

# 基于 BOTDA/R 的在运光纤复合架空地线光缆应变监测对比分析

夏猛<sup>1,2</sup>, 汤晓惠<sup>1,2</sup>, 王颖<sup>3</sup>, 张书林<sup>3</sup>, 姜辉<sup>3</sup>, 董永康<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学航天学院可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

<sup>2</sup> 睿科光电技术有限公司, 辽宁 鞍山 114000;

<sup>3</sup> 国家电网有限公司信息通信分公司, 北京 100761

**摘要** 光纤复合架空地线(OPGW)故障频发的原因与光缆局部受到的应力有直接关系,为了实现对 OPGW 光缆的在线应变监测,搭建了长距离布里渊光时域分析(BOTDA)和布里渊光时域反射(BOTDR)系统,并对重覆冰区域运行年限超过 15 年的在运 95.14 km OPGW 进行了应变检测和分析。通过对同一段光缆的对比测量,结果表明:BOTDA 系统具有更长的测量距离、更高的空间分辨率与更高的测量精度,能准确辨别引下线并识别零应变参考点,可以实现温度和应变信息的准确分离。在两个站点的距离超过 BOTDA 系统的测量量程时,可以使用 BOTDR 系统从光缆两端分别测量以覆盖全部光缆。同时,BOTDR 系统展现出单端测量的优势,在断纤故障发生时,BOTDR 系统可不影响断点之前的线路测量。在同一条 OPGW 光缆线路上通过多维度的对比,分析了两种技术在 OPGW 光缆监测中的优劣势,为分布式光纤传感技术在电力系统中的应用提供参考。

**关键词** 光纤光学; 布里渊光时域分析; 布里渊光时域反射; 光纤复合架空地线

中图分类号 O437.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1506001

## Comparative Analysis of Strain Monitoring of the Installed Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire Using BOTDA/R

Xia Meng<sup>1,2</sup>, Tang Xiaohui<sup>1,2</sup>, Wang Ying<sup>3</sup>, Zhang Shulin<sup>3</sup>, Jiang Hui<sup>3</sup>, Dong Yongkang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

<sup>2</sup> RealPhotonics Co., Ltd., Anshan, Liaoning 114000, China;

<sup>3</sup> State Grid Corporation Information and Communication Branch, Beijing 100761, China

**Abstract** The frequent failure of the optical fiber composite overhead ground wire (OPGW) can be attributed to the local stress on the optical cable. Herein, the long-distance Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA) and Brillouin optical time-domain reflectometry (BOTDR) sensing systems were established to achieve online monitoring of the strain with respect to the OPGW optical cable. Further, strain detection and analysis were conducted in case of a 95.14-km OPGW installed for more than 15 years in the heavily iced disaster area. The measurement distance, spatial resolution, and measurement accuracy of the BOTDA sensing system are greater than those of the BOTDR sensing system based on the comparative measurement results obtained using the same optical cable. In addition, the down conductor and zero-strain reference point can be accurately identified to achieve accurate separation of temperature and strain information. When the distance between two stations exceeds the BOTDA measurement range, the whole cable can be evaluated from two ends of the fiber cable using the BOTDR sensing system. The BOTDR sensing system exhibits single-ended measurement such that this system can continue performing the line measurement after a fiber break before the break point. In this study, the advantages and disadvantages of the BOTDA and BOTDR sensing systems in OPGW optical cable monitoring are analyzed for the first time by performing a multidimensional comparison using the same OPGW optical cable. Furthermore, this study provides a reference with respect to the application of the distributed optical fiber sensing technology in power systems.

