

基于非局部均值滤波增强的 OTDR

朱信刚¹, 陆飞飞¹, 陆英¹, 唐杰杰¹, 孙淑娟², 徐健², 龙函², 徐泽峰²

(1. 国网徐州供电公司, 江苏 徐州 221005; 2. 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430205)

摘要:为解决 OTDR 测试曲线的信噪比受限问题,介绍了 OTDR 的基本原理和硬件结构,在此基础上采用 1D 和 2D 的非局部均值滤波算法对多次平均过后的测试曲线进行处理,提高了 OTDR 曲线的信噪比增益;引入 Canny 检测算法后来增强了对曲线事件识别的准确性和精度。

关键词:光时域反射仪;非局部均值滤波

中图分类号:TN206 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)02-0058-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.02.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Enhanced OTDR based on nonlocal means filtering

ZHU Xingang¹, LU Feifei¹, LU Ying¹, TANG Jiejie¹,
SUN Shujuan², XU Jian², LONG Han², XU Zefeng²

(1. State Grid Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou Jiangsu 221005, China; 2. Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430250, China)

Abstract: In order to solve the problem of signal-to-noise ratio limitation of OTDR test curves, the basic principle and hardware structure of OTDR are introduced. On this basis, nonlocal mean filtering algorithm of 1D and 2D are used to process the test curves after multiple averages, which improves the signal-to-noise ratio gain of OTDR curves. Canny detection algorithm is introduced to enhance the accuracy and accuracy of curve event recognition.

Key words: OTDR; nonlocal means filter

0 引言

随着光纤通信技术的不断发展,传输网络对光纤链路质量的要求越来越高。光时域反射仪(OTDR)能够对光纤线路进行无损检测,是光缆资源监控维护的重要手段。OTDR 利用信号光在光纤中的背向瑞利散射和菲涅尔反射可以实现光纤衰减、弯曲和断裂等故障的检测与定位。在 OTDR 的发展方向中,大动态范围和高事件分辨率始终是研究突破的重点与难点。伴随着光器件与硬件电路的发展,限制 OTDR 性能提高的主要因素是接收端放大电路的随机噪声导致的信噪比(SNR)劣化^[1-3]。常用提高 OTDR 曲线的 SNR 的方法有:提升硬件的采样精度、提高 APD 的探测灵敏度和数据降噪处理等。

收稿日期:2018-08-23。

作者简介:朱信刚(1973-),男,高级工程师,长期从事电力通信运维工作。主要研究方向是智能电网中的电力通信技术、SDH 传输网中的 ASON 技术、电力通信中的软交换技术、电力通信系统中的光纤光缆监测技术和光缆维护技术。



本文采用非局部均值滤波的方法作为数据处理的方式,在现有硬件条件下进一步提高 OTDR 测试曲线的 SNR;同时对于滤波后的 OTDR 曲线,引入 Canny 检测算法来提高曲线事件识别的准确性。

1 系统原理与结构设计

OTDR 通过接收信号光在传输光纤中的背向瑞利散射和菲涅尔反射来判断光纤损耗和事件。典型的 OTDR 模块结构如图 1 所示,连续激光器通过脉冲调制器实现脉冲光输出,脉冲宽度为 5~20000ns,脉冲光的峰值功率约为 100mW。脉冲信号首先经过环形器注入到待测光纤中,然后产生的后向瑞利散射光和菲涅

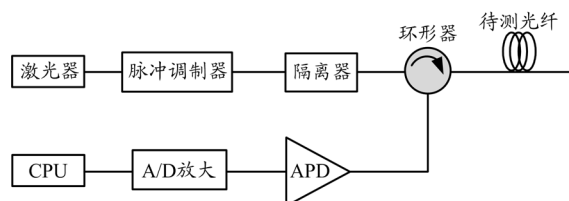


图 1 OTDR 模块结构框图

尔反射光通过环形器被雪崩光电二极管(APD)接收,最后经过模/数(A/D)放大电路后送至CPU进行数据处理与显示。以在不同返回时间时采集到的反射光功率为横轴,功率值的对数为纵轴,即可得到一条OTDR测试曲线;通过分析测试曲线的斜率以及曲线突变的位置和大小,即可得到光纤衰减、弯曲和断裂等事件信息。

