

基于 LabVIEW 的光时域反射仪及反射事件检测分析

王娟, 倪屹, 郭瑜, 朱星盈

江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122

摘要 设计了一款基于 LabVIEW 的光时域反射仪(OTDR), 选用 1625 nm 波长的脉冲激光模块作为光源, 采用高灵敏度雪崩二极管光电探测器和高速数据采集卡, 在 LabVIEW 集成化虚拟仪器开发环境控制下, 对光信号进行采集、处理和数据存储, 实现光纤在线实时监控。采用数字平均与加权滑动平均相结合的算法, 对返回的背向散射信号进行降噪, 并定量分析了数字平均次数、平滑宽度、平滑类型对 OTDR 系统信号处理结果的影响, 从而给出一个最佳平滑模型。采用求一阶导数方法并设置导数和幅度双重阈值, 对反射事件点进行定位。采用该系统对实际光缆线路的测试结果表明, 所提出的最佳平滑滤波器与传统平滑滤波器在相同平滑宽度下相比, 动态范围提高了 1.1 dB, 信噪比提高了 1.25 倍。所提定位算法能较准确地定位反射事件点, 表明该算法具有一定的实用价值。

关键词 测量; 光时域反射仪; 加权滑动平均; 反射事件检测

中图分类号 TN206 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.121205

Optical Time Domain Reflectometry Based on LabVIEW and Detection Analysis of Reflection Events

Wang Juan, Ni Yi, Guo Yu, Zhu Xingying

School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract A optical time domain reflectometry (OTDR) system based on LabVIEW is designed. A 1625 nm wavelength pulsed laser module is used as the light source. The high-sensitivity avalanche diode photodetector and high-speed data acquisition card are used to collect, process and storage the optical signal under the control of the LabVIEW integrated virtual instrument development environment, in order to realize on-line real-time monitoring of fiber. An algorithm combining digital average method and weighted sliding-average is adopted to reduce the noise of the returned backscatter signal, and the effect of the digital average time, smooth width and smooth type on the result of signal processing of the OTDR system is quantitatively analyzed. Then the best smooth model is given. The first derivative method is used and the double thresholds of derivative and amplitude are set to locate the point of the reflection event. The experimental results of practical optical cable line with the proposed system show that the optimal smoothing filter proposed in this paper improves the dynamic range by 1.1 dB and the signal-to-noise ratio by 1.25 times compared with the traditional smoothing filter at the same smooth width. The proposed positioning algorithm can be used to locate the point of the reflection event accurately, which indicates that the proposed algorithm has certain practical value.

Key words measurement; optical time domain reflectometry; weighted sliding-average; reflection event detection

OCIS codes 120.4825; 060.2300; 070.2025

1 引言

随着光网络的广泛应用和传输网络对光纤线路质量要求的不断提高, 以及受自然灾害及人为因素影响

收稿日期: 2017-06-26; **收到修改稿日期:** 2017-07-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61701195)、中央高校基础科研经费(JUSRP11740)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20160190)、江苏省六大人才高峰计划(DZXX-023)

作者简介: 王娟(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电子学和光信号处理方面的研究。E-mail: jnwj0906@163.com

导师简介: 倪屹(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电子学方面的研究。E-mail: niy2011@163.com(通信联系人)

导致的光缆损毁与故障事故在所难免,光纤线路检测越来越重要。光时域反射仪(OTDR)是最常用、最全面的光纤检测工具之一,可用于光纤测距和故障定位^[1]。

传统的 OTDR 采用硬件结构构成系统的模式,存在维护成本高、寿命短等缺点,通用、智能化的虚拟仪器的迅速发展,改革了数据采集系统的设备和实现方法,虚拟仪器与传统仪器相比具有开发和维护成本低、技术刷新周期短、兼容性好等优点,是自动测试和电子测量仪器领域的新方向^[2]。

本文设计了一款基于 LabVIEW 的 OTDR,通过串口程序控制光源模块,内部调用 Matlab 语言,对信号进行同步采集、处理并保存数据,实现光纤在线实时监测。