**Key words** fiber optics; Brillouin optical time domain analysis; Brillouin optical time domain reflectometry; optical

收稿日期: 2020-03-31; 修回日期: 2020-04-21; 录用日期: 2020-04-29

基金项目: 国家重大科学仪器开发专项(2017YFF0108700)、国家电网有限公司总部科技项目

\* E-mail: aldendong@163.com

fiber composite overhead ground wire

OCIS codes 060.2370; 060.4370; 290.5830; 280.4788

## 1 引 言

光纤复合架空地线(OPGW)兼具电力传输线路地线和通信光缆双重功能,作为电力通信网的信号传输媒介,承载着底层基础电力生产业务,在电力系统中发挥着重要作用。目前,国网一级骨干通信系统OPGW光缆总里程已达8万余千米,且近60%的OPGW光缆运行年限已超过15年<sup>[1]</sup>。OPGW光缆在长期服役过程中易受覆冰等自然环境影响而产生非弹性形变,光纤长期受到应力,即使没有立即断裂也存在巨大的隐患。大量过冰载的OPGW在重新紧线后又开始运行,在夏天弧垂增大或再次遭遇冰灾导致OPGW再伸长时,这些光缆将经受新一轮考验<sup>[2]</sup>。采取有效的应力监测方法对运行年限久、遭受冰灾影响的骨干线路进行应力监测,对于电网的安全运行具有重大意义。

架空线路常用的在线监测手段主要有图像监测法<sup>[3]</sup>、称重法<sup>[4]</sup>、导线倾角法<sup>[5]</sup>、模拟导线法<sup>[6]</sup>,以及基于光纤光栅拉力传感器的监测法<sup>[7-9]</sup>。传统监测手段依赖于线路中的外置传感器,多为点式测量技术,具有一定的局限性。近年来,各行业的监测需求使长距离分布式光纤传感技术得到了快速发展<sup>[10]</sup>。分布式光纤传感技术具有分布式、长距离、实时性、精度高、抗电磁干扰、耐高温、耐高压、耐久性等优势,基于分布式光纤传感技术的OPGW光缆在线监测<sup>[11-12]</sup>手段无需在线路中另置传感器,利用OPGW光缆中一根或两根备用纤芯即可实现全局的分布式测量,简单易操作,通过通道扩展器进行时分复用,同时可以实现多个线路的在线监测,不仅可以克服高压输电线路强电磁干扰以及高电压绝缘的困难,而且还适用于环境恶劣、地形复杂的区域,故非常适于电力系统的监测,能有效地提升OPGW光缆安全预警与故障诊断能力。

目前,基于布里渊光时域分析(BOTDA)和布里渊光时域反射(BOTDR)<sup>[13-15]</sup>的分布式布里渊光纤传感技术已被用于OPGW光缆的在线监测中,如利用BOTDR监测75 km OPGW光缆<sup>[12,16]</sup>,利用BOTDA监测67 km OPGW光缆<sup>[14]</sup>,然而针对两种技术在OPGW光缆应力监测的对比暂未见报道。

本文搭建了长距离BOTDA与BOTDR系统,

在一条遭遇过冰灾的运行年限超过15年的550 kV特高压线路中开展了OPGW光缆应变测试,使用BOTDA监测95 km OPGW光缆,系统量程为120 km(环路240 km)。从测量距离、空间分辨率、应变测试精度等角度分析了BOTDA与BOTDR系统在OPGW光缆监测中的特点,分析各自优劣势,为两种技术在电力系统中的应用提供参考。

## 2 基本原理与BOTDA/R系统测试

布里渊频移变化量 $\Delta\nu_B$ 与光纤温度和应变的变化量成正比<sup>[17]</sup>,一般可表示为

$$\Delta\nu_B = C_B^T \Delta T + C_B^\epsilon \Delta\epsilon, \quad (1)$$

式中: $C_B^T$ 为布里渊频移温度系数; $C_B^\epsilon$ 为布里渊频移应变系数。

对于单模石英光纤,温度系数 $C_B^T$ 经验值约为1.12 MHz/°C,应变系数 $C_B^\epsilon$ 经验值约为0.0482 MHz/ $\mu\epsilon$ 。

