

基于布里渊频移特征的 OPGW 光缆接续杆塔与断纤定位方法

夏猛^{1,2}, 汤晓惠², 王颖³, 张书林³, 姜辉³, 张琦⁴, 董永康^{1*}

¹哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

²睿科光电技术有限公司, 辽宁 鞍山 114000;

³国家电网有限公司信息通信分公司, 北京 100761;

⁴哈尔滨理工大学黑龙江省量子调控重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 光纤复合架空地线(OPGW)接续杆塔与断纤的准确定位对于电力通信网络运行维护具有重要意义。目前 OPGW 光缆故障定位普遍采用光时域反射仪(OTDR)测量断点距离及衰减信息,由于 OTDR 测量结果为光纤长度,无法与杆塔明细表中记录的物理距离一一对应,且 OTDR 在长距离测量时受限于空间分辨率,无法实现光纤接续点、断纤与物理杆塔的准确对应,故提出一种利用多根纤芯布里渊频移跳变和引下线处布里渊频移特征实现 OPGW 光缆接续杆塔精准定位的方法。通过比对断纤与完好纤芯的布里渊频移,实现了光缆故障的精准定位。同时,本文提出的方法在实际 OPGW 线路运维工作中得到了初步应用,实现了 OPGW 光缆接续杆塔及故障纤芯的精准定位,为电力 OPGW 光缆的精细化运维提供了新的技术支撑手段。

关键词 光纤光学; 接续杆塔定位; 断纤分析; 光纤复合架空地线

中图分类号 O437.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1906003

Connection Tower and Fiber Breakpoint Location Method for OPGW Based on Brillouin Frequency Shift Characteristics

Xia Meng^{1,2}, Tang Xiaohui², Wang Ying³, Zhang Shulin³, Jiang Hui³,
Zhang Qi⁴, Dong Yongkang^{1*}

¹National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

²Real Photonics Co., Ltd., Anshan, Liaoning 114000, China;

³State Grid Information & Telecommunication Branch, Beijing 100761, China;

⁴Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Quantum Manipulation & Control, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract The accurate location of optical fiber composite overhead ground wire (OPGW) connection towers and fiber breakpoints is of great significance to the operation and maintenance of power communication networks. At present, during OPGW fault location, the optical time-domain reflectometer (OTDR) is generally used to measure breakpoint distances and attenuation information. Since the OTDR measurement result is fiber length, which does not correspond to the physical distance recorded in the tower schedule. In addition, the OTDR is limited by the spatial resolution when measuring long distances, making the fiber connection points and fiber breakpoints do not correspond to the towers. In response, this paper proposed a method that used the Brillouin frequency shift hopping

收稿日期: 2021-02-26; 修回日期: 2021-04-08; 录用日期: 2021-04-19

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资助

通信作者: *aldendong@163.com

in multiple fiber cores and the characteristics of the Brillouin frequency shifts of the downleads to achieve precise location of the OPGW connection towers. Precise OPGW fault location was achieved by comparing the Brillouin frequency shifts of the broken fiber cores and the intact fiber core. Moreover, the method proposed in this paper has been initially applied in actual OPGW line operation and maintenance. As a result, precise location of the OPGW connection towers and the faulty fiber cores have been achieved. This study provides a new technical support method for the refined operation and maintenance of the OPGW.

Key words fiber optics; connection tower location; fiber breakpoint analysis; optical fiber composite overhead ground wire

OCIS codes 060.2370; 060.4370; 280.4788; 290.5830

1 引言

光纤复合架空地线(OPGW)兼具普通地线和通信光缆的功能,目前在电力通信网中被大规模应用。由于其特有的架设方式,OPGW 在运行中承受来自机械及自然环境等因素的影响,难免出现故障。以国家电网有限公司电力骨干通信网为例,根据《2020 年度国家电网公司电力通信系统统计年报》,截至 2020 年底,其电力骨干通信网 OPGW 光缆总里程已达 156.92 万千米以上,其中约 25% 的光缆运行超过 15 年,在近 5 年的 OPGW 故障中,以光缆中部分纤芯劣化为表象的故障占比超过 60%^[1],电力骨干通信网 OPGW 光缆面临体量大、运行年限长及故障频发的多重考验。

目前,OPGW 光缆的故障处理手段是利用光时域反射仪(OTDR)进行长度及衰减测量,进而采用人工及无人机巡检^[2]的方式对故障进行复核。然而,线路的设计与维护资料中记录的是杆塔间的物理档距,OTDR 所测光纤的长度与杆塔物理位置的对应关系受光缆引下线、余长、弧垂、蠕变、地形、高差的影响存在累计误差。同时,由于早期建设的线路随着技改、维护权限的转移以及维护人员的变更导致线路资料与实际不完全相符,对故障处理人员经验要求极高,故障排查范围通常会覆盖几基杆塔,增加了人力及无人机的工作强度,影响了故障判别的准确度及时效性。因此,建立 OPGW 光缆熔接盒所在杆塔(文中简称接续杆塔)与光纤长度的关系数据库对 OPGW 光缆的维护具有重大意义。同时,精确的故障定位可以指导无人机进行重点区域的细节拍摄,实现故障的高效诊断。

分布式光纤传感技术具有监测距离长、分布式、灵敏度高、无需外置传感器、抗电磁干扰等诸多优势,已被用于输电线路的覆冰^[3-5]、雷击闪络^[6]、舞动^[7]、融冰监控^[8]等在线监测中。黄良等^[9]研究了基于布里渊光时域反射技术(BOTDR)的光纤定位方法,利用接续盒两端续接光纤的初始布里渊频移

