

光纤传感信号的单峰和多峰分离算法

高慧敏¹, 张志利¹, 马晓明¹, 朱海强², 赵丰²

(1. 天津中德应用技术大学 智能制造学院, 天津 300350; 2. 天津理工大学 电气电子工程学院, 天津 300384)

摘要: 光纤传感系统在复杂的实际应用中需要针对同一根光纤上的相邻的多个扰动点进行精确的识别定位。基于传感技术对外部扰动识别的背景, 结合光纤传感系统的结构, 得到光纤传感信号的振动和非振动区域典型曲线, 提出单峰信号的误差累计值算法; 在多峰信号特点的基础上, 结合高斯方程及洛伦兹方程得到多峰信号的分离算法。实验结果表明: 单峰信号的误差累计值算法能同时兼顾识别干扰位置准确性及系统的实时性, 多峰信号的分离算法能分离 2 个独立的干扰信号并提取方程, 该方案能有效提高信号峰重叠较多或者其它信号干扰时的识别准确率。

关键词: 光纤传感信号; 误差累计值算法; 多峰分离算法; 光时域检测技术; 扰动识别

中图分类号: TN256 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2021)07-0048-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.07.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Single peak and multi peak separation algorithm of optical fiber sensing signal

GAO Huimin¹, ZHANG Zhili¹, MA Xiaoming¹, ZHU Haiqiang², ZHAO Feng²

(1. Intelligent Manufacturing College, Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: In the complex practical application of optical fiber sensing system, it is necessary to accurately identify and locate the adjacent multiple disturbance points on the same optical fiber. Based on the background of external disturbance identification of sensing technology, combined with the structure of optical fiber sensing system, the typical curves of vibration and non vibration regions of optical fiber sensing signal are obtained, and the error cumulative value algorithm of single peak signal is proposed. On the basis of the characteristics of multi peak signal, the separation algorithm of multi peak signal is obtained by combining Gauss equation and Lorentz equation. The experimental results show that the algorithm of error cumulative value of single peak signal can simultaneously recognize the accuracy of interference location and the real-time performance of the system, and the separation algorithm of multi peak signal can separate two independent interference signals and extract the equation. This scheme can effectively improve the recognition accuracy when the signal peaks overlap more or other signals interfere.

Key words: optical fiber sensing signal; error accumulation algorithm; multi peak separation algorithm; optical time domain detection technology; disturbance identification

0 引言

光纤传感技术因其灵敏度高、抗电磁干扰和适用

收稿日期: 2020-09-30。

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2018KJ256)资助; 天津市科技计划项目技术创新引导专项优秀科技特派员项目(19JCTPJC42100)资助; 天津市科技计划军民融合科技重大科技专项(19ZXJRGX00060)资助。

作者简介: 高慧敏(1988—), 女, 山东淄博人, 博士, 天津中德应用技术大学智能制造学院教师, 毕业于天津大学精密仪器与光电子工程学院仪器科学与技术专业, 主要从事光学自由曲面的检测、光纤传感信号分析和先进控制系统研究, 参与了多项国家级、省部级课题工作。



于长距离检测等特点, 被广泛运用于军事设施、机场、电站和石油管道等基础设施的干扰监测中。在国内外, 许多科研机构对该技术进行了深入研究, 并初步实现了针对外部扰动的识别与报警工作。

2013 年, 安阳等人^[1]提出了一种改进的平均-差值算法对光纤中的振动点进行定位, 其核心思想是使用基于间隔参数的移动平均算法滤除了原始散射曲线中的随机噪声, 然后通过对平均曲线进行累加差值算法提取光强变化对应的位置信息, 但该算法只针对时域信号进行处理, 识别精度通常较低。2014 年, 郑印等人^[2]提出了一种时间域单点振动和空间域相邻点振动

