

文章编号 1004-924X(2025)12-1842-11

基于虚拟噪声电平的分布式光纤振动 传感系统性能优化

王子豪, 冯玉祥, 刘志凯, 吕立冬*

(安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 分布式光纤振动传感系统通常采用相对强度比值法进行事件识别和定位, 该算法忽略了噪声电平对系统动态范围的影响, 从而制约系统定位精度和动态范围的提升。本文研究在保证系统定位精度条件下噪声电平的大小与系统动态范围的关系, 在光时域反射信号中加入与信号近零幅值均值电压相关的虚拟噪声电平, 提出一种基于虚拟噪声电平的系统性能优化算法。实验搭建了相位敏感光时域反射系统, 采用 50 ns 的激光脉冲, 在长约 15 km 的被测光纤上进行振动事件定位测试, 基于虚拟噪声电平优化算法, 将原始的光时域反射数据减去噪声电平, 再分别加入幅值为信号近零幅值均值的 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175% 和 200% 的虚拟噪声电平, 最终确定系统动态范围和振动信号信噪比总体最优时的虚拟噪声电平, 即噪声电平的幅值约为信号近零幅值均值的 75%, 与传统的相对强度比值法比较, 系统的动态范围提升了 11.26 dB, 虚拟噪声电平的引入通过降低幅值近零位置的灵敏度从而提升系统的性能。

关键词: 分布式光纤传感; 光时域反射; 振动监测; 动态范围; 虚拟噪声

中图分类号: TP212.9; TN212 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253312.1842 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253312.1842

Performance optimization of distributed optical fiber vibration sensing system based on virtual noise level

WANG Zihao, FENG Yuxiang, LIU Zhikai, LYU Lidong*

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology,
Ma'anshan 243032, China)

* Corresponding author, E-mail: lvlidong@ahut.edu.cn

Abstract: The distributed optical fiber vibration sensing system usually uses the relative intensity ratio method to identify and locate the vibration event, which ignores the influence of noise level on the system dynamic range, thus restricting the improvement of the event location accuracy and dynamic range. In this paper, the relationship between the noise level and the dynamic range of the system was studied under the condition that the event-location accuracy of the system was ensured. A virtual noise level that corresponded to the average voltage of the near-zero amplitudes in the optical-time-domain-reflectometry signal was then added, and a performance-optimization algorithm based on this virtual noise level was proposed. In the experiment, a phase-sensitive optical-time-domain-reflectometry system was built, and a laser pulse with a pulse width of 50 ns was used to conduct vibration-event-location testing along a sensing fiber ap-

收稿日期: 2025-02-21; 修订日期: 2025-03-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51977001)

proximately 15 km long. By applying the optimization algorithm with the virtual noise level, the noise level was removed from the original optical-time-domain-reflecting data. Subsequently, virtual noise levels with amplitudes of 25 %, 50 %, 75 %, 100 %, 125 %, 150 %, 175 % and 200 % of the mean value of the near-zero amplitude of the signal were respectively added, in order to determine the virtual noise level that ensured the system dynamic range and the signal-to-noise ratio of the vibration signal were overall optimal. The amplitude of this optimal virtual noise level was found to be about 75 % of the mean value of the near-zero amplitude of the signal. Consequently, the dynamic range of the system was improved by 11.26 dB compared with the traditional relative-intensity-ratio method, demonstrating that the adoption of the virtual noise level improved system performance by reducing the sensitivity of the near-zero amplitude.

Key words: distributed optic fiber sensing; optical time domain reflectometry; vibration monitoring; dynamic range; virtual noise

1 引言

分布式光纤振动传感系统常用相位敏感型光时域反射仪(Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometer, Φ -OTDR)进行振动事件探测, Φ -OTDR系统最早由 Taylor 和 Lee 于 1993 年提出^[1],该传感器具有灵敏度高、传感距离长、响应速度快、抗电磁干扰能力强等优点^[2-5]。 Φ -OTDR使用的是高相干的窄线宽激光器以增强背向瑞利散射光之间的干涉效应,从而提高光学相位对振动事件的敏感性,使系统具备监测微小振动和声波等微弱信号的能力^[6]。当光纤受到外界因素的影响时,如振动或应变,会导致光纤的折射率和长度发生变化,进而引起瑞利散射光的相位变化,通过解调这种相位变化,可以获得外界扰动的相关信息^[7-9]。目前, Φ -OTDR在海底电缆监测^[10]、建筑健康结构监测^[11]、油气管道泄漏监测^[12]以及安防入侵报警^[13]等有广泛应用。

Φ -OTDR系统中光电探测器的散粒噪声直接影响测量动态范围^[14-15]。在 Φ -OTDR系统中,光电探测器的噪声^[16-17]如热噪声、散粒噪声、暗电流等影响系统的动态范围和事件定位能力^[18]。为提高 Φ -OTDR的系统性能,国内外许多研究者对其进行了深入探索与研究。通常采用逐差的方式消除光时域反射曲线数据中的噪声电平。2009年李建中等人在 Φ -OTDR和POTDR相结合的系统通过将连续采集的光时域反射数据曲线间隔相减,再与前一条光时

