

## 直流控保系统光纤链路微弱故障的定位

阮峻<sup>1</sup>, 孙豪<sup>1</sup>, 朱志俊<sup>1</sup>, 田霖<sup>1</sup>, 徐宛丽<sup>2</sup>, 吴宝锋<sup>2</sup>, 孙小茵<sup>2\*</sup><sup>1</sup>中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局, 云南 昆明 650300;<sup>2</sup>东南大学光传感/通信综合网络国家地方联合工程研究中心, 江苏 南京 210096

**摘要** 针对特高压直流输电工程对控制与保护系统安全性的需求, 基于相位敏感光时域反射仪( $\Phi$ -OTDR)对光纤链路微弱故障进行检测与定位。模拟了特高压直流输电工程控制保护系统的故障状态及环境信息, 获得了 $\Phi$ -OTDR 系统底层时域背向散射的相位调制信息。对比分析了系统微弱故障分段、乘积分段信息熵定位算法对相同多类混杂信号的处理效果, 结果表明, 乘积分段信息熵算法在分段数为 2 时就能大大提升系统的信噪比, 在采样周期数为 100、40 时系统对微弱故障的定位精度分别为 $\pm 1.5$  m、 $\pm 2.0$  m。

**关键词** 光纤光学; 直流控保; 相位敏感光时域反射仪; 故障定位; 信息熵

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2006002

## 1 引言

特高压直流输电工程控制保护系统由光纤及各类连接器件构成<sup>[1]</sup>, 通过光时域反射仪(OTDR)检测技术实现对链路故障信息的检测与定位。由于直流输电工程控制保护系统的元部件复杂多样, 传统 OTDR 难以感应微弱故障信息, 从而影响了直流输电工程系统的稳定性。

相位敏感 OTDR( $\Phi$ -OTDR)具有灵敏度高、对外界微弱故障敏感等优点, 是实时监测光纤链路状况微弱故障的有效技术手段<sup>[2]</sup>。但实际工程系统所处的环境复杂多变, 且 $\Phi$ -OTDR 的高灵敏度会使多种外界无效信号对检索光脉冲的背向散射信号产生相位调制, 混杂在接收信号中, 大大增加了监测工程系统微弱故障定位的难度。近几年, 人们针对 $\Phi$ -OTDR 实际系统中微弱故障区分与定位的问题开展了多项研究。其中, 基于模型的概率分布比较法建模过程复杂, 难以区分复杂多变环境的噪声与真实信号, 不能适应于环境复杂、数据并发量大的检测系统<sup>[3-5]</sup>, 如隐式马尔科夫法、统计法。对于铺设在野外环境的光缆链路安全监测, 人们开发了考虑多雨环境因素在内的雨滴模

型<sup>[6-7]</sup>。此外, 采用啁啾脉冲放大<sup>[8]</sup>、二维双边滤波<sup>[9]</sup>、经验模态分析<sup>[10]</sup>、异构加速<sup>[11]</sup>和内调制啁啾脉冲<sup>[12]</sup>提高系统定位精度的方法也得到了人们的广泛研究。但将 $\Phi$ -OTDR 用于特高压直流输电控保系统, 深入分析其微弱故障信号的提取与定位算法还未见报道。

针对上述问题, 本文在实验室内搭建了一种 $\Phi$ -OTDR 系统, 可获取系统底层采集到的时域背向散射相位调制信息。针对模拟的特高压直流输电工程控制保护系统的故障状态及环境信息, 分别提出了分段、乘积分段信息熵算法, 并对比分析了不同算法的定位精度。

## 2 实验系统与测试数据

图 1 为 $\Phi$ -OTDR 实验系统的基本组成, 主要包括光发送模块、光纤干涉仪、传感光纤、光接收模块、模拟微弱故障源、信号处理模块。系统端机发出的检索光脉冲进入光纤链路, 不断产生背向散射光信号并返回到系统端机中。受故障源的扰动后, 链路背向散射光信号的相位会发生变化, 可通过光干涉仪将光信号的相位变化转变为光强度信号, 从而得到扰动的位置。

收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2021-03-03; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61271206)、南方电网 2019 年科技服务项目(2019-41)