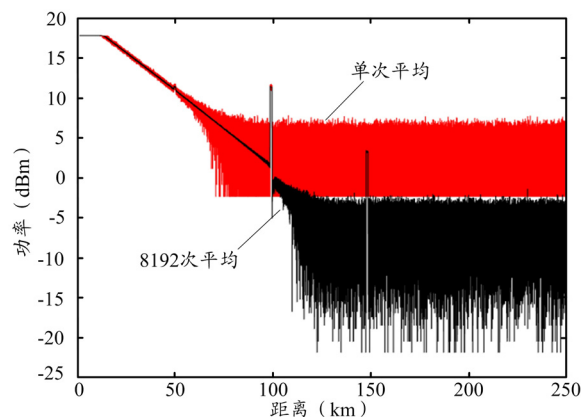
动态范围和事件分辨率是OTDR的主要性能指标。其中动态范围定义为初始信号与 $SNR=1$ 时的信号的dB差值,主要由脉冲宽度、APD灵敏度、电路噪声以及脉冲峰值功率决定,可以通过提高入射信号光功率和降低噪声功率等方法来提高OTDR的动态范围。但是考虑到非线性效应的限制,脉冲的峰值功率不能无限提升,而目前商用化的OTDR产品的APD灵敏度和电路噪声已经很难提升,因此往往通过提高脉冲宽度来提高动态范围。事件分辨率表示相邻事件的最小距离,主要由采样频率和脉冲宽度决定。对于事件分辨率而言,采样频率目前不再是瓶颈,如果要提升事件分辨率,往往又需要降低脉冲宽度,因此OTDR在实际使用中需要灵活选择脉冲宽度。

除此之外,OTDR还可以采用数据处理的方法来提高测试性能,主要包括采用多次平均和滤波降噪的方法来提高曲线的SNR,进而提高动态范围,同时用事件分析算法来提高曲线的事件识别准确性。其中多次平均的方法实现起来较为简单,已经被广泛地应用在OTDR产品中。

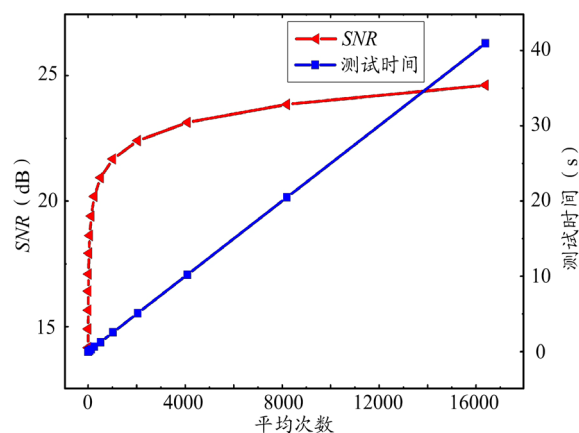
OTDR曲线中的噪声可以认为是均值为0、方差为 σ 的高斯噪声,经过 N 次平均后,噪声方差变为 $\sigma/\sqrt{N}$ 。由于OTDR对数采用的是5lg,因此平均次数 N 对曲线的SNR的提升为 $5\lg\sqrt{N}$ (dB)^[4]。如图2(a)所示,8192次平均后的测试曲线相比单次测试曲线的SNR提高了9.8dB。单次测试曲线无法观察到150km处的反射末端,但在经过8192次平均后端事件非常明显。不同平均次数下曲线的SNR变化和测试时间分别如图2(b)中的红线和蓝线所示。可以看到,多次平均可以显著提高曲线的SNR,但是在平均次数超过10000次以后,SNR的继续提升就需要相当长的测试时间,对实际应用而言,OTDR的测试时间往往不能超过180s。因此兼顾到测试效率和测试性能,平均次数设置在10000次左右比较合适。本文选择8192次是由于硬件设计的原因,平均次数只能是2的整数次方。

