前已有多种实用的电缆故障测距方法,其中脉冲法应用最广泛。脉冲法主要包括低压脉冲法、脉冲电压法、脉冲电流法和二次脉冲法^[1]。它们的检测原理基本相同,都是通过入射行波与反射行波间的时差和行波在电缆中的传播速度确定故障距离。为实现故障点的精确定位,必须对反射行波信号高速采样。由于采样频率较高,在采集到的信号样本中混有大量噪声,甚至出现反射行波的起始点被噪声所淹没的现象。由于脉冲行波频段和噪声频段相互重叠,不宜采用只保留已知信号频段或完全抛弃已知噪声频段的简单信噪分离方法。本文依据不同信号的小波变换系数模极大值的传播特性,针对电缆故障测距中信号样本的特点,提出了一种改进的软阈值消噪法。

2 小波变换系数模极大值的传播特性

多分辨率分析是在有限尺度上作小波分解,把信

号分解为不同频段上的子信号。Mallat 提出的塔式多分辨率分解与重构算法不涉及尺度函数 $\varphi(x)$ 和小波函数 $\Psi(x)$ 的具体形式,便于对离散数据的处理。其分解算法和重构算法如下:

$$\begin{cases} c_j(n) := \sum_{k=Z} h(k-2n)c_{j-1}(k) \\ d_j(n) := \sum_{k=Z} g(k-2n)c_{j-1}(k) \end{cases} \quad (1)$$

$$c_{j-1}(n) = \sum_{k=Z} h^*(n-2k)c_j(k) + \sum_{k=Z} g^*(n-2k)d_j(k) \quad (2)$$

$c_j(n)$ 和 $d_j(n)$ 分别是信号在尺度 j 上的尺度变换系数和小波变换系数。 $h(n)$ 、 $g(n)$ 、 $h^*(n)$ 、 $g^*(n)$ 分别为低通分解滤波器、高通分解滤波器、低通重构滤波器、高通重构滤波器。首先取离散信号序列 $f(n)$ 为 $c_0(n)$, 进行 J 次分解, 所得 $d_1, d_2, \dots, d_j, c_j$ 分别表示信号从高频到低频的不同频段的信息。

对于信号 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 如果在 t_0 附近满足 $|f(t) - f(t_0)| \leq k|t - t_0|^\alpha$ (k 为正常数), 则称 α 是 $f(t)$ 在 t_0 处的李氏指数, 它是表示信号奇异性的一个数字特征。如果信号变化越平滑, 李氏指数 α 就越大。如果信号的

李氏指数 $\alpha > 0$, 则该信号的小波变换系数模极大值随着尺度的增大而增大; 如果 $\alpha < 0$, 则该信号的小波变换系数模极大值随着尺度的增大而减小。

3 软阈值消噪

理论上已经证明: 白噪声的李氏指数 $\alpha < 0$, 它的小波变换系数模极大值随着尺度的增大而减小, 而阶跃信号的李氏指数 $\alpha = 0$, 它的小波变换系数模极大值不变。反射波的上升沿或下降沿部分与阶跃信号的跳跃部分基本相同, 且受电缆电导的影响, 其陡度有所降低, 李氏指数 $\alpha > 0$, 小波变换系数模极大值随着尺度的增大而增大。

由于采用 100MHz 的采样频率采集信号, 样本信号在第一尺度上的高频分量绝大部分是噪声。因此, 强制把保留信号的第一尺度上的小波变换系数估计值置零, 即 $\hat{d}_1(n) = 0$ 。

假定噪声幅值的分布符合正态分布, 选用式(3)估计噪声在第一尺度上的小波变换系数模极大值 λ_1 (若保证噪声幅值绝对值大于 λ_1 的概率小于 0.1%, k 取 3.3)。由于噪声的小波变换系数随着尺度的增大而缓慢变小, 用经验公式(式(4))估计噪声在尺度 $j \geq 2$ 上的小波变换系数模极大值 λ_j 。然后用式(5)计算保留信号的小波变换系数估计值 $\hat{d}_j(n)$, 然后根据 $\hat{d}_j(n)$ 重构保留信号。

$$\lambda_1 = k \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_1^2(n)} \quad (3)$$

$$\lambda_j = \frac{\lambda_1}{\ln(1+j)} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \hat{d}_j(n) = \text{sign}(d_j(n)) (|d_j(n)| - \lambda_j) & |d_j(n)| \geq \lambda_j \\ \hat{d}_j(n) = 0 & |d_j(n)| < \lambda_j \end{cases} \quad (5)$$

这种方法是在原有软阈值消噪法^[2]基础上作了改进, 使其适用于对电缆故障测距信号样本的消噪, 保证了消噪后反射波起始点有较高奇异性。

4 模拟实验

用 50m 和 100m 屏蔽电缆进行末端短路故障模拟, 采样频率 100MHz。图 1、图 2 是在电缆首端用电流法实测到的入射波和反射波。由于噪声的存在, 脉冲行波的起始点模糊不清。用正则性适中的 db5 小波对信号样本进行塔式多分辨率分解(分解到第 7 尺度), 然后用改进的软阈值消噪法去噪。图 3、图 4 分别是图 1、图 2 消噪后的保留信号, 其脉冲行波的上升沿和下降沿比较明显。

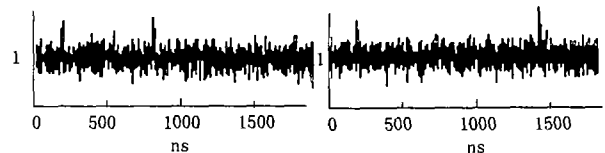


图 1 50m 时的信号样本 图 2 100m 时的信号样本

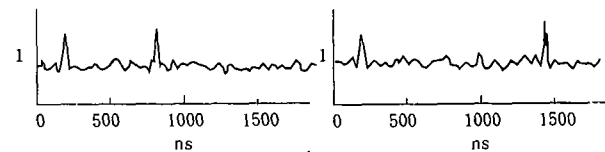


图 3 50m 时的保留信号 图 4 100m 时的保留信号

模拟实验表明: 在 100MHz 采样频率下, 采用改进的软阈值消噪法能有效地消去信号样本中的噪声, 使电缆故障点的定位误差小于 2m。

参考文献

- 熊元新, 刘兵. 基于行波的电力电缆故障测距方法. 高压技术, 2002, 28(1): 8~10.
- 胡昌华, 等. 基于 Matlab 的系统分析与设计. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.