

# 基于小波变换的 OTDR 降噪算法研究

彭怀敏, 张超, 倪演海, 姚飞

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 传统的滤波方法在降低光时域反射仪(OTDR)曲线噪声的同时, 会展览其盲区, 不利于 OTDR 性能指标的提升。研究了 OTDR 测试曲线的滤波降噪问题, 使用基于小波变换的滤波算法对 OTDR 设备的测试曲线进行处理, 可以显著提高信噪比。针对 OTDR 的特性, 以及硬阈值和软阈值法的不足, 引入特殊的阈值处理算法, 可以更好地保持反射事件的边缘, 对目前商用化 OTDR 产品性能的进一步提升具有重要意义。

**关键词:** 光时域反射仪; 小波变换; 降噪

中图分类号: TN914 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)07-0017-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.07.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on OTDR denoise algorithm based on wavelet transform

PENG Huaimin, ZHANG Chao, NI Yanhai, YAO Fei

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

**Abstract:** While reducing the noise of optical time domain reflectometer (OTDR) curve, the traditional filtering method will widen its dead zone, and it threatens the improvement of OTDR performance. This paper figures out the question of denoise for OTDR test curve by filtering. Processing the OTDR test curve using the filtering method based on wavelet transform, which can significantly improve the signal to noise ratio of the equipment. According to the characteristics of OTDR, and the weakness of hard threshold and soft threshold methods, the paper introduces a special threshold processing algorithm, which will maintain the edge of reflection events, and is of great significance to further improve the performance of commercial OTDR products.

**Key words:** OTDR; wavelet transform; denoise

### 0 引言

随着光纤通信技术的不断发展, 光纤网络的铺设量越来越大, 对光纤链路质量的要求越来越高。光时域反射仪(OTDR)只需要单端测试, 不损伤光纤线路, 是光缆资源监测与维护的重要设备。其原理是光脉冲在光纤中传输时, 会有后向瑞利散射, 遇到端面时会产生菲涅尔反射, 用以实现光纤衰减、弯曲和断裂等故障的检测与定位。OTDR 的动态范围和事件盲区是

2 个最重要的性能指标, 也是技术研究的重点与难点。提高动态范围的方法主要是增大激光器的发射功率, 提高接收机的灵敏度。然而, 硬件性能的提升是有限的, 所以在软件方面对数据进行降噪处理是重要手段。

传统的降噪方法是使用线性滤波器进行滤波, 其优点是算法简单, 计算速度快。缺点是盲区和降噪效果不可兼得: 若滤波器长度较短, 则降噪效果不明显, 动态提升有限; 若滤波器长度较长, 则盲区展览严重。本文采用小波变换的降噪方法, 并采用阈值法作为数据处理的方式, 对 OTDR 曲线进行滤波。但是, 普通的硬阈值法和软阈值法却会改变 OTDR 曲线的形态, 使得曲线劣化, 所以本文针对 OTDR 的特点提出特定的阈值函数。

收稿日期: 2019-05-21。

**作者简介:** 彭怀敏(1985-), 男, 工程师, 就职于桂林聚联科技有限公司, 主要研究方向为光检测、光传感等领域的应用技术。主要从事 OTDR 的控制和数据处理算法研究, 及 OTDR 技术的应用, 完成了手持式 OTDR 仪表、嵌入式 OTDR 模块和光缆监测模块等设备的研发。



## 1 算法原理

### 1.1 小波变换

设  $x(t)$  是平方可积函数,则它以  $\psi(t)$  为母小波函数的连续小波变换为<sup>[1]</sup>:

$$WT_x(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int x(t) \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt = \langle x(t), \psi_{s\tau}(t) \rangle \quad (1)$$

其中,  $s$  是尺度参数;  $\tau$  是时移参数;  $\psi_{s\tau}(t)$  是依赖于这 2 个参数的小波基函数,由母小波函数伸缩和平移得到。系数  $1/\sqrt{s}$  是为了使不同尺度的小波均具有相同的归一化的能量。母小波函数是一种特别的函数,它必须满足相容性条件才能保证小波反变换的存在。相容性条件为:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (2)$$