域反射数据曲线相除,从而避免因光纤衰减导致沿线各位置散射功率的差异对系统性能的影响,传感系统在14 km处获得较高信噪比的扰动信号^[19]。2014年Peng Fei等人通过使用归一化滑动方差法,在10.2 km的被测光纤上实时获取相邻两列列车的运行状态,包括列车的实时位置和行驶速度^[20]。2019年Islam Ashry等人提出了归一化微分法,该方法通过对采集的连续光时域反射数据进行归一化微分处理来识别振动位置信息,对4 km光纤末端的振动信号采用归一化微分法后,系统的信噪比提升了1.7 dB^[21]。2022年Zhihua Yu等人提出了基于归一化最小均方(NLMS)算法的自适应预测滤波方法,该方法在1.43 km的光纤传感系统中将信噪比从8.14 dB提升至22.31 dB^[22]。2023年Sichen Li等人提出了基于深度学习的去噪卷积神经网络(DnCNN)图像去噪模型,在光纤41km的长距离检测范围内实现了约20 dB的信噪比提升^[23]。2024年Jingming Zhang等人提出了一种基于自适应块匹配和三维去噪(BM3D)的方法,通过将一维 Φ -OTDR信号转换为二维图像,利用时空相关性提高信号的信噪比。实验结果表明,该方法在80 km的光纤上实现了40.6 dB的SNR提升^[24]。虽然采用这种信号相对强度比值的方法来识别和定位振动事件具有较好的可靠性,但是,方法中将曲线差值与前一条光时域反射数据相除,完全忽略了光时域反射曲线数据中的噪声电平,从而制约系统动态范围的提升。由于 Φ -OTDR中通常采用声光调制器产生探测

光脉冲,虽然声光调制器具有极高的消光比,但依然存在泄露的连续光输出,该连续光成分进入被测光纤中形成散射光,然后被光电探测器转化成直流电,最终在时域光反射曲线中以噪声电平的形式出现。该噪声电平通常高于光电探测器本身的噪声底,从而可能极大地降低系统的动态范围。

本文研究 Φ -OTDR系统的噪声电平对系统定位精度和动态范围的影响,将原始的光时域反射数据曲线减去噪声电平,以使系统具有最大的动态范围,但对振动事件定位时,基于相对强度比值法,曲线中幅值近零位置会产生系统振动事件误报现象。为此,本文提出一种基于虚拟噪声电平的优化方法,在减去噪声电平的光时域反射数据中加入不同幅度的直流分量,也即虚拟噪声电平,确保在系统对振动事件不误报的情况下,系统的动态范围与振动事件信噪比能达到最佳的一致性,以确保系统在满足测量精度的前提下具有最大的动态范围。

2 系统搭建与信号采集

2.1 系统搭建

实验搭建的 Φ -OTDR系统如图1所示,窄线宽激光器(NLL-1550-1,武汉光迅)发出连续的探测光,进入到声光调制器(T-M200-0.1C2J-3-F2S, Gooch&Housego)中,计算机控制数据采集卡(USB9812A,北京星烁)发出电脉冲,来驱动声光调制器将连续光调制成光脉冲,光脉冲再经掺铒光纤放大器(BG-pulse-EDFA-M-20W-1550-FC/APC,厦门彼格)提升峰值功率后,再进入光纤环形器的1端口,然后从光纤环形器2端口输出到被测光纤(G.652,长飞光纤)中。光脉冲在被测光纤传输时,产生的背向瑞利散射信号光返回,并依次经光纤环形器的2、3端口,进入到光电探测器(BG-DASA-M1-1550-30-FC/APC,厦门彼格)。光电探测器将相应的背向瑞利散射光信号转换成电信号,数据采集卡采集该电信号,得到光时域反射信号数据,并传输给计算机进行数据处理和分析^[25]。

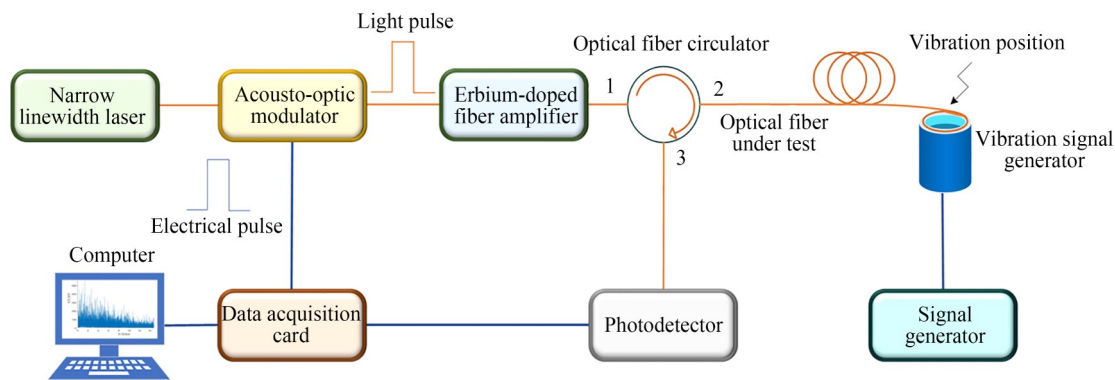


图1 系统结构图

Fig. 1 System structure diagram

实验系统采用的光电探测器的带宽为100 MHz,数据采集卡的采样率为100 Msps,数据采集卡具有累加功能,通过多次采集并平均来降低随机噪声,实验设置累加次数为100次,使信噪比提升为原来的10倍^[26]。窄线宽激光器输出波长为1 550.12 nm,线宽为1.6 kHz,光脉冲的脉冲宽度为50 ns、重复频率为6 kHz。实验采用长约15 km的单模光纤进行振动事件探测,将被测光纤末端约70 m长度的光纤缠绕在振动信号发生器上,使用信号发生器驱动振动信号发生器,由

振动信号发生器给被测光纤加载振动事件。

2.2 信号采集

将数据采集卡采集的 M 个连续周期的光时域反射数据转换为二维矩阵,用矩阵 R 来表示:

$$R = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_i \\ \vdots \\ r_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,k} & \cdots & r_{1,N} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,k} & \cdots & r_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{i,1} & r_{i,2} & \cdots & r_{i,k} & \cdots & r_{i,N} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{M,1} & r_{M,2} & \cdots & r_{M,k} & \cdots & r_{M,N} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中: r_i 表示采集到的第*i*条光时域反射数据曲线, M 表示共采集的光时域反射数据曲线的条数, k 表示被测光纤沿线的任意距离, N 表示被测光纤末端距离。实验加载的振动事件频率为 10 Hz,采集 100 条加载振动事件时的光时域反射数据曲线将 100 条加载振动事件时的光时域反射数据曲线叠加显示,如图 2 所示。由于系统中声光调制器存在消光比,即光脉冲的脉冲峰值功率与脉冲基底功率之间的落差。光脉冲基底经掺铒光纤放大器放大进入被测光纤中,光脉冲在被测光纤传输的时候不仅脉冲高功率部分在传输,而且脉冲基底也在光纤中传输,然后从被测光纤散射回来进入光电探测器,光电探测器采集该信号,从而产生噪声底。本文将光时域反射数据末端,端面反射峰后的数据取均值作为噪声底的值。从图 2 中可以看出系统的噪声底为 35.20 mV。