经过平均处理后的测试曲线可以采用滤波降噪进一步提高曲线的SNR,典型的滤波方法有小波变

换、中值滤波以及双边滤波。其中小波变换算法较为复杂,而且容易引入人造特征;而中值滤波和双边滤波要么滤波效果不明显,要么容易造成曲线事件细节的模糊,导致事件误判。得益于硬件计算能力的提升,本文采用非局部均值滤波算法在保证曲线细节不丢失的前提下,能进一步提高OTDR曲线的SNR^[5]。



(a) 单次测试曲线和8192次平均后的曲线对比



(b) 平均次数与SNR增益和测试时间的关系

图2 单次测试和多次平均测试对比

2 非局部均值滤波算法分析

2.1 非局部均值滤波原理

非局部均值滤波算法利用数据的冗余性和相似性,具有较好的降噪能力,同时能够保留曲线的细节信息。具体实现方法是:当前数据点的值由所有与它结构相似的数据点的加权平均得到;数据结构相似性由计算数据块之间的欧式距离得到;对任意第 i 个数据点,则滤波后的值 f_i 可由式(1)计算得到^[6]:

$$f_i = \frac{\sum_{j \in N_i} w_{ij} \times g(x_i)}{\sum_{j \in N_i} w_{ij}} \quad (1)$$

其中, N_i 表示整个数据合集或一个较大搜索区域, w_{ij} 表示与数据点 i 与 j 之间的相似权重, 分母为归一化因子。 w_{ij} 可以通过计算 i, j 之间的欧式距离得到, 如式(2)所示:

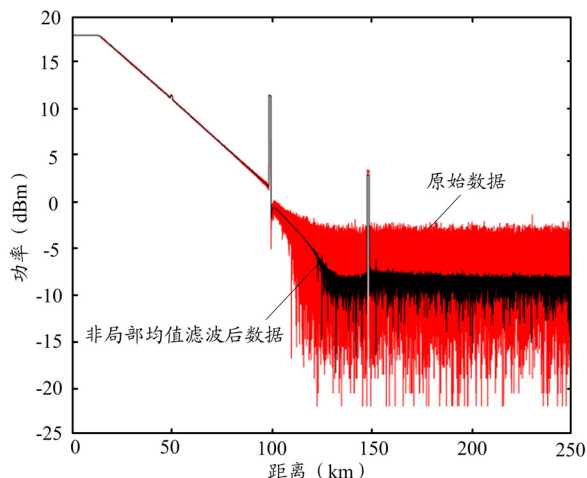
$$w_{ij} = \exp\left(-\frac{\|g_i - g_j\|_2^2}{h^2}\right) \quad (2)$$

其中, g_i 与 g_j 为相同大小的分别包含 i 与 j 的数据块, h 为滤波因子。 h 越大滤波效果越明显, 但同时会带来细节的模糊, h 的最优值与噪声方差和数据块大小有关。非局部均值滤波算法主要应用在 2D 图像去噪领域, 但算法效率较低, 运算时间较长。然而 OTDR 测试曲线仅用到 1D 的数据或者数条 1D 曲线合成的 2D 数据, 因此相比图像处理领域的应用, 其运算时间大大缩减。