通信作者: \*xhsun@seu.edu.cn

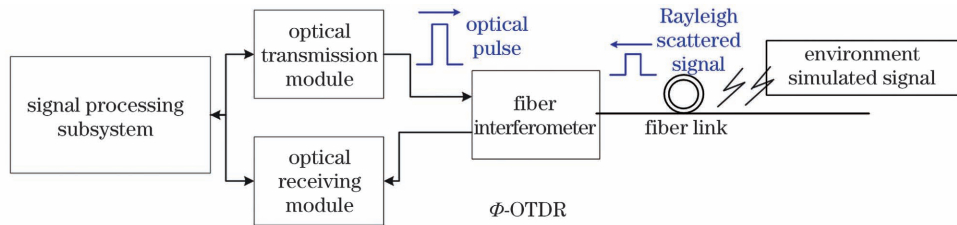


图 1  $\Phi$ -OTDR 实验系统的框图

Fig. 1 Block diagram of the  $\Phi$ -OTDR experimental system

按照图 1 在实验室搭建的  $\Phi$ -OTDR 系统端机如图 2(a)所示,模拟直流控保系统光纤链路所处环境及微弱故障源的装置如图 2(b)所示。将传感光

纤链路上某段光纤绕制在圆筒型压电陶瓷上,信号发生器产生不同频率的不规则信号使光纤受到扰动,同时光纤还会受到外加单独振动源的扰动。

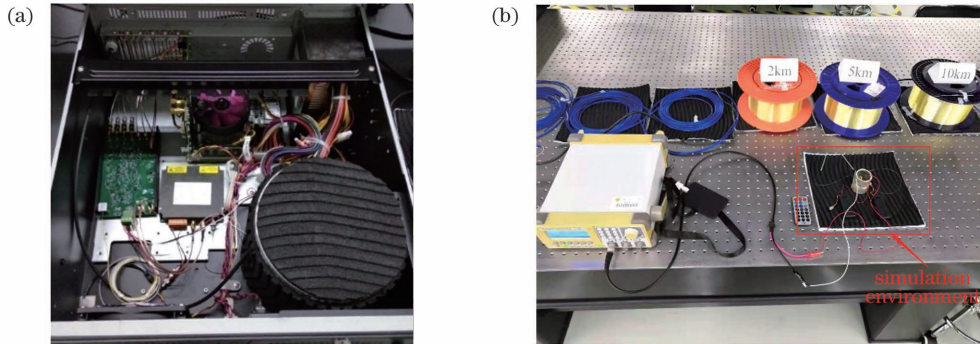


图 2  $\Phi$ -OTDR 系统的实验测试平台。(a)实验装置;(b)模拟光纤链路情况的装置

Fig. 2 Experimental test platform of the  $\Phi$ -OTDR system. (a) Experimental device; (b) device for simulating the condition of optical fiber link

实验系统的工作参数:检索脉冲的脉冲宽度为  $1 \mu\text{s}$ ,峰值功率为  $18 \text{ mW}$ ,频率为  $1 \text{ kHz}$ ,实验光纤链路的长度为  $20 \text{ km}$ 。在光纤传感链路  $1.8 \text{ km}$  处添加扰动后,采集 20 个原始数据并送至信号处理单元,得到的结果如图 3 所示。其中,系统扰动源为自制直流控保系统光纤链路所处环境状况的微弱故障源,以模拟现场环境不同频率和微弱位移振动即微弱故障信号。可以发现,采集的光纤链路背向散射曲线中故障信号和背景噪声不容易被区分,信噪比(SNR)较低、背景噪声较大,无法对故障进行定位。

因此,用合适的算法对这类微弱故障信号进行精确定位具有重要意义。

### 3 定位算法

#### 3.1 信息熵分析

针对图 3 中模拟故障环境下的  $\Phi$ -OTDR 测试数据,可用信息熵描述微弱故障发生的不确定性<sup>[13]</sup>。设  $X$  为取有限个值的随机变量,则其信息熵可定义为<sup>[14]</sup>

$$H(X) = - \sum_{l=1}^n p_{X_l} \times \log(p_{X_l}), \quad (1)$$

式中,  $l=1, \dots, n$ ,  $n$  为  $X$  的采样数,  $X_l$  为  $X$  的值域,  $p_{X_l}$  为  $X_l$  的概率分布函数。  $X$  的信息熵可表示  $X$  的信息量。由(1)式可知,  $X$  的概率分布  $p$  越大,其熵值  $H$  就越大,包含的信号量也越多。包含故障的信号是一个随机变量,故障位置处信号的信息量大,而非故障位置处信号的信息量小,因此,可将信息熵作为判断光纤链路上有无故障的依据。