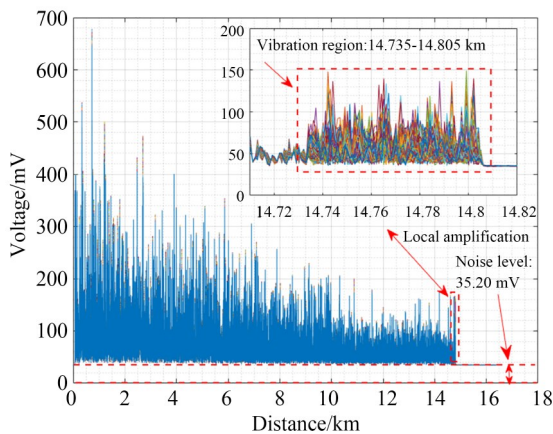


图 2 加载振动事件时的光时域反射曲线

Fig. 2 Optical time domain reflection traces when loaded with vibration event

从图 2 的局部放大子图可以看出,在光纤末端的 14.735~14.805 km 处,其光时域反射数据混乱度较高,这是本实验施加的振动区域。

3 相对强度比值法存在的问题

3.1 相对强度比值法

Φ -OTDR 系统通常采用相对强度比值法来识别和定位振动事件位置^[19-21],其公式如式(2):

$$\Delta r = \frac{r_{i+1} - r_i}{r_i}, \quad (2)$$

其中: r_i 表示采集的第*i*条光时域反射数据曲线, r_{i+1} 表示采集的第*i+1*条光时域反射数据曲线, Δr 表示比值后的数据曲线。该方法通过对同一位置上的相邻光时域反射数据进行相除,通过信号的相对波动幅度来判别和定位振动事件。被测光纤如果没有受到外界振动或噪声的影响,连续采集的光时域反射数据应基本一致,其比值接近 0。振动事件的定位采用阈值判别法,首先设置振动事件判别阈值,然后将相邻数据曲线基于式(2)的计算结果与设定阈值进行比较,如果计算结果大于设定的阈值,则认为光纤在该位置存在振动事件;如果计算结果小于或等于该阈值,则认为光纤在该位置没有振动事件。这种处理方式可以进一步降低误报率,提高系统的稳定性和可靠性。

实验采集 100 条施加振动信号的光时域反射数据曲线,经相对强度比值法处理,结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出被测光纤的末端,即施加振动的区域的比值较大,而没有施加振动的位置数据比值较低,振动区域外的最大信号幅值为 0.055,于是将其设置为振动事件判别阈值。从图 3 的局部放大子图中可以看出被测光纤在 14.735~14.805 km 范围的比值数据高于所设定的阈值,则判定光纤在该位置区发生了振动事件,这与实际加载的振动事件范围一致。

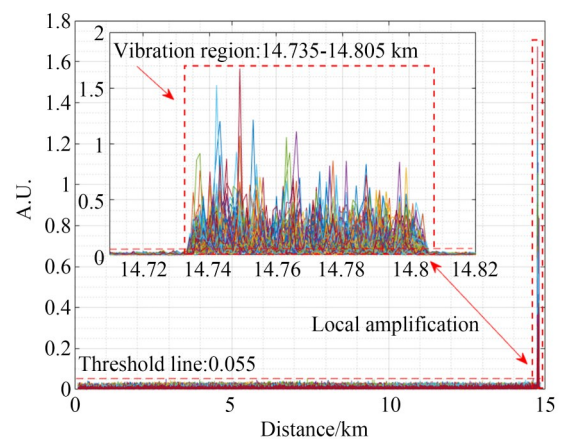


图 3 相对强度比值法后的 100 条曲线

Fig. 3 100 traces after the relative intensity ratio method

3.2 动态范围优化

动态范围是 Φ -OTDR 系统的一个重要参数,代表系统可有效测量的最大光纤长度^[27]。首先

将采集的光时域反射数据曲线通过公式 $D=10\lg r_i$ 转化为对数曲线。然后将对数曲线信号均值的最大值与噪声底相减,得到系统的动态范围,如图 4 所示。图 4 中,首先将实验采集的 100 条施加振动事件的光时域反射数据曲线进行取对数处理,然后,通过线性拟合得到理论的被测光纤的衰减曲线: $y=-0.178x-10.387$,从图中可见光纤的双程衰减系数为 -0.178 dB/km 。由于信号处理中没有减去噪声底,所以光纤的衰减系数比实际偏高,一般,对于单模光纤(G.652)其双程衰减系数约为 -0.400 dB/km 。另外,从图 4 可以看出系统的动态范围仅为 4.15 dB ,由于噪声底的存在,动态范围偏低。通常,在计算 Φ -OTDR 系统动态范围的时候,应首先减去光时域反射数据曲线中的噪声底,然后再将光时域反射数据曲线取对数,最后确定系统的动态范围。于是,将实验采集的光时域反射数据曲线减去噪声底,再进行对数变换,结果如图 5 所示。