其中,  $\psi(\omega)$  是母小波函数  $\psi(t)$  的傅里叶变换。同时,它在时空域上有有限的支撑集,均值正好为零,具有带通性质;其绝对值和平方的值是可积分的,是一个可测量的函数。由于尺度的变化相当于在时空域的压缩或扩张;若在时空域进行压缩,相当于在频率域的扩张;时空域的扩张则相当于频率域的压缩。所以,经过压缩后的小尺度小波函数具有较高和较宽的频率范围,可以反映信号的高频细节信息;经过扩张后的大尺度小波函数具有较低和较窄的频率范围,可以反映信号的低频轮廓信息,并具有较高的频率分辨率。同时,位移参数使得小波变换具有类似短时傅里叶变换的时移特性,可以正确反映非平稳信号,所以小波变换被称为“数学显微镜”。

连续小波变换具有尺度和时移 2 个参数,在信号分析时冗余度很高,运算量很大,所以在具体的应用中有很大的局限性。为了能使用计算机进行小波变换,必须将母小波函数离散化。实际中使用 Daubechies 提出的离散小波表达式为:

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0}} \psi \left( \frac{t-k\tau_0 s_0^j}{s_0} \right) \quad (3)$$

其中,  $j$  和  $k$  是整数,  $s_0 > 1$  是扩张步长。如果  $s_0 = 2$  并且  $\tau_0 = 1$ ,此时离散小波被称为二进小波。当尺度增大一倍时,根据采样定理,所需要的采样点就可以减少一半,所以这种离散采样的形式是十分经济的。

### 1.2 Mallat 算法

根据小波的多分辨率分析及滤波器组的思想,二进小波的分解和重构存在一个快速算法——Mallat 算

法,这种方法实际上是一种信号的分解方法,在数字信号处理中称为双通道子带编码。小波分解的 Mallat 算法如图 1 所示,LPF 是通带为  $0 \sim \pi/2$  的低通滤波器,HPF 是通带为  $\pi/2 \sim \pi$  的高通滤波器,它们对应于具体的小波母函数,称为小波分解滤波器。原信号  $S$  通过 LPF,得到的信号是输入信号的近似信号(approximations),此时其带宽为输入信号的一半。根据 Nyquist 采样定律,可以减少一半的采样率而不丢失信息,所以进行了 2 抽取( $\downarrow 2$ ),得到长度为输入信号一半的近似信号  $A1$ 。原信号通过 HPF 的情况与之类似,得到的输出信号是输入信号的细节(detail),进行了 2 抽取后得到长度为输入信号一半的细节信号  $D1$ ,这样就完成了一层分解。继续对近似信号  $A1$  进行相同的处理,得到第二层分解的近似信号  $A2$  和细节信号  $D2$ ,依次类推可以得到多层分解的近似信号和细节信号<sup>[2]</sup>。

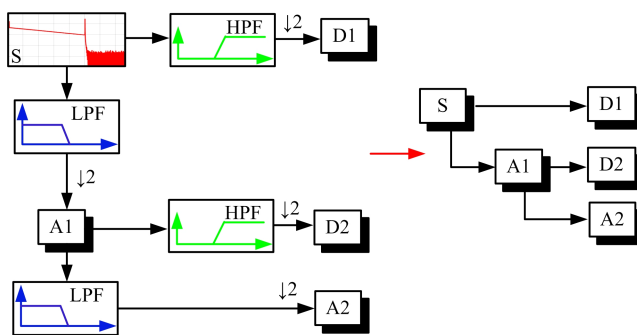


图 1 小波分解的 Mallat 算法

上述分解算法的滤波公式为:

$$A1(n) = \sum_{k=0}^{N-1} S(n)g(2n-k) \quad (4)$$

$$D1(n) = \sum_{k=0}^{N-1} S(n)h(2n-k) \quad (5)$$

其中,  $S(n)$  是输入信号,  $g(n)$  是 LPF,  $h(n)$  是 HPF, 可以在 Matlab 中根据选定的小波函数名而得到。将式(4)  $h(n)$  和式(5)中的  $S(n)$  换成  $A1(n)$ , 即可得到  $A2(n)$  和  $D2(n)$ , 以此类推。