到目前为止,人们针对 OTDR 数据分析已经提出了一些算法,其中,两点法是基础、常规的方法,但由于噪声的存在导致该方法的精度有限。随后,Liu 等^[3-4]提出了加窗傅里叶变换/最小描述长度准则(GSR/MDL)方法,并使用 1 级匹配子空间检测(R1MSDE)方法对其进行进一步改进。Man 等^[5]引入了具有二进制信号检测理论的 Gabor 变换方法,但定位精度需要进一步优化。Ma 等^[6]采用短时傅里叶变换与相关匹配相结合的算法,得到的定位精度达到 0.01 m,定位误差不超过 4 m。在短时傅里叶变换法的基础上,小波变换(WT)应运而生,它具有可扩展的空间分辨率,但其日益增长的计算工作量使得操作和管理在线光纤监控系统变得困难,所以并未将其应用于实际软件产品中^[6-7]。

为降低噪声对事件定位的影响,最常用的方法是数字平均,但随着平均次数的增大,系统响应时间增长,实时性降低。未加权平滑降噪方法已经在相位敏感 OTDR 信号处理中得到应用,但降噪能力有限^[8]。

为了解决上述问题,本文针对反射事件点先采用数字平均法对使用自主设计的 OTDR 采集到的原始数据进行预处理,再采用加权滑动平均法对预处理数据进行再处理,最后采用一阶导数阈值与幅值阈值相结合的方法,对反射事件点进行定位。采用本文设计的最佳平滑滤波器与传统平滑滤波器在相同平滑宽度下相比,动态范围提高了 1.1 dB,信噪比(SNR)提高了 1.25 倍。本设计不引入复杂算法,且定位误差不超过 2 m。

2 OTDR 系统设计

2.1 OTDR 原理

OTDR 可实现单端无损测量,并能连续地显示光纤链路的情况及变化,所以被广泛地应用于光网络在线监测中^[9],其基本原理如图 1 所示,图中 ONU 表示光网络单元,APD 表示雪崩二极管光电探测器。

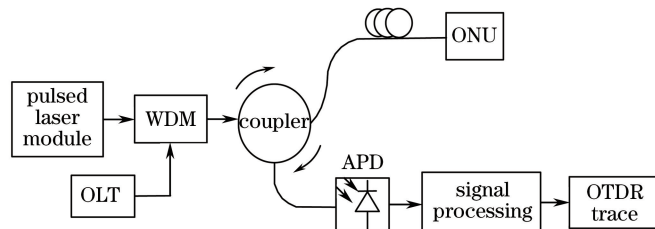


图 1 OTDR 基本原理图

Fig. 1 Basic principle of OTDR

脉冲激光模块发出脉冲激光,与网络中光纤线路终端(OLT)正常工作波长的光信号经过波分复用器(WDM)合并,由耦合器注入到待测光纤中。返回的后向瑞利散射信号通过耦合器后由光电探测器接收,将光信号转变为电信号,经过进一步的信号处理后,得到 OTDR 迹线并对事件点进行定位。其中反射事件呈现为脉冲形状,脉冲宽度表征了事件盲区的大小和分辨率,脉冲幅度则表征了该事件点的反射强度^[10]。

2.2 系统设计

1310,1550 nm 是光纤传输系统中最常用的信号传输波长,1625 nm 的光缆监测系统对于光纤微压、微弯等细微变化的反应最为敏感^[11]。为了具有较低的衰减性能并实现光纤在线监测,本系统采用飞博源光电公司自主设计的 1625 nm 脉冲激光光源模块,其最大输出峰值功率为 30 mW,脉冲宽度范围为 10~5000 ns,调节步进为 5 ns,脉冲重复频率范围为 1~10 kHz。模块上有 SMA(Sub-Miniature-A)射频接口,可以输出同步信号。

PIN 型光电二极管和 APD 是常用的光电转换器,在输入功率低于 1 mW 时 APD 有更高的信噪比,更有利于探测微弱的光信号^[12],故本系统采用飞博源公司制造的 InGaAs APD 光电探测模块 IAMTT-6020,其带宽为 100 MHz,探测光功率范围为 -65~-20 dBm。采用 LDC-3724C 激光二极管控制器对其进行标定,得电压(U)-功率(P)关系式: $P=0.0025U$ 。

数据采集卡选用美国 NI 公司的 PCI-5114 高速数据采集卡,其最大实时采样率为 250 MS/s,带宽为 125 MHz,将脉冲光源模块的同步信号输出端口连接至采集卡的触发通道,实现同步触发,触发电平的分辨率为 8 bit,可得到 0.0001 dB 的极高光纤损耗分辨率。