计算每个位置处实验测试信号的信息熵,结果如图 4 所示。可以发现,所有位置处故障信号的信息熵均小于  $4.3 \text{ bit}$ ,不能确定光纤链路上的故障位

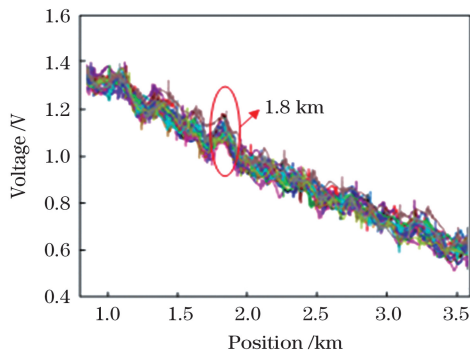


图 3 模拟故障环境下系统的测试结果

Fig. 3 Test results of the system in simulated fault environment

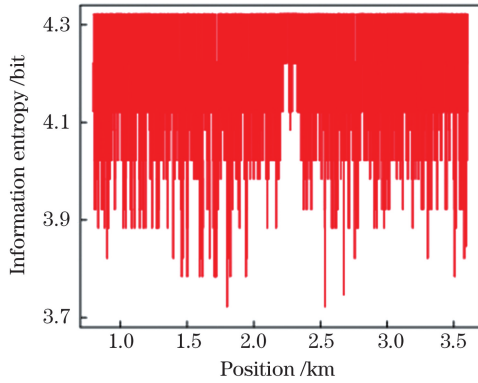


图 4 故障信号不同位置的信息熵

Fig. 4 Information entropy at different locations of the fault signal

置。原因是非故障位置处的故障信号幅值变化虽小,但仍存在不确定性,导致故障信号的非故障位置和故障位置在幅值上的概率分布相似。

### 3.2 分段信息熵

用信息熵作为特征参数难以判断光纤链路上的故障情况,因此,基于无故障时信号幅值变化较小的原理提出分段信息熵,将故障信号的幅值在动态范围内分成  $k$  段,计算  $k$  段故障信号信息熵的和,即信号的信息熵。在  $M$  个周期内光纤链路上故障信号的最大值为上限  $X_{up}$ ,最小值为下限  $X_{down}$ ,可表示为

$$X_{up} = X_{max} + \min[\min(X_{ij})], \quad (2)$$

$$X_{down} = \max[\max(X_{ij})] - X_{max}, \quad (3)$$

式中,  $X_{ij}$  为第  $i$  段内的第  $j$  个周期,  $i \in [1, k]$ ,  $j \in [1, M]$ ,  $X_{max}$  为动态范围,其物理意义为光纤链路上信号最大值和最小值的差值,可表示为

$$X_{max} = \max[\max(X_{ij})] - \min[\min(X_{ij})]. \quad (4)$$

将信号的幅值在动态范围内进行均等分段,每段的上限  $X_t$  可表示为

$$X_t = \min[\min(X_{ij})] + t \times \frac{X_{max}}{k}, \quad (5)$$

式中,  $t \in [1, k]$ 。光纤链路上每个位置处微弱故障信号的分段信息熵可表示为

$$H_j = - \sum_{i=1}^k p(X_{ij}) \times \log[p(X_{ij})]. \quad (6)$$

分析图 3 中的故障感知信号时,首先,计算光纤链路上微弱故障信号的  $X_{max}$ ;然后,将  $X_{max}$  平均划分成  $k$  段,统计每个位置处每段包含信号的频率,并计算每个位置处微弱故障信号的信息熵。不同分段时各个位置处微弱故障信号的信息熵如图 5(a) 所示,可以发现,不同  $k$  时 2.3 km 位置处信号的信息熵最大值接近 3 bit,大于其他位置处信号的信息