相结合的判定方法,并通过自适应阈值处理实现了针对扰动点的精确定位。2016年,梁生等人^[3]提出了空间域差分的定位方法,分别设定时域和空间域差分判断阈值,通过在空间域对探测光强进行差分,与空间域阈值进行比较判断,实现了定位的功能,有效地解决漏报的问题。2017年,董百合等人^[4]针对高频分量提出小波高频分量定位算法,该算法需要对每个扰动点的信号进行分解,虽然在实际应用中能够实现定位的功能,且精度较高,但是运算量太大,难以实现实时识别外部扰动。同年,施羿等人^[5]提出了一种扰动区间分离方法,将扰动产生的震动波在频域内进行区分,实现了定位及识别功能。2018年,刘树君等人^[6]在小波高频分量定位算法的基础上使用了一种改进的平均与差分算法,并将其与雷达目标检测领域的单元平均恒虚警(CA-CFAR)检测算法相结合,对光纤中的扰动点进行定位,具有较高的信噪比和实时性。2019年,吴亚男等人^[7]提出了一种基于退火的小波阈值去噪算法,并结合二维边缘检测算法实现了对光纤多个扰动点的定位和远距离扰动的精确定位。2020年,HE Q等人^[8]针对振动中的非高斯振动,提出了非高斯累计量算法(HOC)用于分析相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)中的振动信号,该过程会引起光强度波动、热噪声和散粒噪声,其行为与高斯分布相同。

目前的研究内容主要适用于实验室的理想条件中,且多为对光纤上的单个扰动点进行精确识别。为此,针对实际应用中的复杂情况,本文提出单峰信号的误差累计值算法和多峰信号的分离算法。

1 光纤传感系统及信号分析

Φ -OTDR 分布式光纤传感技术以窄线宽激光器为光源,通过脉冲宽度内后向瑞利散射光的干涉现象探测干涉光强的变化。光纤传感系统的结构图如图1所示。激光通过声光调制器及函数发生器的作用变为光脉冲,通过掺铒放大器(EDFA)将信号增强,再经耦合器在光纤传播。传播过程中光脉冲与光纤中的微粒

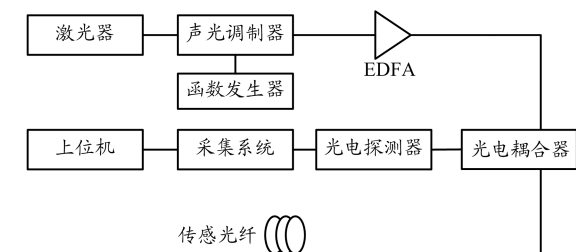


图1 光纤传感系统的结构图

发生瑞利散射,散射光经过光电探测器接收,在上位机进行数据采集和信号处理。

干扰信号必然会引起周围环境的振动,瑞利散射光的光强会随着干扰信号变化。本文在相邻的300点采集连续20帧的数据,数据采集频率为2000 Hz,得到的光纤传感器检测的典型信号曲线图如图2所示。数据曲线的横坐标为光纤位置点,对应光纤传感器在空间的位置,相邻两点的空间分辨率为0.4 m;纵坐标为光纤传感器测得的不同空间位置的接收端检测到散射返回的光功率相对值。本文中的数据均经过滤波处理,这有助于滤除噪声信号,便于算法分析传感器采集的特征信号。

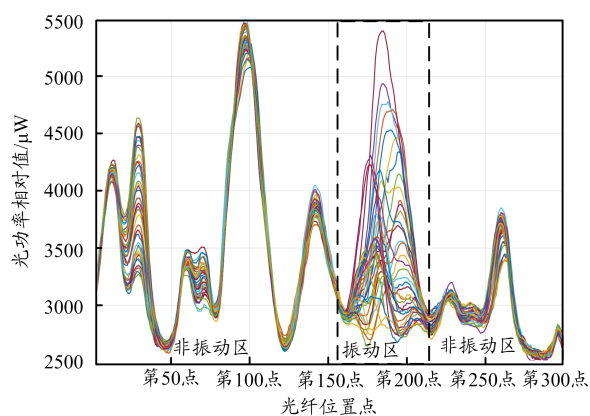


图2 Φ -OTDR 检测到的振动和非振动区域典型曲线

由图2可知,振动区为光纤位置第160点~第210点区域,非振动区为光纤位置0点~第160点、第220点~第300点。振动区比非振动区的变化幅度明显,其中非振动区域存在缓慢的变化趋势,而振动区域则会产生较大的幅度变化。

2 单峰信号的误差累计值算法

为了同时兼顾计算效率和测量精度,本文采取光纤位置点在1 s内的光功率相对值与平均值的误差累计值算法分析振动位置,如式(1)所示。

$$y(i) = \sum_{j=1}^N \text{abs} \left(x(i,j) - \frac{\sum_{j=1}^N x(i,j)}{N} \right) \quad (1)$$

其中, i 为光纤位置点, j 为随时间变化的数据帧数, $x(i,j)$ 为光纤传感器在 j 时刻 i 位置点的光功率相对值, $y(i)$ 为分析时间内光纤位置光功率相对值与平均值的误差累计值, N 表示每秒的帧数。光纤传感器的采样频率为2000帧,因此1 s内的误差累计值算法中, N 取值为2000。