在 LabVIEW 开发环境下编写串口程序控制脉冲激光光源模块的脉冲宽度、输出功率和重复频率,在 NI-Scope 的驱动下,根据重复频率和光源模块的同步信号编写多次同步触发数据采集程序,采集 APD 输出信号并进行暗电流校准、功率转换,将数据保存在高速数据流技术文件管理系统 (TDMS) 文件中,再调用 Matlab 对数据进行后续处理,得到降噪和定位结果。软件处理流程、LabVIEW 处理程序和实时显示截图分别如图 2、3、4 所示。

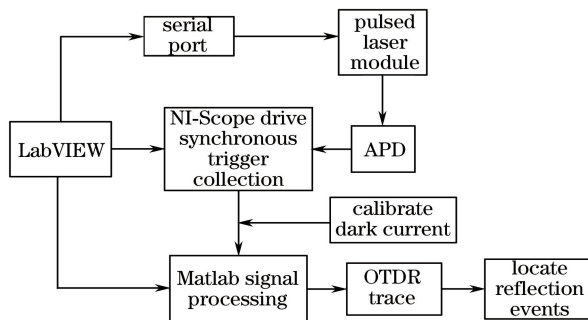


图 2 软件处理流程图

Fig. 2 Software processing flow

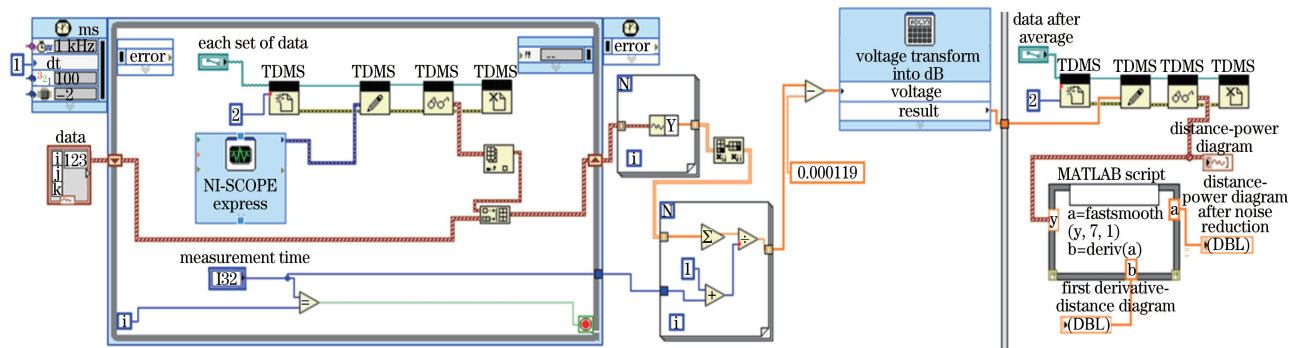


图 3 LabVIEW 处理程序

Fig. 3 Processing procedures of LabVIEW

OTDR 的空间分辨率由脉冲宽度、探测器带宽和采集卡采样速率分别决定的分辨率的最大值决定,由脉冲宽度 T 、光电探测器带宽 f_{LBF} 、采集卡采样速率 $f_{A/D}$ 决定的空间分辨率分别表示为:

$$\Delta Z_T = \frac{cT}{2n}, \tag{1}$$

$$\Delta Z_{f_{LBF}} = \frac{c}{2nf_{LBF}}, \tag{2}$$

$$\Delta Z_{f_{A/D}} = \frac{c}{2nf_{A/D}}, \tag{3}$$

式中 c 为真空中光速, n 为光纤折射率,故本研究的 OTDR 的空间分辨率为 1 m。

本实验测试环境如下:依次连接 1, 20, 1 km 光纤,脉冲激光光源的出纤功率为 30 mW,脉冲宽度为 200 ns,采样率为 125 MS/s,在 Matlab 中打开采集一次得到的原始数据,如图 5 所示。