光纤上各点的布里渊频移变化量与温度变化量和应变变化量均成正比,使用BOTDA和BOTDR均能测量OPGW沿线的应变变化。BOTDR系统采用单端模式探测自发布里渊散射信号,而BOTDA系统采用环形模式探测受激布里渊散射信号,受激布里渊散射信号强度比自发布里渊散射信号强,导致BOTDA比BOTDR具有更高的信噪比<sup>[18]</sup>。衡量BOTDA与BOTDR的性能指标主要包括测量距离、测量精度和空间分辨率,其中测量距离和测量精度主要取决于系统的信噪比<sup>[19]</sup>,而系统的空间分辨率主要取决于泵浦光脉冲的宽度,脉冲宽度越窄,空间分辨率越高,在泵浦光脉冲宽度一定时,为了获取较高的信噪比需要提高入射光的峰值功率,而过高的峰值功率会引起非线性效应,导致测量精度降低。

搭建长距离BOTDA和BOTDR实验系统,进行了性能测试,如图1所示。BOTDA中Pump端口发出的泵浦脉冲光与从Probe端口进入光纤的探测光相互作用,产生受激布里渊散射,实验装置如图1(a)所示,激光器经过耦合器分出两束光,使用电光调制器(EOM)调制出一束泵浦光和一束微波调制的探测光,泵浦光经过扰偏器(PS)扰偏、掺铒光纤放大器(EDFA)放大后通过环形器进入待测光纤,探测光经过光衰减器(VOA)后从另一端进入待测光纤,泵浦光和探测光在光纤中相互作用,产生的

回波信号经过滤波器 (FBG) 后由探测器 (PD) 转换为电信号。BOTDR 采用自发布里渊散射, 结构与 BOTDA 类似, 但需要调制出一束泵浦光和一束参考光, 泵浦光经过环形器进入待测光纤, 回波信号经

过滤波器后与参考光进入 3 dB 耦合器进行混频, 两路输出信号进入平衡探测器 (BD), 再将得到的电信号进行滤波 (Filter) 和检波 (Detection), 其实验装置图如图 1(b) 所示, 系统实物图如图 1(c) 所示。