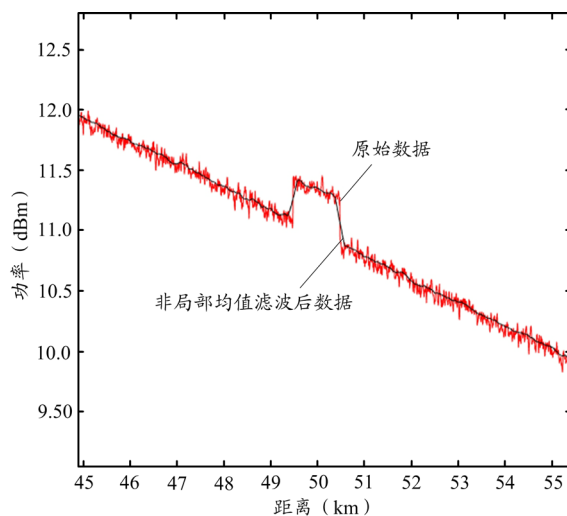
2.2 实验结果与分析

本文首先对 1D 的 OTDR 测试曲线使用非局部均值滤波算法进行滤波处理。原始的 OTDR 测试曲线为 8192 次平均后的结果。测试光纤实际长度为 150km, 采样范围为 250km, 测试脉宽为 10000ns, 测试时间为 20s, 采样频率为 50MHz, 总数据点个数为 125000。滤波算法搜索区域长度为 50, 相似区域为 9, 滤波因子 h 设置为 10, 测试结果如图 3 所示。从图 3(a)可以看出滤波后的曲线的 SNR 提高了 5.2dB, 图 3(b)、图 3(c)和图 3(d)分别为曲线在 50km 的小反射事件、中间衰减以及 100km 处的强反射事件的放大, 由此可知滤波算法有效地抑制了曲线的噪声波动, 同时又能保证曲线细节不丢失。

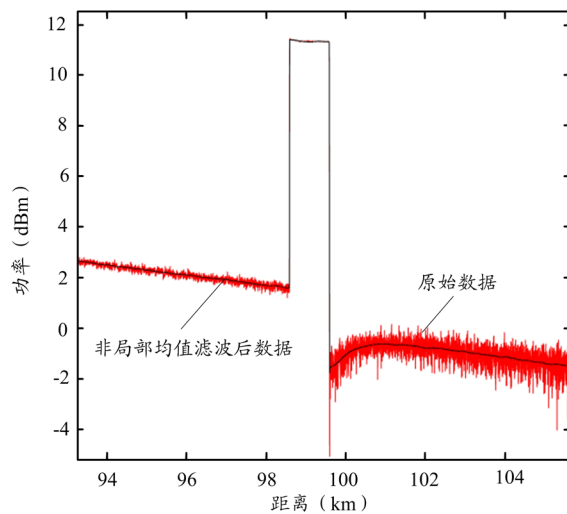
为了将数条 OTDR 曲线整合在一起, 另一种应用非局部均值滤波的方法为 2D 非局部均值滤波。考虑