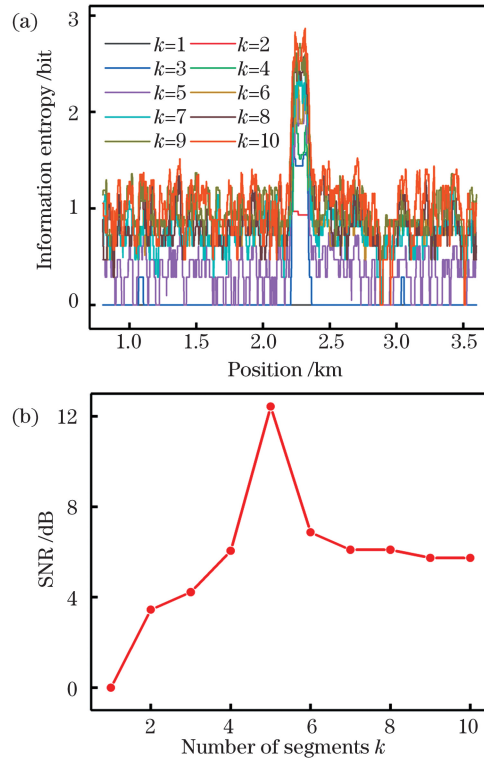


图 5 分段信息熵的处理结果。(a)不同分段时各个位置的信息熵;(b)不同分段时系统的 SNR

Fig. 5 Processing results of segmented information entropy. (a) Information entropy of each position in different segments; (b) SNR of the system in different segments

熵;且该位置处的信息熵随  $k$  的变化而变化。不同  $k$  时系统的 SNR 如图 5(b) 所示,可以发现,当  $k \in [0, 5]$  时,系统的 SNR 随  $k$  的增大而增大;当  $k \in [5, 10]$  时,系统的 SNR 随  $k$  的增大而减小;当  $k=5$  时,系统的 SNR 达到最大值,为 13 dB。但当微弱故障位置较远时,微弱故障信号会迅速衰减。计算得到不同分段时各个位置处信号的分段信息熵如图 6 所示,可以发现,所有位置处的分段信息熵均在

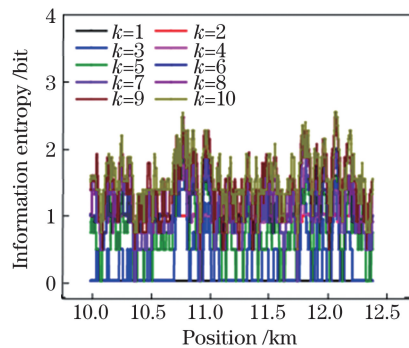


图 6 不同分段时各个位置处信号信息熵

Fig. 6 Signal information entropy at each position in different segments

区间 $[0, 2.5]$ 内,难以判断光纤链路上有无故障。

### 3.3 乘积分段信息熵

针对 3.2 节中的问题,基于分段信息熵提出了一种改进特征参数的乘积分段信息熵,分别计算零电平上下位置信号的分段信息熵,再将上下分段信息熵相乘,得到乘积分段信息熵。对于微弱故障信号,其乘积分段信息熵可表示为

$$H_j = H_j^1 \times H_j^{-1}, \quad (7)$$

式中, $H_j^1$ 与 $H_j^{-1}$ 分别为零电平上段、下段的分段信息熵,可表示为

$$H_j^1 = - \sum_{i=1}^k p(X_{ij}) \times \log[p(X_{ij})], \quad (8)$$

$$H_j^{-1} = - \sum_{i=1}^k p(X_{ij}) \times \log[p(X_{ij})]。 \quad (9)$$

零电平上段分段信息熵的 $X_{up}$ 、 $X_{down}$ 、 $X_{max}$ 可表示为

$$\begin{cases} X_{up} = X_{max} \\ X_{down} = 0 \\ X_{max} = \max[\max(X_{ij})], \\ X_t = t \times \frac{X_{max}}{k} \end{cases}, \quad (10)$$

零电平下段分段信息熵的 $X_{up}$ 、 $X_{down}$ 、 $X_{max}$ 可表示为

$$\begin{cases} X_{up} = 0 \\ X_{down} = \min[\min(X_{ij})] \\ X_{max} = -\min[\min(X_{ij})]。 \\ X_t = t \times \frac{X_{max}}{k} \end{cases}。 \quad (11)$$

计算每个位置处的信号乘积分段信息熵并进行分析,不同分段时各个位置处信号的乘积分段信息熵如图 7(a)所示。可以发现,不同 $k$ 值时 10.8 km 位置处信号的乘积信息熵大于其他位置。当 $k=2$ 时,各个位置处的信号乘积信息熵如图 7(b)所示。可以发现,非故障位置处信号的乘积分段信息熵为 0,故障位置处的信号乘积分段信息熵会发生突变,其值最大为 1 bit<sup>2</sup>,这表明乘积分段信息熵可以显示出微弱故障的统计特性。