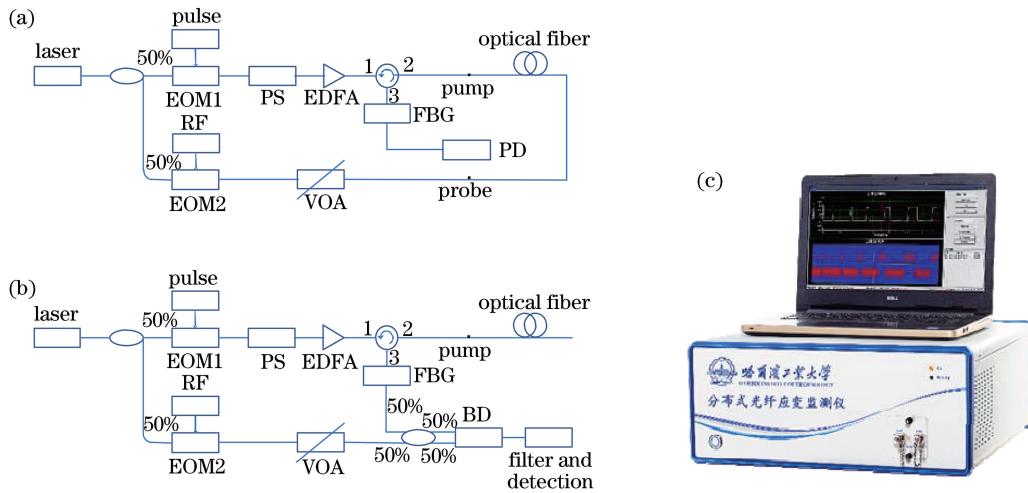


图 1 实验装置框图。(a) BOTDA; (b) BOTDR; (c) 实物图

Fig. 1 Experimental setup. (a) BOTDA; (b) BOTDR; (c) physical photo

在实验室条件下, 使用该系统对损耗为 0.2 dB/km 的裸纤进行长距离测试, 测量结果如图 2 所示。在 BOTDA 测试中, 测试光纤环路总长度为 240 km, 包括 120 km 传感光纤和 120 km 传输光纤, 在 120 km 处使用拉曼放大器对连续探测光进行放大, 系统参数分别设置为: 泵浦光峰值功率 200 mW, 探测光功率 5 mW, 拉曼放大器功率 300 mW, 在 120 km 传感范围内, 空间分辨率 10 m, 尾端精度  $\pm 20 \mu\epsilon$ , 如图 2(a) 所示。在 BOTDR 测试中, 泵浦光峰值功率设置为 300 mW, 有效传感距离可以达到 80 km, 空间分辨率为 50 m, 60 km 处精度为  $\pm 40 \mu\epsilon$ , 80 km 处尾端精度为  $\pm 80 \mu\epsilon$ , 如图 2(b) 所示。两种系统应变精度计算方法均为多次测量的最大应变偏差。测试使用的传感光纤由 2 卷 50 km 和 1 卷 20 km 光纤熔接而成, 不同批次光纤布里渊频移 (BFS) 存在差异, 导致熔接处布里渊频移发生跳变, 该跳变上升沿的 10% 到 90% 之间的距离可以定义为空间分辨率, 用以验证系统空间分辨率。

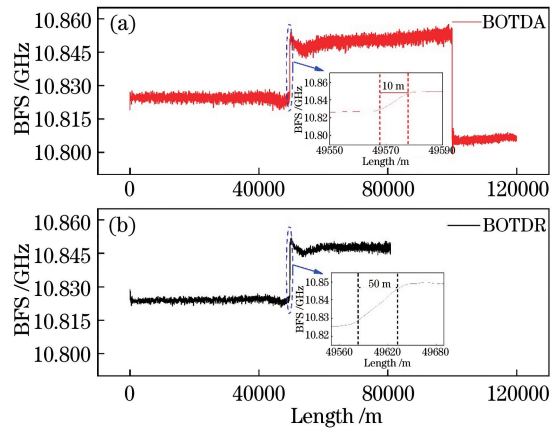


图 2 实验室测量结果。(a) BOTDA; (b) BOTDR

Fig. 2 Measurement results obtained in the laboratory.

(a) BOTDA; (b) BOTDR

### 3 基于 BOTDA/R 的 OPGW 光缆在线监测

#### 3.1 监测方案

针对 2019 年 8 月至 9 月期间湖北地区内某条运行年限超过 15 年的 500 kV 高压输电线在运 OPGW 光缆进行了 BOTDA 与 BOTDR 的对比测试, 该段

OPGW 光缆受过严重冰灾并且运行年限较长, 存在一定的运行风险。BOTDA 和 BOTDR 主机放置于 A 站, 均用于监测 OPGW 光缆中的 13 芯。BOTDA 为双端测量, Pump 端和 Probe 端分别通过跳线连接 A 站配线架的 13 芯和 5 芯端口, 远端放大器的输入端和输出端通过跳线连接 B 站配线架的 13 芯和 5 芯端口, 其监测示意图如图 3(a) 所示。这样, 13 芯、5 芯和远端放大器构成一个监测环路, 环路总长约为 190 km, 其中 13 芯为传感光纤, 5 芯为传输光纤。BOTDR 为单端测量, Pump 端通过跳线连接 A 站配线架的 13 芯, 其监测示意图如图 3(b) 所示。两种方式都能实现 OPGW 光缆的无损在线应变监测。