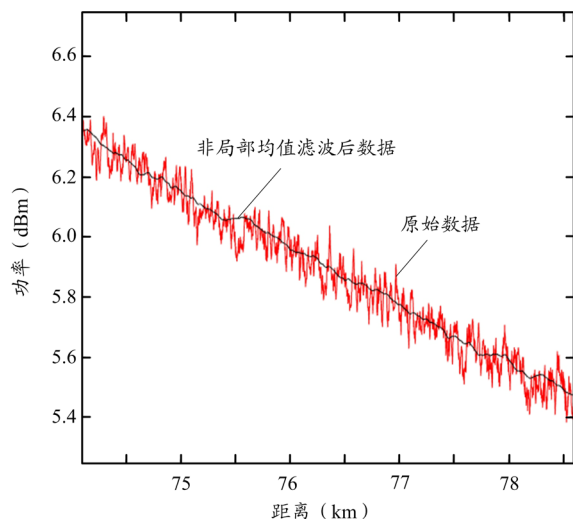
(a) 整体的曲线对比



(b) 小反射事件



(c) 中间衰减



(d) 100km 处的强反射事件

图 3 8192 次平均后的曲线和滤波后的曲线对比

到运算时间,本文选择了 4 条 OTDR 曲线数据进行滤波处理。为了方便对比实验结果,我们采用了平均 2048 次后的结果,测试环境与之前 1D 滤波测试时保持一致。滤波算法选择搜索区域长度为 50×4 ,相似区域为 9×4 ,滤波因子 h 设置为 40,测试结果如图 4(a)所示,滤波后的曲线的 SNR 提高了 7dB,而且底噪部分变得更加平滑;图 4(b)是将滤波后的 4 条曲线进行平均后的结果,相比原始测试曲线的 SNR 提升了 7.3dB。由上节可知平均次数增大 4 倍带来的 SNR 增益为 1.5dB,而滤波后的曲线的平均增益仅为 0.3dB,这是因为滤波算法本质也是进行多次累加平均,因而第 2 次的平均会出现效果弱化。然而对于 8192 次平均后的测试数据,1D 的滤波算法增益为 5.2dB。2048 次平均的测试数据相比 8192 次平均的测试数据,SNR

相差 1.5dB,经过 2D 滤波后 SNR 增益为 7dB。因此,2D 滤波算法相对 1D 滤波算法有 0.3dB 的增益提升,再加上 2D 滤波以后的平均,总体增益能够提升 0.6dB。同时也需要注意到 2D 滤波算法的计算时间为 1D 滤波算法计算时间的 16 倍。因此,在硬件运算足够的前提下采用 2D 滤波算法可以进一步提升 OTDR 曲线的 SNR。

3 事件分析算法

常用的事件分析算法为最小二乘法、五点法以及小波变换,其中前两者应用最为广泛,但是仍存在事件分析精度较差的问题;小波变换算法较为复杂,灵敏度高但是容易出现误判。本文引入 Canny 算法进行 OTDR 曲线事件定位分析,再用最小二乘法和五点法分析事件的类型和大小,可以得到准确的事件信息。Canny 算法是目前应用最为广泛的图像边缘检测算法。OTDR 曲线主要识别衰减事件、反射事件和末端事件。上述 3 个事件在 OTDR 曲线上最明显的表现就是功率突变,与图像中边缘像素值突变非常类似。

Canny 算法分为 4 步:

①采用高斯滤波以平滑曲线滤去噪声。上节中采用的非局部均值滤波也能够达到同样的效果。

②计算每个数据点的梯度强度和方向。由于本实验中采用的原始数据为 OTDR 的测试曲线,因此只关注一个方向的梯度强度。

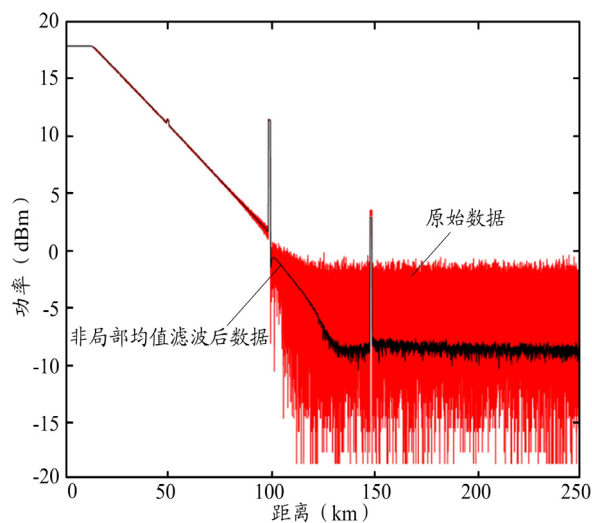
③采用一阶差分模板计算的梯度幅值如式 (3)所示^[7]:

$$G_i = f_{i+1} - f_i \quad (3)$$

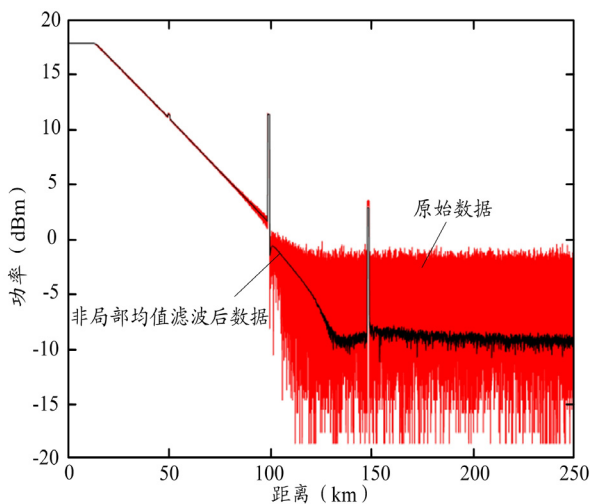
其中, G_i 表示 i 点的梯度值, f_i 表示滤波后 i 点的数据值。得到一条梯度曲线后需要进行非极大值抑制来提高事件定位的精度。具体操作是将梯度值与周围同方向的梯度值比较,如果是最大值则保留,如果不是则抑制为 0。

④设置合适的检测阈值进行事件判断即可。

图 5 为 Canny 算法处理前后的测试曲线对比。可以看到一个事件对应 2 个极大值,这是因为原始曲线包含上升和下降 2 个突变点,因此需要依据事件的持续长度来进行事件的合并。当事件的持续长度与脉冲宽度成正比时,选用适当的噪声阈值进行软判决即可准确定位 OTDR 曲线中的突变事件。