本文采用误差累计值算法分析光纤传感系统在 1 s 内的信号如图 3 所示,图中红色竖线为峰值高度及位置,橘色横线为半峰处峰的全宽。通过算法处理后,该光纤空间采样点的干扰峰值的空间点为第 183 点,光功率偏差累计值为 $1.59\times10^6\ \mu\text{W}$,干扰峰在该时间段的光纤位置点范围为第 162 点~第 212 点。本文采用信号的误差累计值算法,可以综合干扰信号的频率和振动幅值,更容易区分干扰位置。本实验的历史数据也可以在提高识别干扰位置准确性的前提下,保证系统的实时性。当光纤传感器同时接收多个干扰信号时,干扰信号之间距离较近会产生重叠效应,因此需要通过多峰信号的分离算法得到多个干扰信号的峰值高度和峰值在光纤处的位置点。

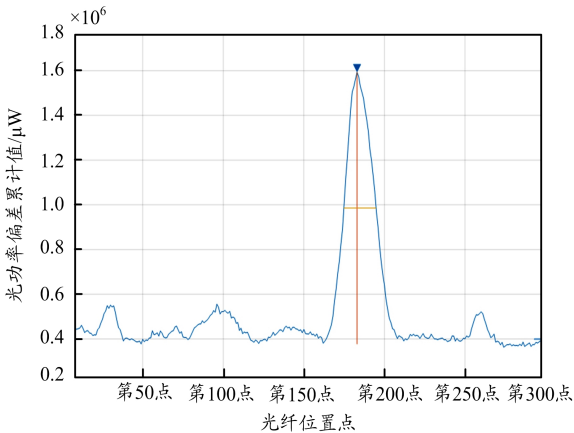


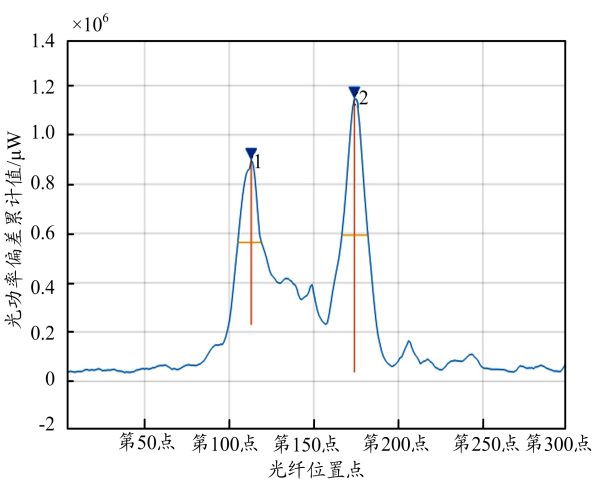
图 3 单峰振动区域的误差累计值算法峰值分析

3 多峰信号的分离算法

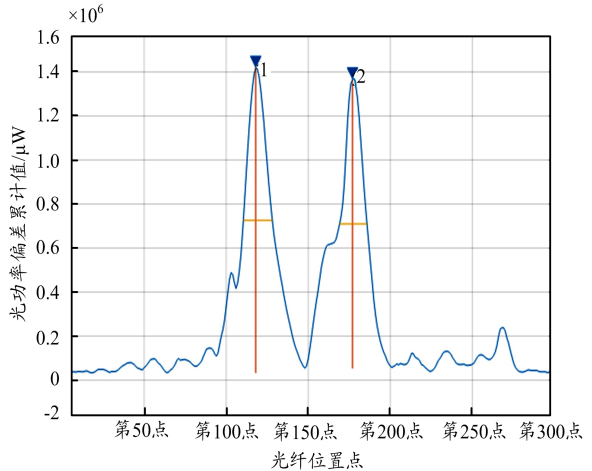
3.1 多峰信号的特点

为了分析多峰信号的特点,本文在光纤传感器的光纤上间隔相同距离分别进行独立干扰,系统记录连续 8 s 的信号,将每秒内的光纤传感器采集的数据进行单峰信号的误差累计值算法处理。光纤传感器在多个干扰信号作用下,通过误差累计值算法得到在第 1 s 和第 4 s 时刻的曲线结果如图 4 所示。图中 1 和 2 分别表示干扰位置 1 和干扰位置 2,红色竖线为峰值高度及位置,橘色横线为峰值半高度处的横坐标宽度。