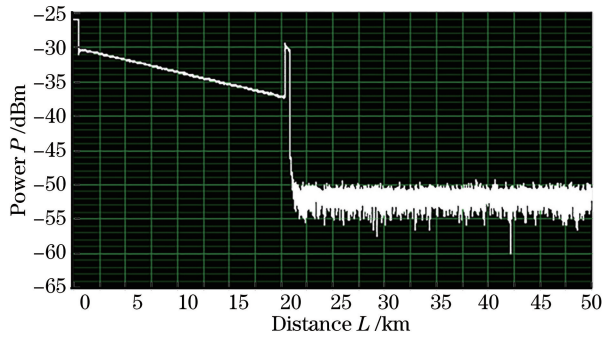


图 4 距离-功率图

Fig. 4 Distance-power diagram

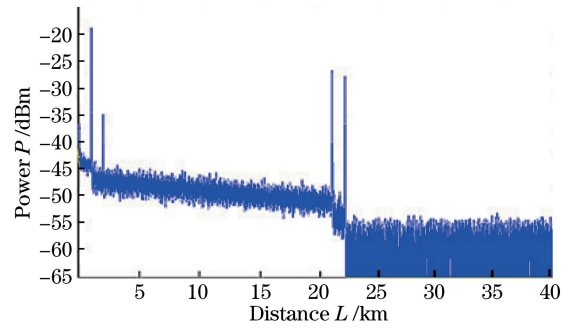


图 5 原始数据

Fig. 5 Original data

在光纤接头处和光纤始末端分别存在一个反射事件,在 2 km 附近存在一个鬼影事件,鬼影事件并不是真正的反射事件,不会产生明显的衰耗。

3 降噪算法分析

3.1 数据平均

采集得到的原始数据含有大量噪声,提高信噪比最常用的技术是数字平均,LabVIEW 采集程序根据脉冲重复频率设置同步定时触发循环采集,最终获取 N 次测量结果的平均值。经过数字平均处理后的噪声功率降低为原噪声功率的 $1/N$,信噪比提高至原来的 \sqrt{N} 倍^[13]。

图 6 为数字平均后的数据。如图 6(a)所示,100 次平均处理后,曲线的动态范围增加了 7 dB 左右,与理论值相差 3 dB,这是因为系统中并非只有高斯白噪声,不能通过平均完全消除噪声。如图 6(b)所示,将平均次数增加到 1000 次,动态范围又提高了 1.5 dB 左右,但花费的时间却是平均 100 次的 10 倍。因此不能无限地通过数字平均的方法来提高动态范围,本研究在数字平均一定次数后,再采用加权滑动平均法来提高信噪比和动态范围。

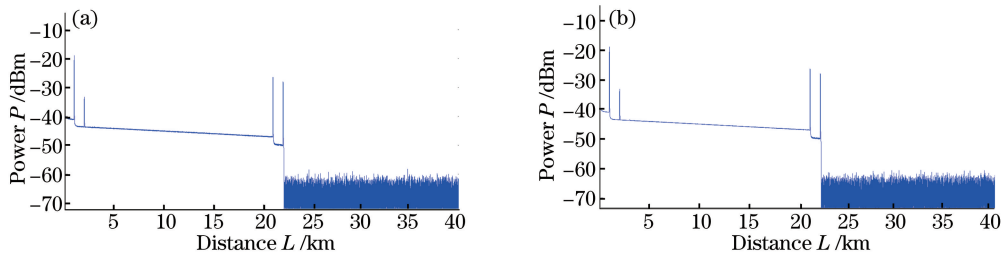


图 6 数字平均后数据。(a)数字平均 100 次;(b)数字平均 1000 次

Fig. 6 Data after digital average. (a) Digital average time is 100; (b) digital average time is 1000

3.2 加权滑动平均

3.2.1 滑动平均的基本原理

OTDR 数据可以看作线性信号与突发性信号叠加的非平稳信号^[14],在适当的小区间上非平稳数据可被视为平稳数据,可通过做局部平均来减小随机误差^[15]。平滑滤波器相当于一个低通滤波器,可以有效降低 OTDR 信号中的高频噪声。平滑处理时,只要真正的底层信号实际上是平滑的,那么真正的信号就不会因平滑而失真^[16-17]。

3.2.2 未加权平滑和加权平滑滤波性能比较

最简单的平滑算法是矩形平滑,即未加权平滑,它只是以 m 个相邻点的平均值替换信号中的每一点,其中 m 为平滑宽度,一般取奇整数,使得平滑系数围绕中心点对称平衡。例如,对于 3 点平滑,即 $m=3$, j 取 $2 \sim n-1$ 时,平滑公式为:

$$S_j = \frac{Y_{j-1} + Y_j + Y_{j+1}}{3}, \quad (4)$$

式中 n 为信号总点数, Y_j 为原始信号中第 j 个点, S_j 为平滑后的第 j 个点。若信号中白噪声的标准差是 s , 经过上述处理后, 信号中的噪声的标准差变为 s/\sqrt{m} ^[17]。