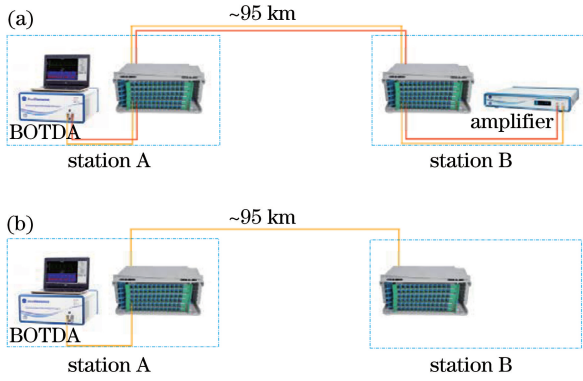


图 3 监测示意图。(a) BOTDA;(b) BOTDR

Fig. 3 Monitoring diagram. (a) BOTDA; (b) BOTDR

### 3.2 测量结果

使用 BOTDA 和 BOTDR 分别测量 OPGW 线路 13 芯,如图 4 所示。13 芯线路长度约为 95 km, BOTDA 能测量全长为 95.14 km 的光纤(测量设备 Pump 端到远端放大器输入端之间的光纤), BOTDR 能测量的有效长度为 68.09 km, BOTDR 实际测量长度小于实验室测量长度是由接头和线路损耗导致的。BOTDA 能够测量整段线路的应变分布, BOTDR 线路后 25 km 的应变无法测量, 如 70 km 后有一处异常区域, 因此可以看出 BOTDA 在测量距离上比 BOTDR 具有明显优势。

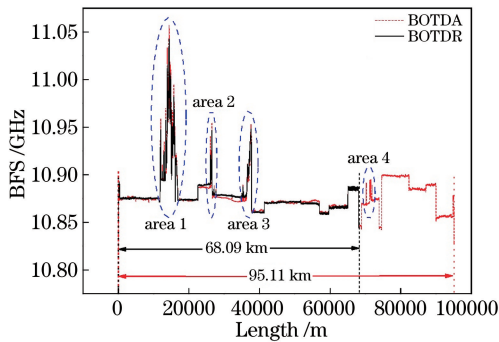


图 4 由 BOTDA、BOTDR 测量的有效距离对比

Fig. 4 Comparison of effective distances measured by BOTDA and BOTDR

由于 BOTDA 信号强于 BOTDR 信号, 导致 BOTDA 测量精度优于 BOTDR, BOTDA 在 95 km 处精度为  $\pm 20 \mu\epsilon$ 。BOTDR 在 68 km 处精度为  $\pm 80 \mu\epsilon$ , 在 60 km 处精度为  $\pm 40 \mu\epsilon$ 。

图 4 中平坦的台阶状信号是由于不同批次光纤的布里渊频移值不一样所致, 可用于光缆熔接处的精确定位。由图 4 可见, 该段光缆中存在 4 个应变异常区域, 如图中 area1~area4, 本段线路曾经遭遇过冰灾, 产生了非弹性应变, 存在着潜在的风险。

两组数据均显示在 12~17 km 范围内有多个

连续应变区域, 即图 4 中的 area1。对比 BOTDA 和 BOTDR 的测量结果, 两种技术测得布里渊频移变化趋势基本一致, 由 13 km 处放大图可以看出, 两组结果在细节处有所不同, 这是由于所使用空间分辨率不同所致。在本次 OPGW 的测试中, BOTDA 使用 10 m 空间分辨率, BOTDR 使用 50 m 空间分辨率, 因此 BOTDA 能够测量更细节的应变变化, 而 BOTDR 只能探测到变化的轮廓, 如图 5 所示。

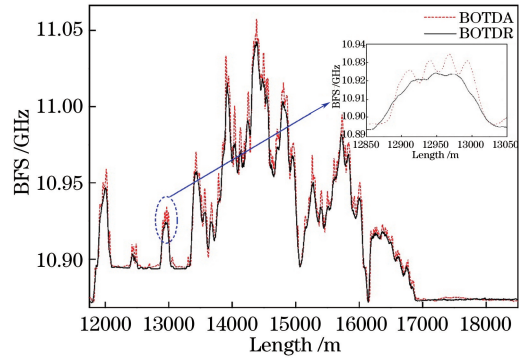


图 5 BOTDA、BOTDR 测量结果对比

Fig. 5 Comparison of results measured by BOTDA and BOTDR

布里渊频移对温度和应变交叉敏感, 为了获得更精确的应变信息, 需要实现准确的温度和应变的信息分离。对于在运 OPGW 光缆, 无法获得布里渊频移的初始值, 因此需要在线路中寻找零应变参考点来实现温度和应变信息的提取。OPGW 光缆在杆塔处熔接, 熔接后盘起来挂在杆塔上, 整个引下线长度为 50~60 m 且不受应力, 可以利用引下线作为零应变参考点, 实现温度与应变信息的解耦, 并将布里渊频移值转换为应变。