图 5(a)为减去噪声底后的光时域反射数据曲线,其单位为 mV ,图 5(b)为图 5(a)的数据进

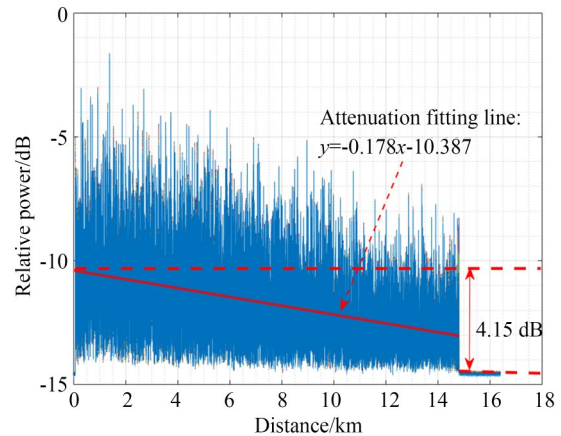


图 4 动态范围

Fig. 4 Dynamic range

行对数处理过后的光时域反射曲线,由于光电探测器转换系数及后续增益系数的线性作用,其单位通常取相对值, dB 。将图 5(b)中的光时域反射数据进行线性拟合,得到光纤的衰减拟合曲线: $y=-0.370x-13.256$,可以看到光纤的双程衰减系数为 -0.370 dB/km ,这与实际基本吻合。同时,系统的动态范围为 17.11 dB 。

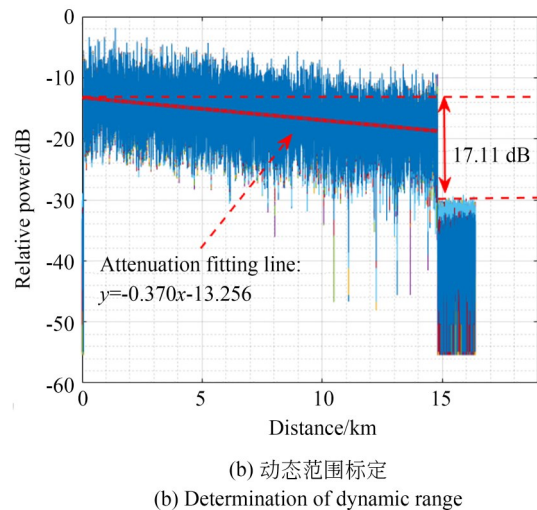
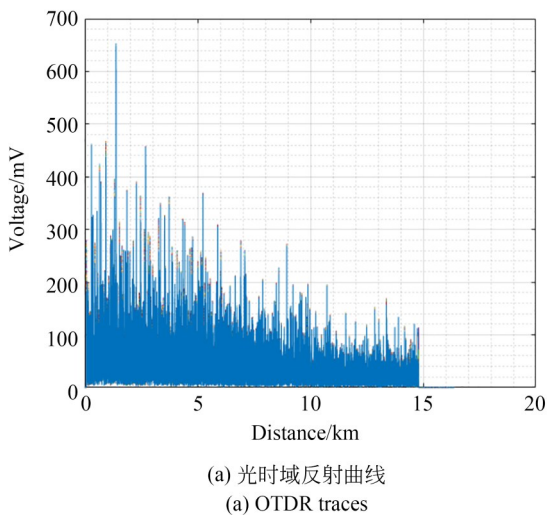


图 5 减去噪声底及对数变换求取动态范围过程图

Fig. 5 Process diagrams of obtaining the dynamic range by subtracting the noise level and logarithmic transformation

由于不同的光电探测器对应的噪声电平存在差异,因此研究噪声电平对 Φ -OTDR 系统在确保振动事件定位精度的前提下的动态范围的影响,对优化系统的性能具有重要意义。

3.3 系统误报问题分析

对减去噪声底的光时域反射数据,使用相对强度比值法进行振动事件定位,处理结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出在光纤末端加载振动事件的位置区前,存在几处比值幅度较高的数据,

其比值甚至超过了振动位置处的比值,这样使用阈值定位振动事件时将无法准确定位事件,导致系统在后续的振动事件监测中发生误报、漏报的情况。

4 基于虚拟噪声电平的系统性能优化

为探究这些比值较高数据产生的原因,在图 5(a)中,观察图 6 中几处比值较高的数据及其位置,图 7 为对应位置的局部放大图。从图 7 中可以看出这些位置的信号幅值均接近于 0,其中最低幅值为 $0.021\ 2\ \text{mV}$,这使得这些位置极易受噪声的影响,当使用相对强度比值法进行数据处理

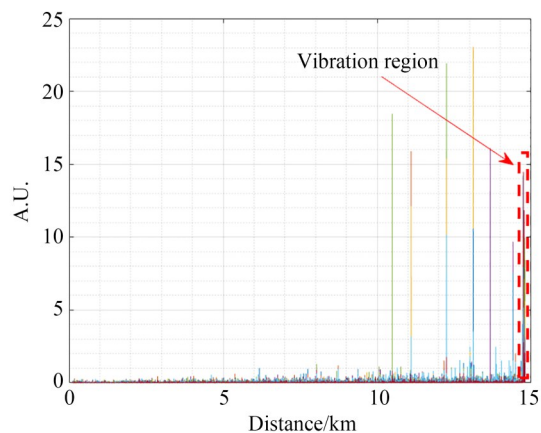
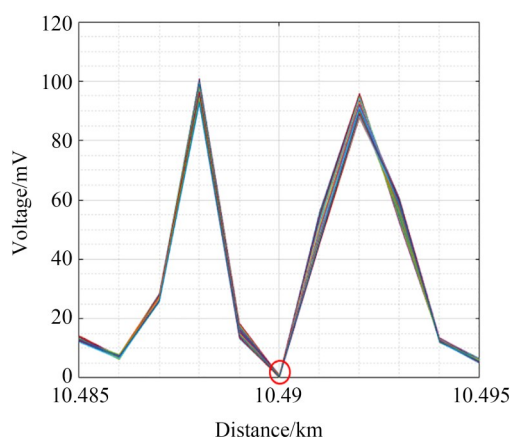
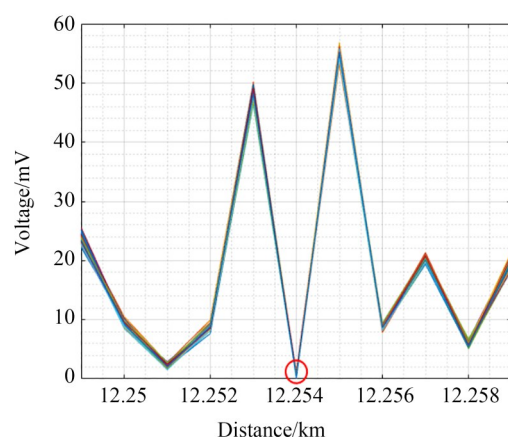