小波重构的过程与分解的过程正好相反,如图 2 所示。先对近似信号和细节信号进行 2 插值升采样( $\uparrow 2$ ),再分别通过 LPF 和 HPF,相加之后即可还原出原信号。这里使用的滤波器称为小波重构滤波器,也可以在 Matlab 中根据选定的小波函数名而得到。

### 1.3 小波降噪原理

将信号进行一定层数的小波分解,得到一系列的

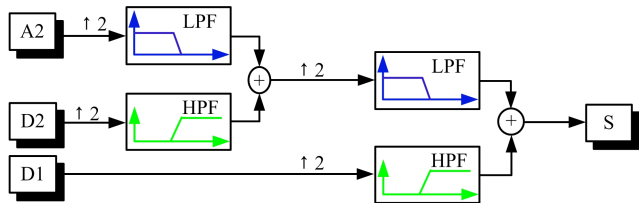


图2 小波重构方法

近似信号和细节信号。其中,近似信号保持了原始信号的轮廓,细节信号则主要是噪声,以及信号的突变。使用一定的方法处理细节信号,抑制其噪声,然后将新的细节信号与近似信号作小波逆变换,重构出来的信号与原信号相比,噪声得到了抑制。常用的处理细节信号的方法主要有2种,模极大值法和阈值法<sup>[3,4]</sup>。鉴于模极大值法的复杂性,本文研究阈值法。

处理细节信号的阈值法有硬阈值法和软阈值法,硬阈值法是保留超过阈值的信号,同时将小于阈值的信号强制成0;软阈值法是保留超过阈值的信号,但是向0靠拢,同时将小于阈值的信号强制成0。硬阈值和软阈值法的函数形式分别如式(6)和式(7)所示:

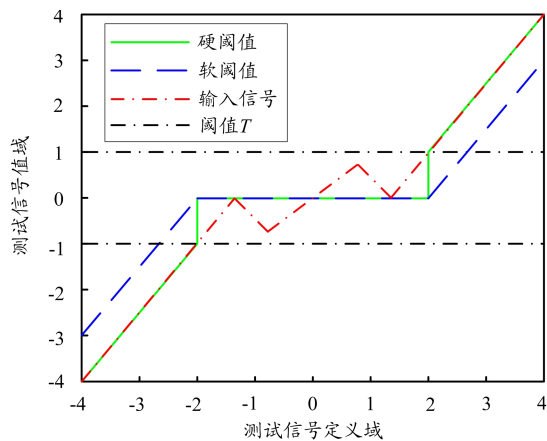
$$\text{hard}(Y, T) = \begin{cases} Y, & |Y| \geq T \\ 0, & |Y| < T \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{soft}(Y, T) = \begin{cases} \text{sign}(Y)(|Y| - T), & |Y| \geq T \\ 0, & |Y| < T \end{cases} \quad (7)$$

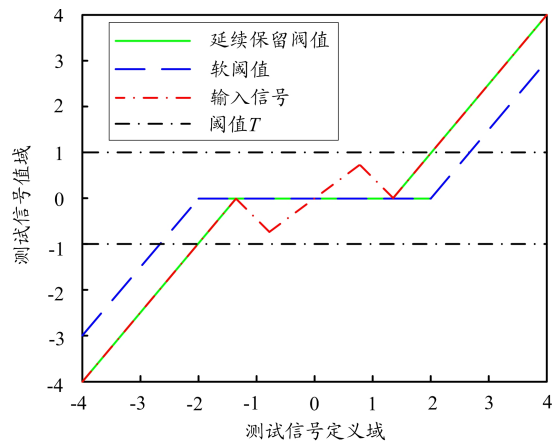
在 Matlab 中编制阈值函数程序,并设计一个简单的输入信号  $Y$  用于测试,设置阈值  $T=1$ ,则软、硬阈值函数的输出如图3(a)所示。