第一个干扰位置和第二个干扰位置每个时刻的信号位置点情况如表 1 所示。2 个干扰位置点的平均距离为 58.5 个位置点,均方差为 2.12。结合图 4(a)可知,当峰值重叠较多或者有其它信号干扰时,会明显影响干扰峰的光纤位置点精度。表 1 中,第 1 s 时刻光纤位置差与平均值相差较大。结合图 4(b)和表 1 的第



(a) 双干扰信号在第 1 s 时刻的误差累计值算法曲线



(b) 双干扰信号在第 4 s 时刻的误差累计值算法曲线

图 4 多峰区域的误差累计值算法峰值分析

表 1 多峰信号的峰值的光纤位置点分析

项目名称	干扰位置 1 峰值 的光纤位置点	干扰位置 2 峰值 的光纤位置点	光纤位置差/ 个位置点
第 1 s 时刻	第 113 点	第 174 点	61
第 2 s 时刻	第 120 点	第 175 点	55
第 3 s 时刻	第 119 点	第 176 点	57
第 4 s 时刻	第 118 点	第 177 点	59
第 5 s 时刻	第 114 点	第 175 点	61
第 6 s 时刻	第 117 点	第 177 点	60
第 7 s 时刻	第 118 点	第 177 点	59
第 8 s 时刻	第 119 点	第 175 点	56
平均值	第 117.25 点	第 175.75 点	58.5
均方差	—	—	2.12

4 s 时刻可知, 当信号峰重叠较小时, 光纤位置差与平均值较为接近。为更加精确定位多个干扰信号, 同时作用于光纤传感器的位置, 本文需要计算多个峰的真实位置, 由此提出基于高斯方程或洛伦兹方程的多峰信号分离算法。

3.2 高斯和洛伦兹峰分离算法

由于光纤传感器测量的信号含有噪声, 且相邻干扰信号会产生重叠, 为了测量峰值的位置、高度和宽度等物理量, 在分离算法中需要选择峰值的位置和宽度为线性关系的函数, 因此本文结合待拟合的曲线的形状, 选择如高斯方程、洛伦兹方程等简单峰值形状作为模型。高斯峰的方程如式(2)所示。

$$y = h_1 \times e^{-\frac{4\ln 2(x-p_1)^2}{w^2}} \quad (2)$$

其中, x 和 y 为数据的横纵坐标值, h_1 为高斯峰高, p_1 为高斯峰最大值的 x 轴位置, w 为高斯半峰处峰宽度。

由 Caruana 算法可知, 高斯方程或洛伦兹方程的参数可以通过曲线的特征求得。洛伦兹方程如式(3)所示。

$$y = \frac{h_2}{1 + \left[\frac{x-p_2}{0.5w} \right]^2} \quad (3)$$

其中, h_2 为洛伦兹峰高, p_2 为洛伦兹峰最大值的 x 轴位置。

光纤传感信号存在多个高斯峰或洛伦兹峰时, 通过峰值分离算法可以区分各个单峰及分别提取单个峰值的参数。峰值分离算法需要先选取各个峰值最高点附近的数据点预测高斯峰或洛伦兹峰的信号参数, 为了减少信号噪声干扰, 一般选取数据点位于纵轴值大于峰值的一半处。

多峰信号分离算法的流程图如图 5 所示。数据先经过滤波的预处理, 根据采样信号的斜率变化趋势、给定阈值确定信号的局部最高值个数 N_p 以及该局部最高点的横轴位置 p 、高度 h 和半峰处峰宽度 w 。从第一个极大值点到最后一个极大值点依次进行计算。第一个极大值点附近采用的数据起始位置横坐标为 p_1-w_1 , 终止位置的横坐标为 p_2 ; 从第二个至倒数第二个极大值点的第 i 个极大值附近采用的数据起始位置横坐标为 p_{i-1} , 终止位置的横坐标为 p_{i+1} ; 最后一个极大值点附近采用的数据起始位置横坐标为 p_{N_p-1} , 终止位置的横坐标为 $p_{N_p}+w_{N_p}$ 。将起始位置到终止位置的数据进行高斯拟合或洛伦兹拟合, 分别计算出各自的峰值横轴位置 p 、高度 h 和半峰处峰宽度 w 。各个峰值依次计算后, 将得到的分析结果, 即峰值横轴位置 p 、高度 h 和