图 6 减去噪声底并使用相对强度比值法定位

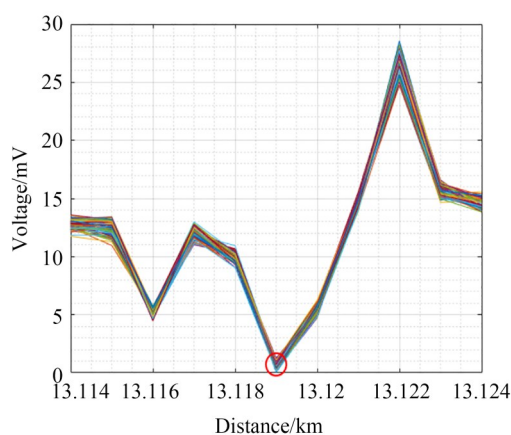
Fig. 6 Subtract the noise base and use the relative intensity ratio legal bit



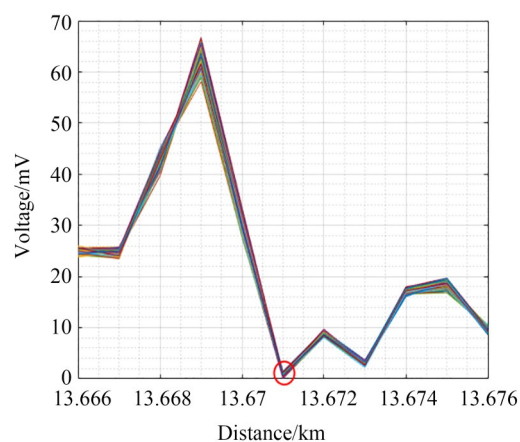
(a) 光纤 10.490 km 位置信号
(a) Fiber optic 10.490 km position signal



(b) 光纤 12.254 km 位置信号
(b) Fiber optic 12.254 km position signal



(c) 光纤 13.119 km 位置信号
(c) Fiber optic 13.119 km position signal



(d) 光纤 13.671 km 位置信号
(d) Fiber optic 13.671 km position signal

图 7 光时域反射数据曲线的局部放大

Fig. 7 Local magnification of optical time domain reflectometry data traces

时,这些位置的比值会异常地增高,进而影响系统对振动事件的准确定位。为消除这些幅值近零位置对系统定位精度的影响,通过在减去噪声底后的光时域反射数据曲线中引入虚拟噪声电平,来降低幅值近零位置的灵敏度,从而提高系统定位的准确性。通过观察与计算发现,图 7 中这些幅值近零位置的均值在 0.65 mV 左右。近零点均值电压的选取,先获取一组光时域反射曲线,再对该组数据取平均从而得到一条光时域反射曲线数据,再减去其噪声底,最后,求这条均值曲线在被测光纤有效区域内的最小值即可获得近零幅值的位置以及均值电压。

为优化系统性能,在光时域反射数据曲线中加入 0.65 mV 的虚拟噪声电平,然后,使用相对强度比值法进行数据处理,结果如图 8 所示。

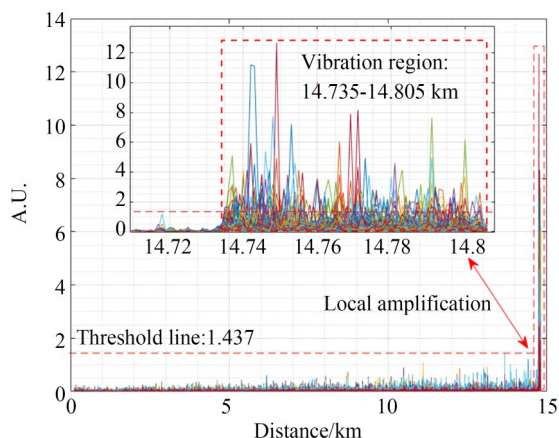


图 8 优化后相对强度比值法定位

Fig. 8 Improved relative intensity ratio method

从图 8 中可以看出原本几个比值数据较高的位置区,其比值数据均有了显著的降低。且振动区域的比值相较其他区域,其比值较其他区域的比值大得多,振动区域外最大的比值为 1.437,将此值设置为振动事件判断阈值。从图 8 的局部放大子图中可以看出,系统定位的振动区域与实验所施加的振动区域一致,说明加入虚拟噪声电平能有效降低系统误报情况。

加入虚拟噪声电平后系统动态范围如图 9 所示。从图 9 中可以看出光纤的衰减拟合曲线为: $y = -0.366x - 13.051$, 系统的动态范围为 15.01 dB, 其与图 5(b) 中不加虚拟噪声电平的动态范围相比虽然下降了 2.10 dB, 但系统能够准