三角平滑是未加权平滑的改进, 实现了加权平滑的功能。当 $m=5, j$ 取 $3 \sim n-2$ 时, 三角平滑公式为:

$$S_j = \frac{Y_{j-2} + 2Y_{j-1} + 3Y_j + 2Y_{j+1} + Y_{j+2}}{9}. \quad (5)$$

若平滑宽度为 m , 则信号始端的前 $(m-1)/2$ 个点和终端的 $(m-1)/2$ 个点无法像其他点一样进行平滑。在 OTDR 信号中, 始端为前面板引起的反射峰, 终端为远离光纤末端的无实际意义的噪声点, 这些数据可以不用进行平滑处理, 不会对信号处理、事件定位有影响。

多次应用平滑操作可以建立更长、更复杂的平滑。例如, 上述 5 点三角形平滑法相当于进行两次 3 点矩形平滑, 进行 3 次 3 点矩形平滑的结果是 7 点伪高斯平滑, 此时分子的系数的比例为 $1:3:6:7:6:3:1$ 。在含噪声的信号中, 加权平滑在降低高频噪声方面比单个相同宽度的未加权矩形平滑更为有效^[18]。

如图 7(a) 所示, 首先构造一个峰宽点数为 40 的脉冲峰, 在该峰上加高斯白噪声, 使其未做平滑处理前的信噪比为 1, 信噪比等于峰峰值除以噪声标准差。对于峰型信号, 关键因素是平滑比, 本研究定义平滑比为平滑宽度除以半峰全宽内数据点的个数。对于上述数据, 分别进行三种不同平滑类型、同一平滑类型不同平滑比的平滑处理, 对比不同平滑参数对信号处理的影响。

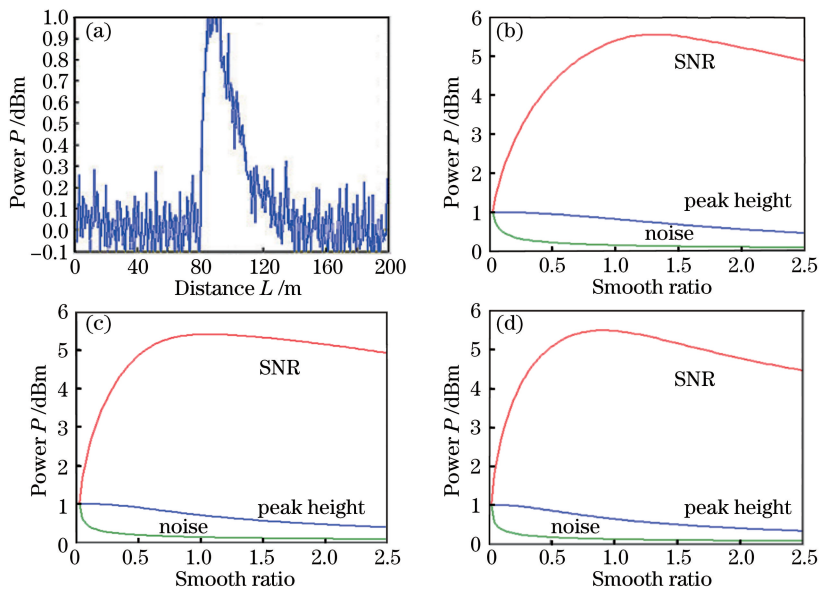


图 7 (a) 含噪脉冲峰; (b) 矩形平滑、(c) 三角平滑和 (d) 伪高斯平滑对数据处理的影响

Fig. 7 (a) Pulse peak with noise; influence of (b) rectangular smooth, (c) triangular smooth and (d) pseudo-Gaussian smooth on data processing

由图 7(b)~(d) 可以看出, 信噪比不会随着平滑宽度的增加而一直增加, 当平滑比达到 1 左右, 信噪比开始下降, 经过一次三角平滑处理后, 信号中噪声的标准差变为 $0.8s/\sqrt{m}$ 。经过一次伪高斯平滑处理后, 信号中噪声标准差变为 $0.7s/\sqrt{m}$, 与经过一次未加权滑动平均法相比, 上述两种平滑方法信噪比分别提高了 1.25 倍、1.43 倍, 更有效地降低了噪声。

3.2.3 平滑宽度的选取

平滑虽然提高了信噪比, 但是降低了峰的幅度同时增加了峰的宽度, 所以平滑宽度的选取是构建平滑滤波器的关键。平滑宽度 m 若取值较小, 不利于抑制随机误差; 反之, 若 m 取值较大, 则可能会平滑掉有用信号, 对 OTDR 反射事件造成漏判。