放大图 5 中 16 km 处的细节如图 6 所示, 左右两侧的应变区域  $L_1$  和应变区域  $L_2$ 。由于 OPGW 光缆受到应力, 引起光纤布里渊频移变化, 中间引下线处用 BOTDA 能明显看到两段不受力的光缆和光缆熔接处的布里渊频移跳变, 由于引下线长度和 BOTDR 空间分辨率的限制, BOTDR 看不到引下线的细节信息, 无法判断该区域为引下线。

由图 4 可以看出, 12~17 km 处为整条线路中应变的最大区域, 分析该处最大应变值有助于评估 OPGW 光缆运行的安全状况。使用 BOTDA 测量数据, 根据图 6 中引下线位置, 以两段引下线为零应变参考点, 将布里渊频移转换为应变; 使用 BOTDR 测量数据, 以 17~18 km 处零应变区域为参考点, 将布里渊频移转换为应变。由于温度对 OPGW 光缆布里渊频移影响属于缓变过程, 在计算应变时, 认

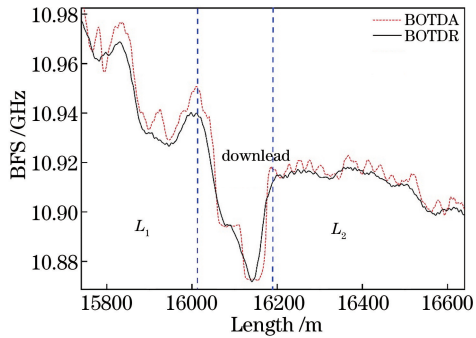


图 6 BOTDA、BOTDR 对引下线测量的结果对比  
Fig. 6 Comparison of download results measured by BOTDA and BOTDR

为 12~17 km 内温度一致,整体去除了温度对布里渊频移的影响。

图 7 为 BOTDA 和 BOTDR 应变对比测试结果,可以看出应变区域  $C_1$  处 BOTDA 测得的应变为 0, BOTDR 测得的应变为 0.05%,这是由于 BOTDR 没有找到引下线,而将两段零应变布里渊频移不同的光纤按相同参考点处理所致。应变区域

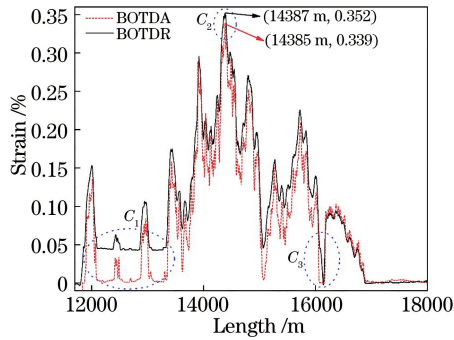


图 7 BOTDA、BOTDR 应变测量结果对比  
Fig. 7 Comparison of strain results measured by BOTDA and BOTDR

$C_2$  处为整条线路应变的最大点, BOTDA 的测量结果为 0.339%, BOTDR 由于参考点选择的原因,测量结果为 0.352%,这也是由于零应变参考点选择错误所致。应变区域  $C_3$  为引下线处, BOTDA 在引下线处应变为 0, BOTDR 显示引下线位置为应变异常区域。引下线可用于杆塔定位和 OPGW 光缆应变计算, BOTDA 具有更高的空间分辨率,在光缆应变数据分析中更具优势。