## 4 分析与讨论

基于图 2 建立的实验平台,在光纤 2.3,5.0,10.8 km 处分别产生故障,并采用分段、乘积分段信息熵算法处理感知信号,得到不同 $k$ 时系统的 SNR,如图 8 所示。可以发现,2.3 km 位置发生故障且 $k=2$ 时,系统的 SNR 从 13.97 dB 提高到 60.05 dB; $k=3$ 时,系统的 SNR 从 13.97 dB

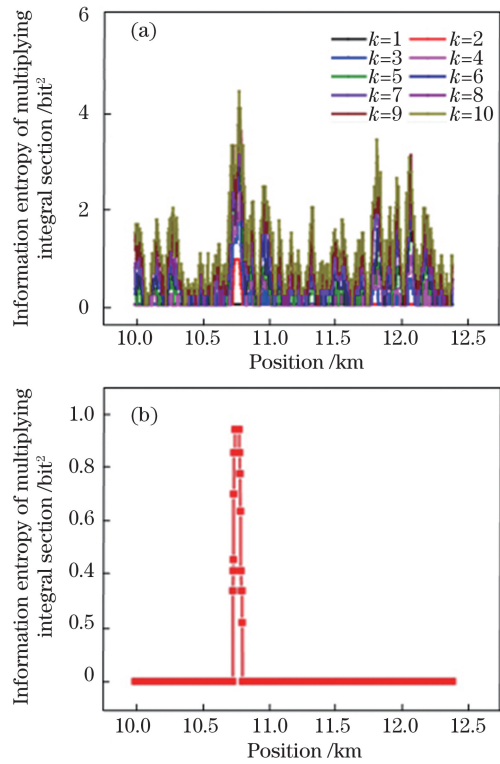


图 7 乘积分段信息熵的处理结果。(a)不同分段时各个位置处信号的信息熵;(b) $k=2$ 时各个位置处信号的信息熵

Fig. 7 Processing result of multiplying the information entropy of the integral section. (a) Information entropy of the signal at each position in different segments; (b) information entropy of the signal at each position when  $k=2$

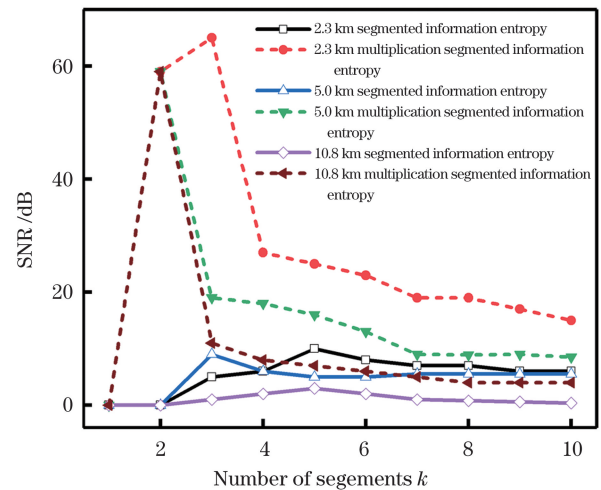


图 8 不同处理算法下系统的 SNR

Fig. 8 System SNR under different processing algorithms

提高到 64.08 dB。5.0 km 位置发生故障且 $k=2$ 时,系统的 SNR 从 5.11 dB 提高到 59.55 dB。10.8 km 位置发生故障且 $k=2$ 时,系统的 SNR 从

3.52 dB 提高到 59.55 dB。综合考虑分段数与 SNR 提升效果和算法开销的关系,取  $k=2$  作为系统定位乘积分段信息熵算法的分段数。

根据乘积分段信息熵算法分段数为 2 时的处理结果进行定位,改变定位算法的数据采样周期和距离阈值的大小,观察系统定位精度在 0.6, 0.8, 1.0 km 三个位置的变化情况,结果如图 9 所示。可以发现,随着周期的增加, $\Phi$ -OTDR 系统的定位精度整体呈减小的趋势;当数据采样周期大于 50 时, $\Phi$ -OTDR 系统的定位精度不再发生变化。数据采样周期为 100, 光纤链路 0.6, 0.8, 1.0 km 位置故障时,系统的定位精度分别为  $\pm 1.5$ ,  $\pm 2.0$ ,  $\pm 2.5$  m。采样周期数分别为 100、40, 系统对光纤链路 0.6 km 位置出现的微弱故障定位精度分别达到  $\pm 1.5$  m、 $\pm 2.0$  m。相比其他算法,乘积分段信息熵算法在分段数为 2 时的定位精度更高,且具有算法简单和开销低的优点。