确定位振动事件而后者存在误报, 且与图 4 的不减噪声底时的系统相比, 系统的动态范围提升了 10.86 dB。

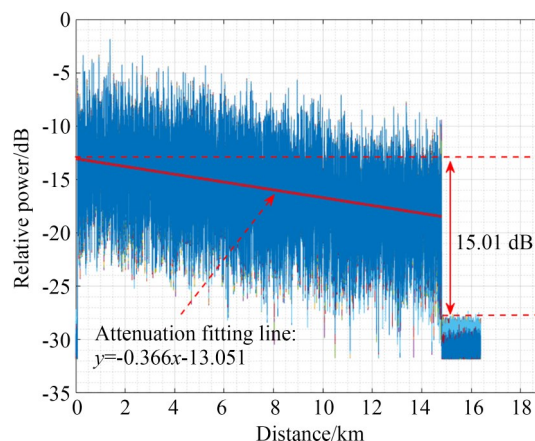


图 9 优化后系统的动态范围

Fig. 9 Dynamic range of the improved system

由上述可知, 如果不从光时域反射数据曲线中减去噪声底, 那么系统的动态范围将太低, 然而, 减去光时域反射数据曲线的噪声底后, 使用相对强度比值法进行振动事件定位时, 系统的定位准确性将受到严重影响。通过在减去噪声底的光时域反射数据曲线中加入虚拟噪声电平, 可减小信号幅值近零位置对系统定位振动事件的影响, 降低系统误报、漏报的情况。该方法虽然也会影响系统的动态范围, 但与不减噪声底时的情况相比, 其对系统动态范围的影响较小, 仅降低了 2.10 dB。但过大的噪声电平会过多地降低系统的动态范围; 而过小的噪声电平可能无法达到预期的改善效果, 使幅值近零位置区出现误报的情况。因此, 要确定合适的虚拟噪声电平, 同时保证系统具有较高的定位精度和较大的动态范围。

5 基于虚拟噪声电平的动态范围优化

本节将讨论在减去噪声底的光时域反射数据曲线中加入虚拟噪声电平的最佳值, 该噪声电平的大小是基于幅值近零位置均值的百分比来确定的, 搜寻在确保振动事件识别精度下的系统最大动态范围, 本文通过使用信噪比 (Signal-to-

Noise Ratio, SNR)来评价系统对振动事件的定位准确性,其值越大,代表系统对噪声信号的抑制能力越强,系统定位越精准。信噪比的计算公式如式(3)所示:

$$SNR = 10 \lg \frac{P_s}{P_n}, \quad (3)$$

其中: P_s 为最大信号强度, P_n 为最大噪声强度。在减去噪声底的光时域反射数据中加入不同幅度的虚拟噪声电平,然后,使用相对强度比值法进行振动事件定位,并通过信噪比的方式来衡量不同虚拟噪声电平下系统的定位精度。为了更直观地感受系统在不同幅度虚拟噪声电平下的表现,我们选取被测光纤沿线每个位置对应的比值的最大值,并计算系统的信噪比,如图 10 所示。

图 10(a)为加入 25% 的虚拟噪声电平,系统的信噪比为 5.99;图 10(b)为加入 50% 的虚拟噪声电平,系统的信噪比为 7.56;图 10(c)为加入

75% 的虚拟噪声电平,系统的信噪比为 8.64;图 10(d)为加入 100% 的虚拟噪声电平,系统的信噪比为 9.46;图 10(e)为加入 125% 的虚拟噪声电平,系统的信噪比为 10.11;图 10(f)为加入 150% 的虚拟噪声电平,系统的信噪比为 10.64;图 10(g)为加入 175% 的虚拟噪声电平,系统的信噪比为 11.09;图 10(h)为加入 200% 的虚拟噪声电平,系统的信噪比为 11.48。由此可见,加入的虚拟噪声电平从近零位置幅值均值的 25% 增加到 200%,系统的信噪比从 5.99 增大到 11.48。随着虚拟噪声电平的增大,光时域反射曲线中幅值近零位置的比值在减小,虽然振动区域的信号比值也在下降,但与幅值近零位置相比下降幅度较小,所以系统的信噪比在增大,系统对振动事件的定位将更加精准。但是继续增加虚拟噪声电平的幅度,系统的动态范围必然降低,因此,要选取一个合适大小的虚拟噪声电平,使系统在精确定位振动事件的前提下动态范围最佳。