硬阈值法处理细节信号时,会引起不连续;软阈值法则会改变较大的细节信号。当细节信号存在较强的突变信号时,它很可能是有用的信号,所以软、硬阈值法都会对它产生影响。尤其在 OTDR 信号中,当遇到反射事件时,曲线上会形成很强烈的反射信号,它本身就是突变的。然而,无论是按指数衰减的瑞利散射信号,还是强烈突变的菲涅尔反射信号,都是 OTDR 的正常信号,并不能把它们当作噪声来滤除。所以本文提出一个新的阈值处理函数,当细节信号突破阈值时,函数会搜索突破前的一部分细节信号,与突破后的信号视为一体,一并保留,本文称为延续保留阈值,如图3(b)所示。延续保留阈值法需要在程序中判定突破阈值的细节信号的延续,并将之保留,相比硬阈值法和软阈值法,该方法实现过程更复杂。

延续保留阈值法与图3(a)中的硬阈值法相比,在超过阈值部分完全相同,同时还保留了部分阈值内的



(a) 硬阈值和软阈值



(b) 延续保留阈值和软阈值

图3 3种阈值函数

数值,认为它们是有用信号。这样对 OTDR 的突变信号影响较小,尽量降低伪吉布斯效应。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 普通 FIR 滤波器降噪

本文在 Matlab 中设计一个有限冲击响应(FIR)的 LPF,并对 OTDR 信号进行滤波,将滤波后的信号与原始信号进行叠加对比,结果如图4所示。普通的 FIR 滤波器使得信噪比提高了 2.4 dB,但是展宽并削低了反射峰,造成了信号失真,事件盲区增大,这对 OTDR 的性能指标很不利。