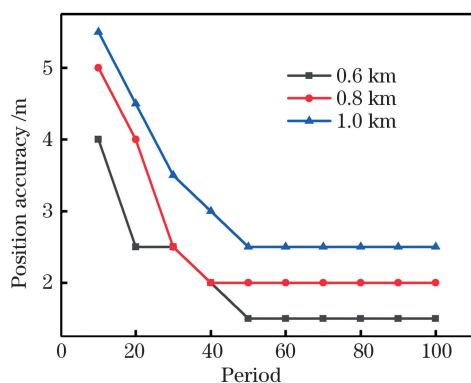


图 9 不同采样周期定位精度

Fig. 9 Positioning accuracy of different period

## 5 结 论

在实验室搭建了  $\Phi$ -OTDR 系统,并获取系统时域背向散射相位受模拟环境微弱扰动的调制信息。针对模拟的特高压直流输电工程控制保护系统关键元部件的故障状态及环境信息,定义了分段信息熵和乘积分段信息熵算法的特征参数,提出了基于乘积分段信息熵的数据处理方法。实验平台测试结果表明,乘积分段信息熵算法在分段数为 2 时,可大大提升系统的信噪比。采样周期数分别为 100、40 时,系统对光纤链路 0.6 km 位置出现的微弱故障定位精度分别达到  $\pm 1.5$  m、 $\pm 2.0$  m,从而提升了直流控保系统的光纤链路微弱故障定位性能。

## 参 考 文 献

[1] Tian S X, Cheng H Z, Chang H, et al. Analysis and

evaluation of social benefit from UHV power grid [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(2): 145-153.

田书欣,程浩忠,常浩,等.特高压电网社会效益分析及评价方法[J].*电力自动化设备*, 2015, 35(2): 145-153.

- [2] Pan C, Ye H L, Li M M, et al. Compensation method for blind segments of distributed optical-fiber vibration sensor based on differential-coherent OTDR [C]//OFC 2014, March 9-13, 2014, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: 1-3.
- [3] Zhu P Y, Xu C J, Ye W, et al. Self-learning filtering method based on classification error in distributed fiber optic system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(19): 8929-8933.
- [4] Wu H J, Liu J, Lu L D, et al. Multi-point disturbance detection and high-precision positioning of polarization-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(23): 5371-5377.
- [5] Zhu H, Shan X K, Sun X H. Analysis and demonstration of vibration waveform reconstruction in distributed optical fiber vibration sensing system [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(10): 107110.
- [6] Zhu H, Sun X H. Phase modulation analysis for optical fiber strain caused by raindrop collision [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(2): 024211.  
朱辉,孙小茜.雨滴碰击光缆后光纤应变相位调制分析[J].*物理学报*, 2018, 67(2): 024211.
- [7] Zhu H, Pan C, Sun X H. Vibration pattern recognition and classification in OTDR based distributed optical-fiber vibration sensing system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9062: 906205.
- [8] Pastor-Graells J, Cortés L R, Fernández-Ruiz M R, et al. SNR enhancement in high-resolution phase-sensitive OTDR systems using chirped pulse amplification concepts [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1728-1731.
- [9] He H J, Shao L Y, Li H C, et al. SNR enhancement in phase-sensitive OTDR with adaptive 2-D bilateral filtering algorithm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 1-10.
- [10] Qin Z G, Chen H, Chang J. Signal-to-noise ratio enhancement based on empirical mode decomposition in phase-sensitive optical time domain reflectometry systems [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2017, 17(8): E1870.
- [11] Sheng Q H, Yu Z, Lu B, et al. Real-time phase-sensitive optical time-domain reflectometry signal processing system based on heterogeneous accelerated computing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0104002.