OPGW 光缆在出厂时一般要求留有一定的余长,正常运行状态下不会产生应变,然而在大跨越、大高差以及长期覆冰状态下,若 OPGW 光缆中余长被完全消耗时,光纤会产生非弹性应变,或者在雷击等故障后 OPGW 会产生断股导致光纤的局部应力异常,且应变值超过安全阈值时,极易造成断纤。文献[1]中指出一般商业光纤在应变  $\leq 0.15\%$  状态下的寿命为无限长,在当应变为 0.35% 时寿命为 11 d,而当应变为 0.55% 时光纤的寿命则小于 2 s,而且在 OPGW 光缆中各点的应力不一致,应力最大值的准确定位及应变值的准确估计能够指导运维人员快速准确地找到薄弱环节,助力 OPGW 光缆早期故障预警与诊断,指导线路运维。

### 3.3 对比分析

综上所述可以看出,在实验室条件下和实际线路中 BOTDA 较 BOTDR 的测量长度更长,在线路满足 BOTDA 量程时可测量整条线路; BOTDA 较 BOTDR 的空间分辨率更高且测量精度更好,容易定位引下线,更有利于线路应力分析; BOTDR 为单端测量,只需一根纤芯,测量方式更简单,若线路长度超过 BOTDA 量程,可使用 BOTDR 从光缆两端分别测量以覆盖全部光缆。

表 1 BOTDA、BOTDR 性能对比

Table 1 BOTDA and BOTDR performance comparison

Equipment	Length	Spatial resolution /m	Accuracy / $\mu\epsilon$	Work mode	Measuring Time /min	Amplifier
BOTDA	120 km	10	$\pm 20$	Loop	5	Need
	in laboratory					
BOTDA	95 km	10	$\pm 20$	Loop	5	Need
	in actual line					
BOTDR	80 km	50	$\pm 80$	Single-ended	8	
	in laboratory					
	68 km					
	in actual line	50	$\pm 80$	Single-ended	8	

## 4 结 论

在同一段 500 kV 特高压 OPGW 光缆中使用

BOTDA 和 BOTDR 系统进行对比测量,两种测量方法都能够反映光纤上的应变变化,但 BOTDA 性能指标优于 BOTDR,能够在更高空间分辨率条件

下实现更长距离的监测,测量精度也优于 BOTDR。在保证测试 OPGW 光缆不出现断芯的情况下,使用 BOTDA 能够更清楚地看出光缆上应变信号的细节,有利于对光缆受力情况进行分析。因此,在固定监测站安装分布式布里渊光纤传感设备时,当线路距离满足 BOTDA 量程时建议安装带有断点检测功能(即 OTDR 功能)的 BOTDA 系统;在线路距离超过 BOTDA 量程时建议在两个站点安装 BOTDR 设备,两端对向测量;若检修单位在巡检时加入应力检测设备,并与原有的 OTDR 设备配合使用时,建议巡检单位使用 BOTDA 与 BOTDR 组合机,以便适应各种应用场合。