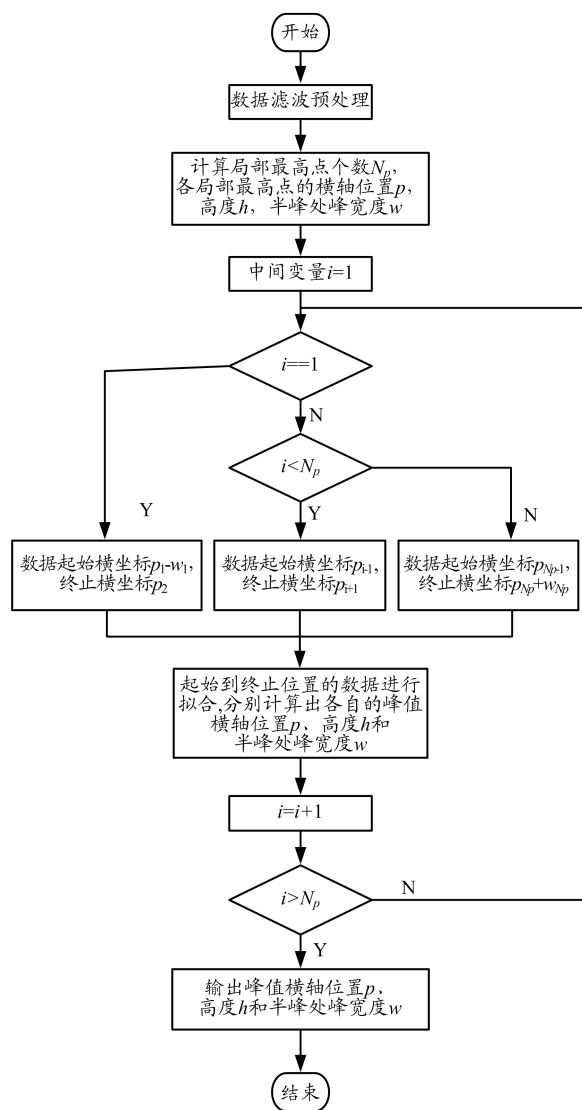


图 5 多峰分离算法的流程图

半峰处峰宽度 w 输出。

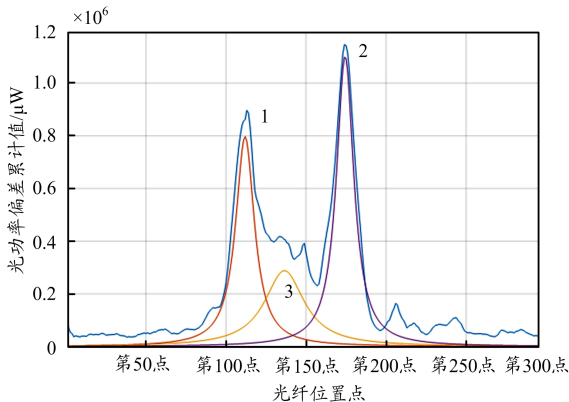
上述测量高斯或洛伦兹峰的高度、位置和宽度的算法中, 信号的噪声及拟合时的采样点数会影响结果的误差。一般来说, 峰值的位置测量最精确, 峰的宽度次之, 峰的精确度最低。若已知拟合峰的形状, 则直接采用拟合峰的函数公式进行计算。光纤传感器测得的信号往往不知道峰值的形状, 需要尝试不同的信号方程。本次实验中, 本文选取一个典型的良好信噪比的单峰进行方程拟合, 洛伦兹函数所造成的拟合误差小于高斯函数, 因此仿真中采用洛伦兹方程进行多峰分离。然而, 在不同的干扰信号输入下, 可以考虑采用不同的峰值模型进行多峰分离, 确保分离算法的稳定性和精确性。