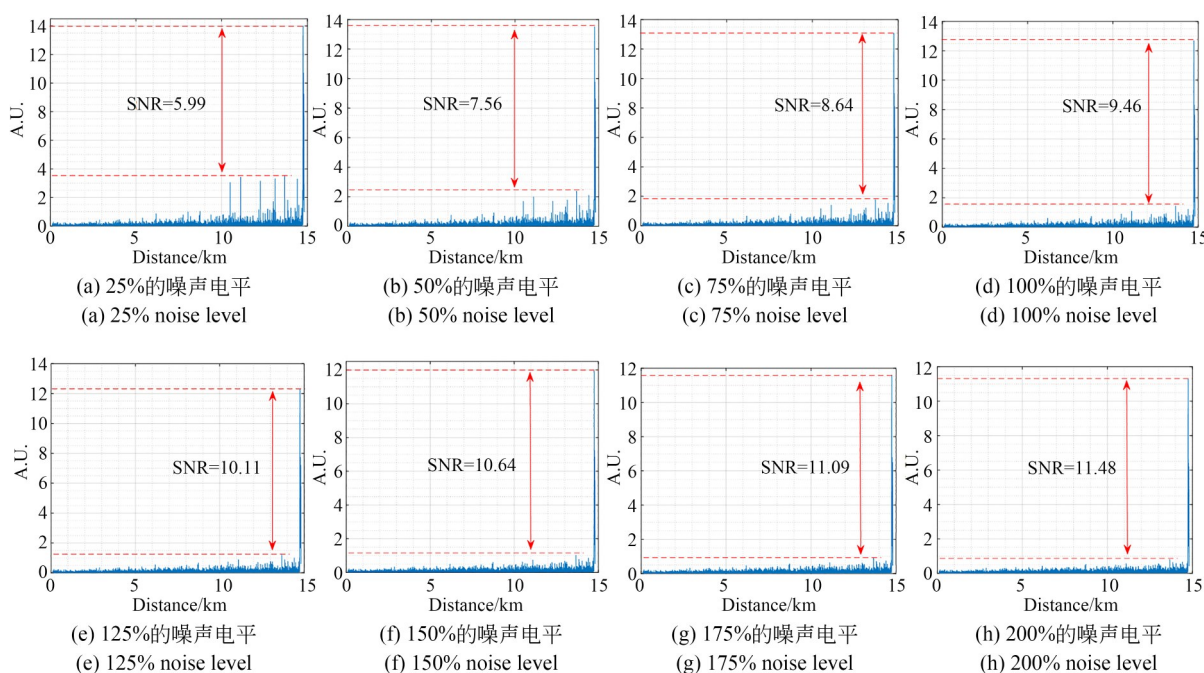


图 10 不同噪声水平下的系统定位信噪比

Fig. 10 SNR of system positioning under different noise level

基于图 5(a)的数据,加入不同的虚拟噪声电平,得到的系统信噪比与动态范围关系如图 11 所示。

从图 11 中可以看出,随着虚拟噪声电平的增

大,系统的信噪比逐步上升,系统的动态范围逐步下降。为使系统能够在精确判别振动事件的同时,系统能够有最佳的动态范围,取图 11 中两曲线的交汇点,约为信号幅值近零位置均值的

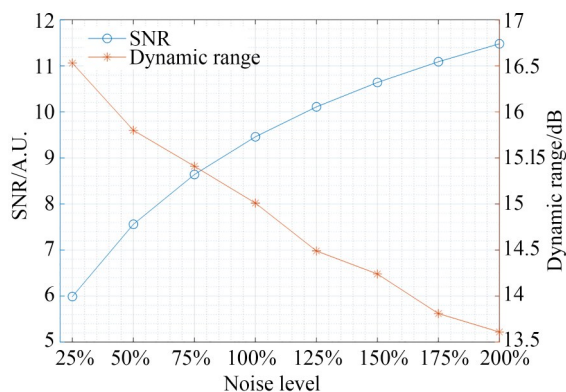


图 11 不同噪声电平下系统的性能

Fig. 11 Performance of the system at different noise levels

75%,所以在减去噪声底的光时域反射数据中加入幅值近零位置均值 75% 的虚拟噪声电平时,系统的动态范围与信噪比都将达到最佳值。此时系统的动态范围为 15.41 dB,相对于图 4 中不考虑系统噪声电平的传统算法,动态范围提升了 11.26 dB。

综上所述,本文提出的改进方法,即在减去噪声底后的光时域反射数据曲线中加入适量的虚拟噪声电平,来降低信号幅值近零位置对系统定位振动事件的影响,当虚拟噪声电平的大小为幅值近零位置均值的 75% 时,系统不仅可以使使用相对强度比值法对振动事件位置进行准确定位,同时,还能显著提高系统的动态范围。

6 结 论

在 Φ -OTDR 系统中,声光调制器具有极高的消光比,但仍会有连续光泄露,这部分光进入被测光纤后产生散射光,光电探测器采集该散射光,形成噪声底,该噪声底通常远高于光电探测器自身的噪声电平,因此噪声底对系统的动态范围与振动事件识别定位具有很大的影响。实验中不减噪声底时测得的动态范围为 4.15 dB,减

去噪声底后的动态范围为 17.11 dB。虽然减去噪声底可以极大地提高系统动态范围,但是使用相对强度比值法进行振动事件识别定位时,由于信号幅值近零位置的数据被用作除数,该位置极易受噪声影响,从而可能导致系统对振动事件的误报。因此,本文提出一种基于虚拟噪声电平的系统性能优化算法,通过在光时域反射信号中加入与信号幅值近零位置均值相关的虚拟噪声电平,来降低幅值近零位置的灵敏度,从而保证系统的定位精度。实验搭建了 Φ -OTDR 系统,采集了 15 km 被测光纤的光时域反射数据,使用虚拟噪声电平优化算法,通过计算不同幅度虚拟噪声电平下系统的动态范围和振动信号信噪比,确定二者总体最优时的虚拟噪声电平。研究表明,当加入的虚拟噪声电平约为近零位置均值的 75% 时,系统的动态范围与振动事件信噪比能达到最佳的一致性,即振动信号信噪比的上升与动态范围的降低之间能达到某种平衡,与传统的相对强度比值法相比,系统的动态范围提升了 11.26 dB。虚拟噪声电平的引入相对于传统的方案可提升系统动态范围,相对于直接去除噪声电平的方案可降低系统误报率。本文对 Φ -OTDR 系统的优化算法在不借助提升系统核心硬件如掺铒光纤放大器增益、光电探测器灵敏度、数据采集卡量化精度,且在不使用复杂的数字信号处理算法如小波变换、经验模态分解、神经网络等的条件下,大幅提升动态范围,简单适用,便于系统集成,具备很好的工程应用价值。

作者贡献声明:

王子豪:实验数据分析,论文构思和撰写;

冯玉祥:对实验和研究结果进行核实验证;

刘志凯:实验设计及数据整理和可视化呈现;

吕立冬:实验方案、算法的提出及论文构思和撰写。

参考文献:

- [1] TAYLOR H F, LEE C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US5194847 [P]. 1993-03-16.
- [2] CAO X M, SU Y S, JIN Z Y, et al. An open data-

set of ϕ -OTDR events with two classification models as baselines [J]. *Results in Optics*, 2023, 10: 100372.

- [3] 王宇, 王俊虹, 梁斌, 等. 基于光纤移频延时环的 Φ -OTDR 信号衰落抑制方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(11): 23-30.