可以看出, 在平滑比为 0.5 时, 即平滑宽度等于半峰全宽的一半时, 信噪比提高的同时, 对峰形的影响较

小,所以选择脉冲峰宽中数据点个数的四分之一作为最佳的平滑宽度。

3.2.4 平滑类型的选取

图 8 直观地表示了同一数据在平滑宽度相同、平滑类型不同时对峰值、噪声标准差、信噪比的处理结果,图中实线代表未加权平滑,虚线代表三角平滑,点线代表伪高斯平滑。执行三种不同的平滑,运行一次的时间分别为 0.0004,0.001,0.0013 s,处理迅速。

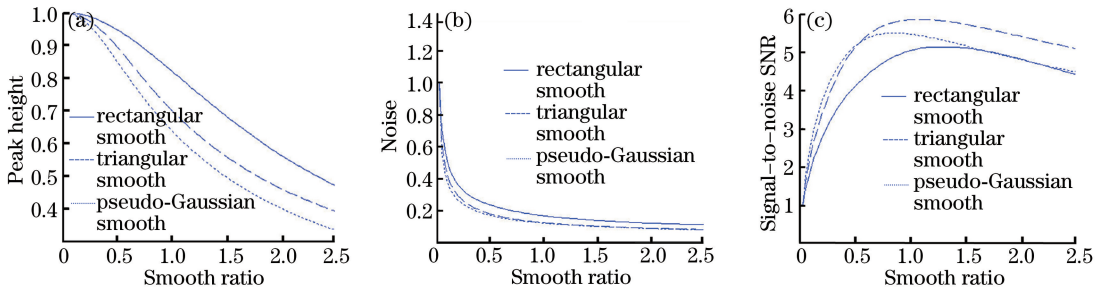


图 8 三种不同平滑类型数据处理的对比。(a)峰值;(b)噪声标准差;(c)信噪比

Fig. 8 Comparison of data processing for three different smooth types. (a) Peak value;

(b) noise standard deviation; (c) SNR

从图 8 可以看出,在保持峰形方面矩形平滑最优,在降低噪声方面伪高斯平滑最优;在提高信噪比方面,当平滑比小于等于 0.5 时,伪高斯平滑最优,当平滑比大于 0.5 时,三角平滑最优。通过比较分析可知,对于 OTDR 反射事件点,为了在提高信噪比的同时保持峰形,减少漏判率,三角平滑是最优的平滑类型。

3.2.5 动态范围的影响

将一次采集得到的数据分别使用一般的滑动平均和本研究提出的最佳滑动平均模型进行降噪,结果如图 9 所示。与一般的滑动平均相比较,所提出的加权滑动平均模型对动态范围带来了 1.1 dB 的提升。

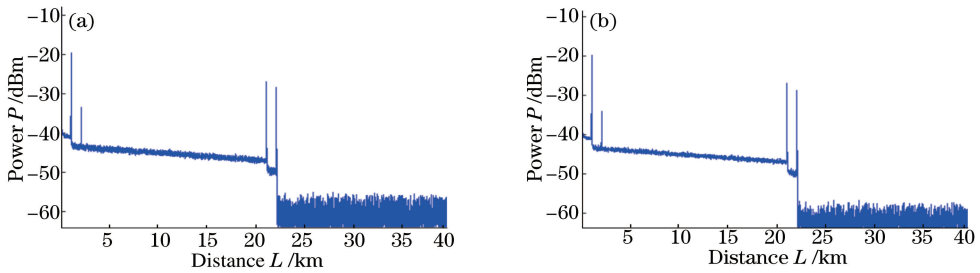


图 9 不同平滑类型对动态范围的影响。(a)一般平滑;(b)最佳平滑

Fig. 9 Influence of different smooth types on dynamic range. (a) General smooth; (b) best smooth

4 OTDR 反射事件点定位方法及结果分析

4.1 降噪处理结果

将数字平均 100 次后的数据进行再处理,根据测试脉冲的宽度、采样速率得到反射峰的采样点数,选取

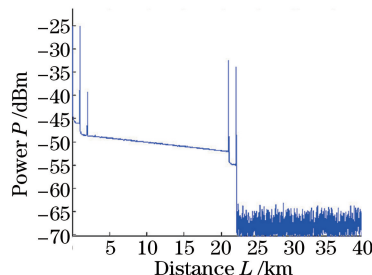


图 10 对平滑宽度为 9 的三角平滑数据进行平滑处理

Fig. 10 Smoothing the triangular smooth data with smooth width of 9

平滑宽度为 9 的三角平滑对其进行平滑再处理,结果如图 10 所示,与数字平均 100 次后的数据相比,平滑后的动态范围大约增加了 2 dB,降噪效果明显。

4.2 反射事件点定位

两点法通过计算相邻两个数据点的斜率变化情况来判断事件点位置,本研究采用中心差分法计算每个数据点的一阶导数。不同分辨率下的仿真事件点实验表明,该算法减小了定位误差,如表 1 所示。