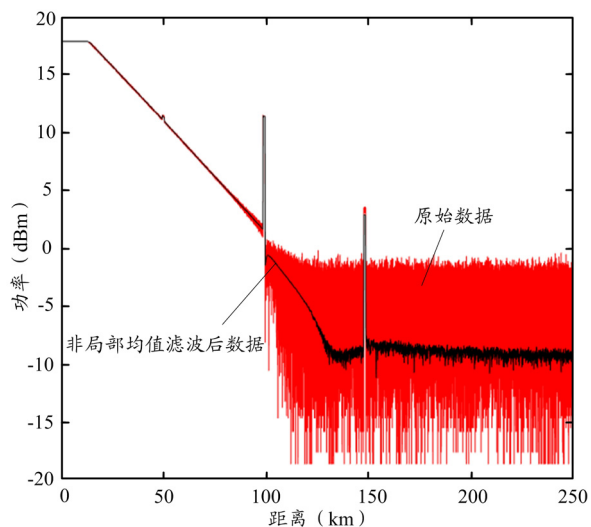


(a) 2048 次平均和滤波后的曲线对比

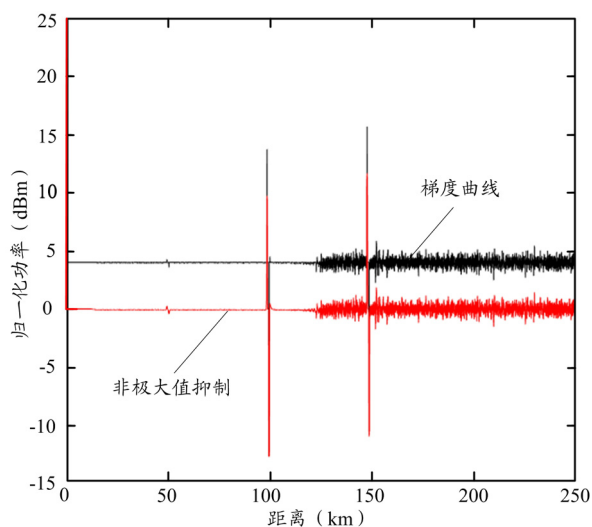


(b) 2048 次平均和滤波后再 4 次平均的曲线对比

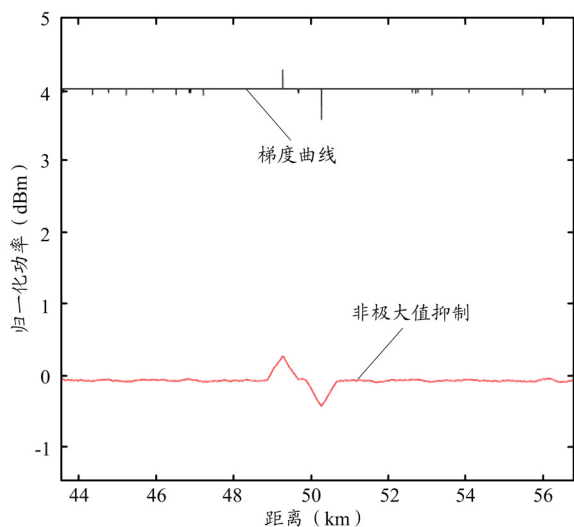
图 4 2D 非局部均值滤波后的曲线对比



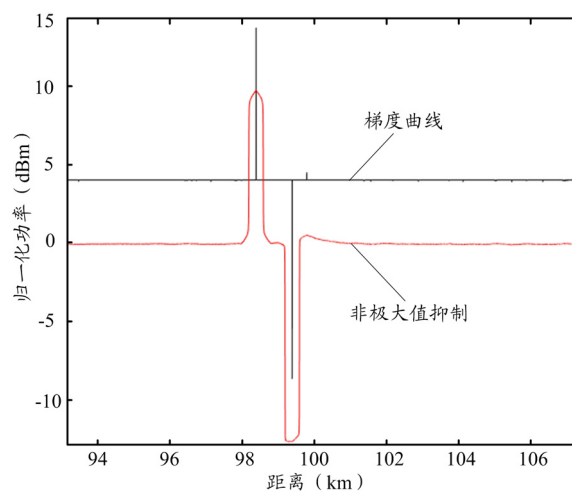
(a) 平均后的曲线和滤波后的曲线对比



(b) 梯度曲线和非极大值抑制后的曲线对比



(c) 在 44~56km 处的梯度曲线和非极大值抑制后的曲线细节放大对比



(d) 在 94~106km 处的梯度曲线和非极大值抑制后的曲线细节放大对比

图 5 Canny 算法处理前后的测试曲线对比

4 结束语

本文首先介绍了 OTDR 的硬件结构以及数据处理方法, 采用非局部均值滤波的方法提高 OTDR 曲线的 SNR, 并在现有硬件基础上进一步提升了 OTDR 的测试性能; 然后分别使用 1D 和 2D 非局部均值滤波的方法, 在兼顾测试效率的同时分别提高了 OTDR 曲线的 SNR 5.2dB 和 7dB; 最后引入了 Canny 算法增强了 OTDR 事件识别的准确性和精度。本文使用的算法实现较为简单, 算法速度取决于硬件的计算能力, 既可以放在底层 FPGA 实现, 也可以放在上位机软件中实现, 对目前商用化的 OTDR 产品性能的进一步提升具有重要的实用意义。

参考文献:

- [1] 曾庆珠, 徐智勇. 基于 Gabor 算法的 OTDR 设计与研究[J]. 光通信技术, 2017, 41(12): 37-40.
- [2] 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.
- [3] 仇谷峰, 高稚允. 基于小波变换和最小二乘法的光纤衰减特性分析[J]. 光学技术, 2000, 26(5): 464-466.
- [4] ANDERSON D R, JOHNSON L, BELL F G, et al. Troubleshooting Optical Fiber Networks: Understanding and Using Optical Time-Domain Reflectometers[M]. Boston: Elsevier Academic Press, 2004: 13-58.
- [5] 刘晓明, 田雨, 何徽, 等. 一种改进的非局部均值图像去噪算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(4): 199-201.
- [6] WU H, WANG L, ZHAO Z, et al. Brillouin optical time domain analyzer sensors assisted by advanced image denoising techniques[J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5126-5139.
- [7] 林卉, 赵长胜, 舒宁. 基于 Canny 算子的边缘检测及评价[J]. 黑龙江工程学院学报, 2003, 17(2): 3-6.