### 2.2 小波变换降噪

对同一 OTDR 信号,本文采用小波变换降噪的方法,选择 db2 小波,进行 4 层分解。分别使用硬阈值法、软阈值法和延续保留阈值法,结果如图5所示。

软、硬阈值法的整体效果图都与图5(a)差不多,对信噪比的提升都是 2.4 dB,因为它们只影响细节信

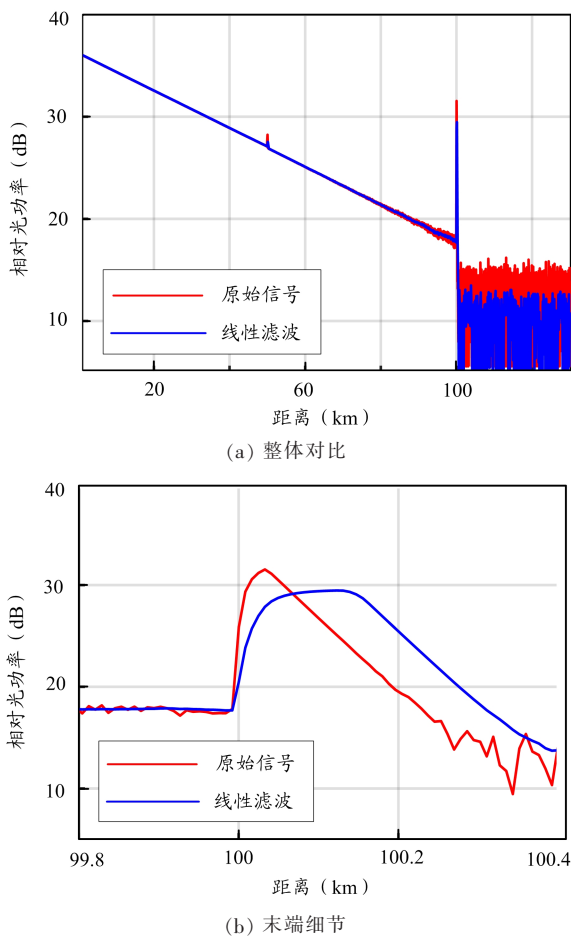


图 4 OTDR 信号与普通 FIR 滤波信号结果对比

号里突变的部分,对非突变的噪声具有相同的抑制作用。图 5(b)是延续保留阈值法处理信号与原始信号的末端细节对比图,可以看出,在反射峰前端 99.8~100 km 范围和反射峰下降沿的 100~100.3 km 范围内,两者重合得很好,曲线形态并没有多少区别。图 5(c)是硬阈值法处理信号与原始信号的末端细节对比图,在反射峰前端的 99.9 km 附近和下降沿的 100.2 km 附近,两者出现了分岔,硬阈值法处理过的曲线产生了较为明显的波动。图 5(d)是软阈值法处理信号与原始信号的末端细节对比图,在反射峰前端的 99.8~100 km 范围内以及下降沿的 100.2 km 附近,两者出现了严重的分岔,软阈值法处理过的曲线产生了剧烈的波动。从以上结果可以得出:无论是硬阈值法还是软阈值法,都改变了细节信号里的有用部分,对突变的曲线形态产生了较严重的影响,使得曲线质量变差,而且很可能会影响到后续的事件点分析<sup>[9]</sup>。相比之下,本文提出的延续保留阈值法则几乎不影响突变事件,在完成滤波同时,还保持了事件盲区不展宽和曲线的形态不劣质,是 3 种阈值方法中效果最好的。

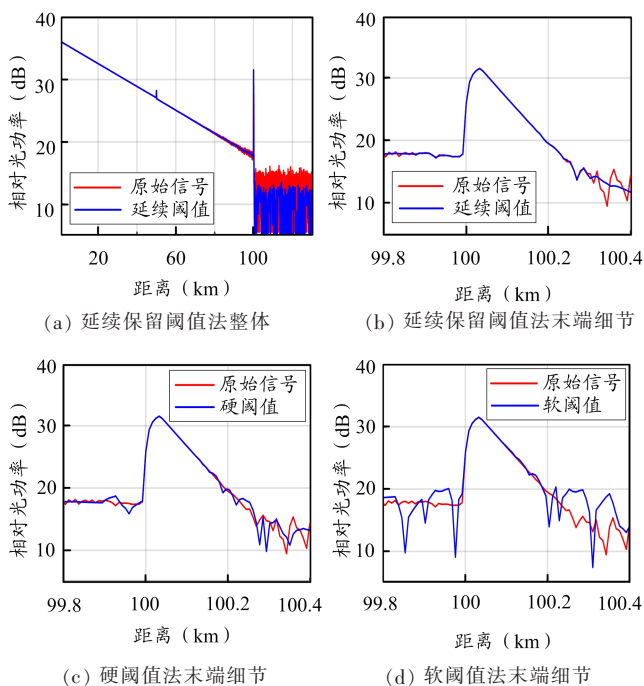


图 5 OTDR 信号与小波滤波降噪结果对比

### 3 结束语

OTDR 信号的特点,是既包含平稳的瑞利散射信号,又包含尖锐的非涅尔反射信号,它们都是有用信号。当使用小波变换的方法滤除 OTDR 信号中的噪声时,既要滤除瑞利散射信号里的噪声,又要保留尖锐的非涅尔反射信号。所以在处理细节信号时,不能改变超过阈值的信号,因为它们对应着非涅尔反射信号,任何阈值处理函数如果违反了这一原则,都会劣化测试结果。本文提出了新的阈值处理方法,既保留了硬阈值法不改变大信号的特点,又兼顾了软阈值法的连续性特点,不仅实现了滤波,而且在保持盲区的同时,保持了曲线的形态。本文提出的方法既提升了动态指标,又不劣化盲区的指标,在高性能 OTDR 中得到了应用。

### 参考文献:

- [1] 葛哲学,沙威. 小波分析理论与 MATLAB 2007 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [2] 周宇峰,程景全. 小波变换及其应用[J]. 物理学和高新技术,2008,37(1):24-31.
- [3] 张翠芳. 基于小波变换的模极大值降噪法的实现及改进 [J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2019,29(1):74-77.
- [4] 刘丽娜. 改进的小波变换阈值去噪算法 [J]. 工业技术与职业教育,2013,11(2):12-14.
- [5] 陈剑斌,朱磊,刘玲. 小波变换在 OTDR 事件分析中的应用[J]. 计算机应用与软件,2011,28(7):270-272.