实测数据中含有大量噪声,故降噪是事件定位前的必经步骤,图 11 分别为原始数据的一阶导数、平均 100 次后的一阶导数、平滑宽度为 9 的三角平滑后的一阶导数。可以看出先数字平均再平滑处理后,非事件点处的一阶导数几乎为零,而事件点处的一阶导数值较大,能很明显地定位反射事件点。

因为实际光缆的损耗是有一定范围的,根据注入光功率及光纤距离可以得到未发生反射事件点时的功率值,将平滑后的数据进行区域分割,从光纤头端事件点的终端开始到终端事件点的这段区域内,根据反射事件的个数进行分段,统计每段数据幅度的最大值和平均值,从而设定幅度阈值。形成以一阶导数阈值为,幅度阈值为辅的双重阈值,减少误判率。

表 1 实际值与两种方法测量值的对比

Table 1 Comparison of actual value and measured values of two methods

Resolution	Actual value	Value of proposed method	Value of two point method
0.1	20	20	19.8
0.5	60	59.5	58.5
1	20	19	18

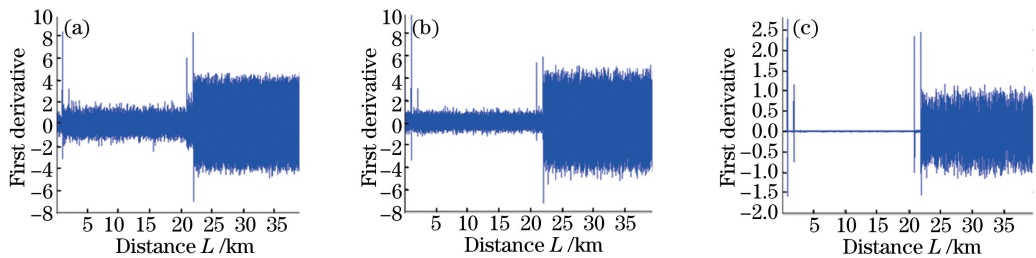


图 11 一阶导数。(a)原始数据;(b)数字平均 100 次;(c)三角平滑

Fig. 11 First derivative. (a) Original data; (b) digital average time is 100; (c) triangular smooth

反射事件点的实际值与测量值结果如表 2 所示,所提出的 OTDR 系统和定位算法对反射事件定位误差不超过 2 m,在不引入复杂算法并有效提高信噪比、增加动态范围的同时,达到了一个较为理想的定位结果。

表 2 实际值与测量值的对比

Table 2 Comparison of actual value and measured value

Reflection event	Actual value	Measured value
First reflection event	1013	1011
Second reflection event	20973	20971
End of fiber	21987	21986

4.3 与小波变换的比较

图 12 为使用相同预处理后的数据进行小波变换得到的结果,选用 Harr 小波基,进行 4 层分解,分解到第 4 层时,光纤接头和尾端的反射事件与非事件点区分明显,便于阈值设定。与本方法进行对比可知,两者对反射事件点起始位置定位相差不超过 1 m。小波变换虽然具有自适应的时频分析的能力,但其尺度的选取仍然是事件定位中难以权衡的重要因素,本方法定位误差小,且没有引入复杂算法,不存在选取权衡的问题。

5 结论

本文设计并研制了一款基于 LabVIEW 的 OTDR,并采用 1625 nm 的激光波长实现对光纤的在线实时监测。针对 OTDR 反射事件提出一种最佳平滑降噪算法,即采用三角加权平滑,平滑宽度约为事件点数的

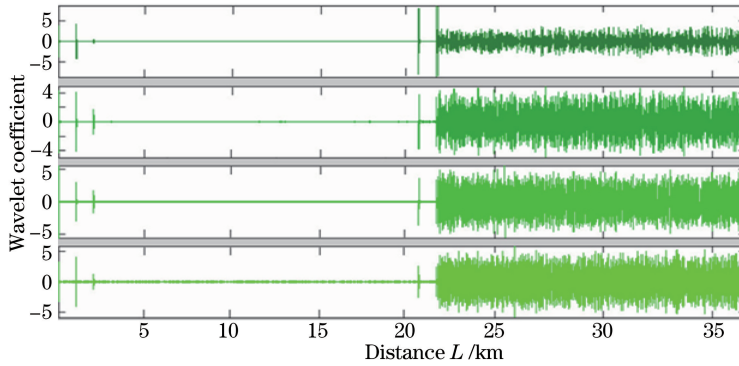


图 12 对数字平均后的数据进行小波变换的结果

Fig. 12 Results of processing the data after digital average with wavelet transform