## 参 考 文 献

- [1] Chen Z X, Wang Y, Jiang H, et al. Research on performance of icing OPGW cable and application of on-line monitoring technology [J]. Computer Engineering & Software, 2020, 41(1): 152-155.  
陈拽霞, 王颖, 姜辉, 等. 电力 OPGW 光缆覆冰性能研究及在线监测技术应用[J]. 软件, 2020, 41(1): 152-155.
- [2] Chen X H, Huang J H, Zhang J M, et al. Analysis and suggestions on ice overloading of OPGW cables [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2008, 29(9): 8-13, 31.  
陈锡浩, 黄俊华, 张建国, 等. 对遭受冰灾过载 OPGW 的分析和建议[J]. 电力系统通信, 2008, 29(9): 8-13, 31.
- [3] Xu Z L, Zeng Y H, Guo S, et al. Application of intelligent monitoring system for transmission lines based on image recognition technology[J]. Computer Systems & Applications, 2020, 29(1): 67-72.  
徐振磊, 曾懿辉, 郭圣, 等. 基于图像识别技术的输电线路智能监控系统应用[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(1): 67-72.
- [4] Zhang Y. On-line monitoring system of conductor icing on overhead transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1992-1995.  
张予. 架空输电线路导线覆冰在线监测系统[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1992-1995.
- [5] Li Y H, Han J Y, Wang T. Ice monitoring system of overhead electrical power lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 112-115.  
李银华, 韩郡业, 王婷. 架空电力线覆冰监测系统[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 112-115.
- [6] Gong J G, Xu Q S, Hu X G. Real-time monitoring of transmission line ice-coating by simulation conductor [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(12): 20-22.  
龚坚刚, 徐青松, 胡旭光. 输电线路覆冰的模拟导线实时监测[J]. 电力建设, 2010, 31(12): 20-22.
- [7] Ogawa Y, Iwasaki J I, Nakamura K. A multiplexing load monitoring system of power transmission lines using fiber Bragg grating [C] // 12th International Conference on Optical Fiber Sensors. Washington, D.C.: OSA, 1997: 468-471.
- [8] Gangopadhyay T K, Paul M C, Bjerkan L. Fiber-optic sensor for real-time monitoring of temperature on high voltage (400 kV) power transmission line [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 75034M.
- [9] Luo J B, Hao Y P, Ye Q, et al. Measurement for icing load of transmission lines using fiber Bragg grating sensor[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 405-412.  
罗健斌, 郝艳捧, 叶青, 等. 利用光纤光栅传感器测量输电线路覆冰荷载试验[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 405-412.
- [10] Wang B Z, Pang C, Zhou D W, et al. Advances of key technologies in long-range distributed Brillouin optical fiber sensing [J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(9): 170484.  
王本章, 逢超, 周登望, 等. 长距离分布式布里渊光纤传感关键技术进展分析[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 170484.
- [11] Wang J J, Li Y Q. Progress on distributed optical fiber sensing technology in OPGW monitoring [J]. Study on Optical Communications, 2018(3): 25-27.  
王健健, 李永倩. 分布式光纤传感技术在 OPGW 监测中的应用现状[J]. 光通信研究, 2018(3): 25-27.
- [12] Zhang X P, Wu J L, Shan Y Y, et al. On-line monitoring of power transmission lines in smart grid based on distributed optical fiber sensing technology [J]. Optoelectronic Technology, 2017, 37(4): 221-229.  
张旭莘, 武剑灵, 单媛媛, 等. 基于分布式光纤传感技术的智能电网输电线路在线监测[J]. 光电子技术, 2017, 37(4): 221-229.
- [13] Lü A Q, Li Y Q, Li J. Research on strain and temperature measurement of OPGW based on BOTDR [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9044: 90441H.
- [14] Zou L, Sezerman O. Long-term monitoring of local stress changes in 67 km installed OPGW cable using BOTDA [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9634: 963461.
- [15] Li J C, Ge J, Ning N. Running state monitoring of OPGW base on BOTDA [C] // 2009 Yunnan Electric Power Technology Forum. Yunnan: Electric Machine Engineering Institute of Yunnan Province, 2009: 99.

- 李久程, 葛捷, 宁娜. 基于 BOTDA 的 OPGW 运行状态监测 [C]//2009 年云南电力技术论坛论文集. 昆明: 云南省电机工程学会, 2009: 99.
- [16] Qin Z Y, Liu W X, Pan Z Z, et al. Optical Brillouin distributed ice-coating identification technology on transmission line [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(10): 6-11.
- 覃兆宇, 刘卫新, 潘哲哲, 等. 光纤布里渊分布式输电线路覆冰识别技术 [J]. *光电工程*, 2016, 43(10): 6-11.
- [17] Zhou D W, Wang B Z, Ba D X, et al. Fast distributed Brillouin optical fiber sensing for dynamic strain measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328005.
- 周登望, 王本章, 巴德欣, 等. 用于动态应变测量的快速分布式布里渊光纤传感 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328005.
- [18] Dong Y K, Zhang H Y, Chen L, et al. 2 cm spatial-resolution and 2 km range Brillouin optical fiber sensor using a transient differential pulse pair [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(9): 1229-1235.
- [19] Wang J J, Li Y Q. Review of methods for improving performance of Brillouin optical time-domain analysis system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110003.
- 王健健, 李永倩. 布里渊光时域分析系统性能提高方法综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 110003.