- 盛庆华, 俞钊, 卢斌, 等. 基于异构加速的  $\Phi$ -OTDR 实时信号处理系统 [J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0104002.
- [12] Li L C, Lu B, Wang X, et al. Internally modulated chirped pulse based direct detection type  $\Phi$ -OTDR system with high signal-to-noise ratio and low cost [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0806003.
- 李鲁川, 卢斌, 王校, 等. 基于内调制啁啾脉冲的高信噪比低成本直接探测型  $\Phi$ -OTDR 系统 [J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0806003.
- [13] He J, Chen X. Multi-resolution selection of SAR images and target recognition based on nonlinear correlation information entropy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 221020.
- 何洁, 陈欣. 基于非线性相关信息熵的 SAR 图像多分辨率选择及目标识别 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 221020.
- [14] Han B, Wu T J. Information entropy based reduct searching algorithm [C] // Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No. CH37301), May 8-10, 2002, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2002: 4577-4582.

## Location of Weak Faults in Optical Fiber Links of Direct Current Control and Protection System

Ruan Jun<sup>1</sup>, Sun Hao<sup>1</sup>, Zhu Zhijun<sup>1</sup>, Tian Lin<sup>1</sup>, Xu Wanli<sup>2</sup>, Wu Baofeng<sup>2</sup>, Sun Xiaohan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kunming Bureau of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650300, China;

<sup>2</sup> National Research Center for Optical Sensing/Communications Integrated Networking, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

### Abstract

**Objective** With the continuous development of power transmission systems from west to east, the advantages of ultrahigh voltage (UHV) direct current (DC) transmission have become increasingly evident. The optical fiber link used in the UHV DC control and protection system may fail, exposing the system to risks. Existing methods for inspecting the performance of the optical fiber link in such systems are deficient. Only a part of the optical fiber can be used to test the attenuation using a light source and an optical power meter, and the quality of the optical fiber link requires manual evaluation. Faults along the optical fiber link and decreasing transmission performance are difficult to determine during operation and maintenance, thus representing a security risk to the UHV DC control and protection system. Because the use of a light source and an optical power meter to detect link faults in the control and protection system requires cooperation on the two ends of the link, it is difficult to determine the fault location, which is not conducive to failure cause analysis and rectification. Considering the high security requirements of UHV DC transmission, phase-sensitive optical time-domain reflectometry ( $\Phi$ -OTDR) is employed to detect and locate weak faults in the optical fiber link of the control and protection system.

**Methods** The proposed  $\Phi$ -OTDR system prepared under laboratory settings comprised an optical transmission module, optical fiber interferometer, sensing optical fiber, optical receiver module, simulated weak fault source, signal processing module, etc. The fault status and environmental information of the key components of the UHV DC control and protection system are simulated, and information from time-domain backscatter phase modulation at the bottom of the  $\Phi$ -OTDR system is obtained and analyzed experimentally. The information entropy algorithms of segmentation, multiplication, and integration are introduced to determine the failure status of the key components of the control and protection system of the simulated UHV DC transmission project and environmental information. Furthermore, the location accuracy of weak faults is evaluated.

**Results and Discussions** In the experimental system, different frequencies and weak displacement vibrations are simulated. First, disturbances are applied to collect 20 raw datapoints at 1.8 km of the optical fiber link. During the acquisition of the backscatter of the optical fiber link, the difference between the fault signal and background noise is not clear and the signal-to-noise ratio (SNR) is low (Fig. 3). Then, the information entropy algorithm is used to conduct a preliminary signal analysis. The segmented information entropy is proposed after identifying the shortcomings of the conventional information entropy algorithm. The amplitude of the fault signal is divided into  $k$

segments in the dynamic range, and the information entropy of the  $k$ -segment fault signal is calculated and the sum is used to represent the information entropy of the signal (Fig. 5). Finally, the information entropy location using segmentation and multiplication segmentation is proposed and our study shows that it is more suitable for the system. The improvement in the SNR using the signal processing of the information entropy location considering segmentation and multiplication segmentation is evaluated (Fig. 8). The optimal number of segments for the application of the system is determined (Fig. 9).

**Conclusions** Herein, two algorithms for information entropy location using segmentation and multiplication segmentation are proposed and the results of processing multiple types of mixed signals are compared and analyzed. The information entropy algorithm obtained by multiplying integral segments can considerably improve the SNR of the system when two segments are considered. The location accuracy of weak fault can reach  $\pm 1.5$  and  $\pm 2.0$  m, respectively, for 100 and 40 sampling periods, respectively.

**Key words** fiber optics; direct-current control and protection; phase sensitive optical time domain reflectometer; fault location; information entropy

**OCIS codes** 060.2360; 120.4825; 110.3055