四分之一,在不引入复杂算法下增加了动态范围,更有效地降噪。在两点法上进行优化,降低定位误差,采用导数阈值与幅度阈值相结合的方法,降低误判率。将该算法实际应用于不同脉冲宽度、不同长度待测光纤,经过测试表明,该算法能有效提高信噪比,增加动态范围,定位准确且运算量小,结果显示该算法具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Rad M M, Fouli K, Fathallah H A, *et al.* Passive optical network monitoring: challenges and requirements[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(2): S45-S52.
- [2] Liu Chunlong, Li Hongcai, He Zhenxin, *et al.* Design of fiber Bragg grating automatic analysis test system based on LabVIEW[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(2): 0206002.
刘春桐, 李洪才, 何祯鑫, 等. 基于 LabVIEW 的光纤光栅自动检测及分析系统[J]. 光子学报, 2016, 45(2): 0206002.
- [3] Liu F L, Zarowski C J. Detection and estimation of connection splice events in fiber optics given noisy OTDR data - Part I: GSR/MDL method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2001, 50(1): 47-58.
- [4] Liu F, Zarowski C J. Detection and location of connection splice events in fiber optics given noisy OTDR data - Part II: R1MSDE method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2004, 53(2): 546-556.
- [5] Man X, Yi D, Hao H, *et al.* Analysis of connection splice events in OTDR data using short Fourier transform method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 2121-2125.
- [6] Ma C, Kong H, Zhou Q, *et al.* Events detection in OTDR data based on a method combining correlation matching with STFT[C]. Asia Communications and Photonics Conference 2014, 2014: ATh3A.148.
- [7] Yi Shuihan, Yu Jiekui, Luo Qing. Design and research of self-adaptive detecting algorithm for OTDR non-reflective event[J]. Optical Communication Technology, 2014, 38(9): 59-61.
易水寒, 喻杰奎, 罗清. OTDR 非反射事件自适应检测算法设计与研究[J]. 光通信技术, 2014, 38(9): 59-61.
- [8] Fang Yinglan, Liu Sheng, Shen Chengyin, *et al.* Signal demodulation method of phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2015, 32(1): 123-128.
方英兰, 刘升, 沈成银, 等. 相位敏感 OTDR 系统的信号解调方法[J]. 量子电子学报, 2015, 32(1): 123-128.
- [9] Blanchard P, Zongo P H, Facq P. Accurate reflectance and optical fibre backscatter parameter measurements using an OTDR[J]. Electronics Letters, 1990, 26(25): 2060-2062.
- [10] Kong Heng. Research on events analysis algorithms in optical time domain reflectometry [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
孔衡. 光时域反射的事件分析算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [11] Sun Yi, Zhao Tai, Hou Sizhu. Experiment of optical fiber monitoring system based on OTDR[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(5): 78-81.
孙毅, 赵泰, 侯思祖. 基于 OTDR 的光纤在线监测系统实验研究[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(5): 78-81.
- [12] 强冰. 高速光时域反射仪的研制[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.

- [13] Jones M D. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(7): 822-824.
- [14] Friedlander B, Porat B. Detection of transient signals by the Gabor representation[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing, 1989, 37(2): 169-180.
- [15] Pei Yixuan, Guo Min. The fundamental principle and application of sliding average method[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2001(1): 21-23.
裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001(1): 21-23.
- [16] Fan Chengcheng, Wang Mi, Yang Bo, *et al.* A method of high-precision ground processing for star sensor and gyro combination and accuracy verification[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1128002.
范城城, 王密, 杨博, 等. 一种星敏感器/陀螺地面高精度组合定姿与精度验证方法[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1128002.
- [17] O'Haver T C. A pragmatic introduction to signal processing[J]. Compton, 2014: 65-88.
- [18] Liu Rang, Wang Dejiang, Jia Ping, *et al.* Overview on small target detection technology in infrared image[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050004.
刘让, 王德江, 贾平, 等. 红外图像弱小目标探测技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 050004.