- WANG Y, WANG J H, LIANG B, *et al.* Fading suppression method of Φ -OTDR signal based on optical fiber frequency-shifted delay loop[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(11): 23-30. (in Chinese)
- [4] 管彦周, 万生鹏, 程亚楠, 等. 基于移动方差平均算法的相位敏感光时域反射计去噪算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 233-240.
- GUAN Y Z, WAN S P, CHENG Y N, *et al.* Research on the denoising algorithm of phase sensitive optical time domain reflectometry based on the moving variance average algorithm[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(10): 233-240. (in Chinese)
- [5] SU J H, QIN Y L, ZHENG H, *et al.* Noise suppression for phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on non-local means filtering[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 74: 103119.
- [6] MARIE T F B, YANG B, HAN D Z, *et al.* Principle and application state of fully distributed fiber optic vibration detection technology based on Φ -OTDR: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(15): 16428-16442.
- [7] LIU S Q, YU F H, HONG R, *et al.* Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(3): 200078.
- [8] 司召鹏, 卜泽华, 毛邦宁, 等. 基于相位解调的相位敏感光时域反射计研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1100007.
- SI Z P, BU Z H, MAO B N, *et al.* Review of research on phase sensitive optical time-domain reflectometer based on phase demodulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1100007. (in Chinese)
- [9] 李柯, 龚岩栋, 张卓. φ -OTDR降噪处理的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(23): 25-33.
- LI K, GONG Y D, ZHANG Z. Research progress of φ -OTDR noise reduction processing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(23): 25-33. (in Chinese)
- [10] 邢炜光, 赵赞善, 邢猛, 等. 光纤传感用于海缆扰动探测的试验研究[J]. 光学精密工程, 2023, 31(10): 1432-1442.
- XING W G, ZHAO Z S, XING M, *et al.* Experimental research on submarine cable disturbance detection with optical fiber sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(10): 1432-1442. (in Chinese)
- [11] FILOGRANO M L, RIZIOTIS C, KANDYLA M. A low-cost phase-OTDR system for structural health monitoring: design and instrumentation[J]. *Instruments*, 2019, 3(3): 46.
- [12] ZHEN Y, HAO F. 基于深度学习的 Φ -OTDR输油管道入侵监测研究[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(8): 0806001.
- [13] XIN L P, LI Z Y, GUI X, *et al.* Surface intrusion event identification for subway tunnels using ultra-weak FBG array based fiber sensing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6794-6805.
- [14] 顾金凤, 卢斌, 杨竣淇, 等. 多芯光纤分布式声传感[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0706003.
- GU J F, LU B, YANG J Q, *et al.* Distributed acoustic sensing based on multi-core fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0706003. (in Chinese)
- [15] LIU H, ZHANG Q, WU B Y, *et al.* Frequency-shift phase generation carrier demodulation for noise reduction in ϕ -OTDR[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2024, 36(11): 725-728.
- [16] GROTE H, STADNIK Y V. Novel signatures of dark matter in laser-interferometric gravitational-wave detectors[J]. *Physical Review Research*, 2019, 1(3): 033187.
- [17] KRISS M, PARULSKI K, LEWIS D. Critical technologies for electronic still imaging systems[C]. *Applications of Electronic Imaging*. Los Angeles, CA, USA. SPIE, 1989: 157-184.
- [18] GONG Y D, LI K, ZHANG Z. Investigation on low cost optical fiber sensor interrogator[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2021, 64(5): 765-767.
- [19] 李建中, 饶云江, 冉曾令, 等. 基于 ϕ -OTDR和POTDR结合的分布式光纤微扰传感系统[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1108-1113.
- LI J Z, RAO Y J, RAN Z L, *et al.* A distributed optical fiber perturbation sensor system base on combination of ϕ -OTDR and POTDR[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(5): 1108-1113. (in Chinese)
- [20] PENG F, DUAN N, RAO Y J, *et al.* Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR[J]. *IEEE Photonics Technology*

- Letters*, 2014, 26(20): 2055-2057.
- [21] ASHRY I, MAO Y, ALIAS M S, *et al.* Normalized differential method for improving the signal-to-noise ratio of a distributed acoustic sensor[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(18): 4933-4938.
- [22] YU Z H, ZHU L, DAI B, *et al.* Noise reduction based on adaptive prediction fitting algorithm for a heterodyne Φ -OTDR system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(23): 1311-1314.
- [23] LI S C, LIU K, JIANG J F, *et al.* An ameliorated denoising scheme based on deep learning for Φ -OTDR system with 41-km detection range [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22 (20) : 19666-19674.
- [24] ZHANG J M, YAN Y X, LIU S Q, *et al.* Adaptive block-matching and 3D denoising for Φ -OTDR under ultra-low SNR conditions [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42 (13) : 4698-4705.
- [25] 王大伟, 封皓, 杨洋, 等. 基于 Φ -OTDR 光纤传感技术的供水管道泄漏辨识方法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(4): 830-837.
- WANG D W, FENG H, YANG Y, *et al.* Study on leakage identification method of water supply pipeline based on Φ -OTDR optical fiber sensing technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(4): 830-837. (in Chinese)
- [26] 潘冬阳, 南钢洋, 白雪. 基于高速信号采集系统累加平均算法研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2021 (8): 122-125.
- PAN D Y, NAN G Y, BAI X. Research on overlapping average algorithm based on high speed signal acquisition system [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2021(8): 122-125. (in Chinese)
- [27] LIPOVAC A, LIPOVAC V, HAMZA M, *et al.* Optical OFDM error floor estimation by means of OTDR enhanced by front-end optical preamplifier [J]. *Sensors*, 2021, 21(21): 7303.

作者简介:



王子豪(2001—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事分布式光纤传感技术和电力物联网方面的研究。E-mail: WangZihao010227@163.com

通讯作者:



吕立冬(1982—),男,四川邻水人,博士,副教授,硕士研究生导师,2005年获得西安工业大学学士学位,2009年获得中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所硕士学位,2012年获得南京大学博士学位。主要研究方向为电力设备状态监测与诊断、分布式光纤传感、能源互联网等,现主要从事光纤传感技术及其在智能电网方面的研究。E-mail: lvlidong@ahut.edu.cn