3.3 多峰信号的分离算法的仿真

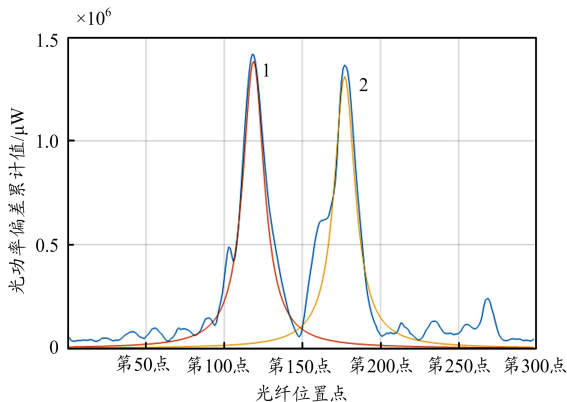
本文将 3.1 节中的测量数据通过洛伦兹峰方程进

高慧敏,张志利,马晓明,等:光纤传感信号的单峰和多峰分离算法

行多峰分离,光纤传感器在干扰信号作用下得到在第 1 s 和第 4 s 时刻的曲线结果如图 6 所示。图中 1 和 2 分别表示干扰位置 1 和干扰位置 2,蓝色线为原始数据,红色、黄色和紫色线为分离后的图形;同时,将 8 s 内干扰位置 1 和干扰位置 2 的信号位置经多峰分离算法后的计算结果如表 2 所示,2 个干扰位置点的平均距离为 58.49 个位置点,均方差为 0.91。与表 1 对比可知,虽然平均距离的结果相差不大,但是均方差降低了 57%。



(a) 双干扰信号在第 1 s 时刻的分离算法曲线



(b) 双干扰信号在第 4 s 时刻的分离算法曲线

图 6 多峰区域的分离算法峰值分析

结合图 6(a)和表 2 的第 1 s 时刻可知,当峰值重叠较多或者有其它信号干扰时,多峰分离算法可以提取干扰信号,并较好地分离信号峰重叠位置,光纤位置差与平均值的误差变小;结合图 6(b)和表 2 的第 4 s 时刻可知,当信号峰重叠较小时,光纤位置差也可以通过算法精确地分离峰值,并得到相关参数。例如:图 6 (b) 中峰值 1 的洛伦兹方程横轴位置为第 118.7 点,高度为 $1.43 \times 10^6 \mu\text{W}$,半峰宽度为 16.21 位置点;峰

值 2 的洛伦兹方程横轴位置为第 177.01 点,高度为 $1.34 \times 10^6 \mu\text{W}$,半峰宽度为 17.1 位置点。

表 2 多峰信号的峰值经过分离算法后的光纤位置点分析

项目名称	干扰位置 1 峰值 的光纤位置点	干扰位置 2 峰值 的光纤位置点	光纤位置差/ 个位置差
第 1 s 时刻	第 113.78 点	第 173.41 点	59.63
第 2 s 时刻	第 119.33 点	第 176.6 点	57.27
第 3 s 时刻	第 118.69 点	第 176.2 点	57.51
第 4 s 时刻	第 118.7 点	第 177.01 点	58.31
第 5 s 时刻	第 114.46 点	第 174.24 点	59.78
第 6 s 时刻	第 117.4 点	第 176.72 点	59.32
第 7 s 时刻	第 117.63 点	第 175.93 点	58.3
第 8 s 时刻	第 117.74 点	第 175.55 点	57.81
平均值	第 117.22 点	第 175.71 点	58.49
均方差	—	—	0.91

4 结束语

针对光纤传感器信号特点,本文采用单峰信号的误差累计值算法提取干扰位置,并提出了多信号干扰时的多峰信号分离算法。研究表明:所提算法可以通过高斯方程或洛伦兹方程将多个干扰分离并提取,并将误差定位的均方差降低了 57%。若干扰信号的对称性较差时,则可以考虑采用其它函数形式进行分离。

参考文献:

- [1] 安阳. 双光束 Φ -OTDR 分布式光纤传感技术与应用[D]. 天津:天津大学精仪器与光电子工程学院,2013.
- [2] 郑印. 相位敏感光时域反射计识别入侵事件算法研究[D]. 天津:天津大学精仪器与光电子工程学院,2014.
- [3] 梁生,刘腾飞,盛新志. 基于空间域差分的 Φ -OTDR 光纤分布式扰动传感器定位方法研究[J]. 红外与激光工程,2016(6):253-257.
- [4] 董百合,江飞,邢冀川. Φ -OTDR 光纤预警系统的周界安防入侵定位[J]. 光学技术,2017,43(5):473-477.
- [5] 施羿. 提升 Φ -OTDR 探测性能的关键技术研究[D]. 天津:天津大学精仪器与光电子工程学院,2017.
- [6] 刘树君. 光纤预警系统的定位识别技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学信息与电气工程学院,2018.
- [7] 吴亚男. 基于 Φ -OTDR 的分布式扰动传感系统定位算法研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- [8] HE Q, LIU R, WANG Z, et al. The detection of non-Gaussian vibration with improved sensing performance in Φ -OTDR[J]. Optics Communications, 2020, 475: 126-215.