(BFS)差异以及金具绞丝包裹方式造成的温度差异进行杆塔的定位。在实际应用中,利用一根光纤布里渊频移进行杆塔定位时存在部分接续杆塔覆盖不全的问题,影响杆塔的定位效果。

本文提出利用 OPGW 光缆中多根纤芯的布里渊频移跳变信息以及接续杆塔引下线处纤芯布里渊频移微特征,将光纤的长度与线路接续杆塔位置进行准确标定,在此基础上实现了基于布里渊频移的光缆故障精准定位。该方法已在国家电网公司一级骨干通信网部分在运 OPGW 光缆线路中得到应用,初步验证了该方法的有效性。同时,阐述了光纤中产生布里渊散射及光缆接续点处光纤布里渊频移跳变的理论基础,并结合应用情况,阐述了基于布里渊频移特征的 OPGW 光缆接续杆塔定位及光缆断纤定位方法。

2 理论与仿真

布里渊散射是光纤中入射光场与介质声波场相互作用产生的非弹性光散射,分为自发布里渊散射和受激布里渊散射^[10],其中自发布里渊散射是由组成光纤的粒子自发热运动引起光纤密度周期性变化而产生声波场,受激布里渊散射是由电致伸缩效应产生声波场^[11]。这两种声波场都会周期性地改变光纤折射率,并以声速在光纤中传播,入射光与声波场相互作用产生的背向散射光由于多普勒效应产生频率漂移,称之为布里渊散射频移^[12-13],表达式为

$$\nu_B = \frac{2n}{\lambda_0} \sqrt{\frac{(1-k)E}{(1+k)(1-2k)\rho}}, \quad (1)$$

式中, n 为折射率, λ_0 为入射光波长, k 为泊松比, E 为杨氏模量, ρ 为光纤介质的密度。

布里渊频移受光纤中温度和应变变化的影响,其变化量与温度和应变的变化量呈线性关系,可以通过布里渊频移的变化得到光纤中各点的温度和应变变化,实现分布式温度和应变传感。布里渊频移 ν_B 与折射率 n 、泊松比 k 、杨氏模量 E 及光纤介质密度 ρ 相关,而这些参量均与光纤材质、结构、制造工

艺相关,因此不同厂家、类型、批次的光纤初始布里渊频移不完全一致。

在 BOTDR 系统中,由自发布里渊散射产生的 Stokes 光与泵浦光和声波场之间相互作用,构成的三波耦合方程可表示为^[14-15]

$$\frac{\partial E_p}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_p}{\partial t} = i\kappa E_s \rho, \quad (2)$$

$$-\frac{\partial E_s}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_s}{\partial t} = i\kappa E_p \rho^*, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{1}{2} \Gamma_B + i(\Omega_B - \Omega) \right] \rho = i\Delta E_p E_s^*, \quad (4)$$

式中: E_p 、 E_s 和 ρ 定义为泵浦光、Stokes 光和声波场光场强度; Ω_B 是布里渊频移角频率($\Omega_B = 2\pi\nu_B$); Ω 是泵浦光和 Stokes 光的角频率差; Γ_B 为声子衰减速度; κ 为弹光系数; Δ 为电致伸缩系数。实际测试结果表明,线路中所使用的 G. 652 光纤初始布里渊频移一般为 10.8~10.9 GHz。根据三波耦合方程仿真光纤熔接处布里渊频移的跳变,光纤总长度为 100 m,前 50 m 布里渊频移为 10.8 GHz,后 50 m 布里渊频移为 10.85 GHz,泵浦脉冲宽度为 40 ns,峰值功率为 1 W,仿真结果如图 1 所示。图 1(a)为光纤布里渊频移,图 1(b)为光纤上每个点的布里渊增益谱(BGS)构成的三维(3D)图,布里渊增益谱满足洛伦兹分布,其中心频率就是布里渊频移。图 1 中光纤布里渊频移在 50 m 处产生跳变,整个过渡区长度为 4 m,仿真结果表明布里渊频移不同的两根光纤熔接处存在布里渊频移跳变,且过渡区域长度为空间分辨率。

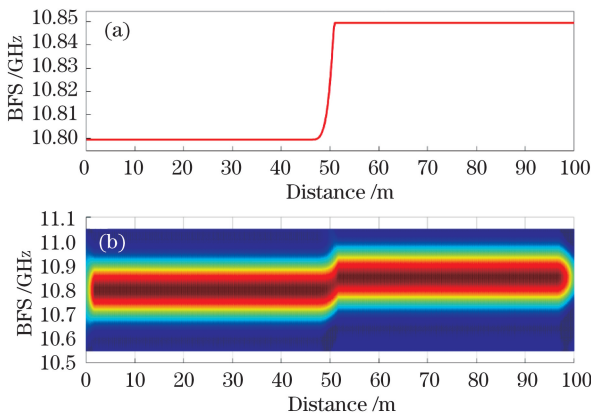


图 1 布里渊频移跳变仿真结果。(a) 布里渊频移;
(b) 布里渊增益谱三维图

Fig. 1 BFS hopping simulation results. (a) BFS; (b) 3D BGS

3 接续杆塔定位分析

在电力通信网络中,为满足长距离通信的要求,

通常在接续杆塔处对两段 OPGW 光缆进行熔接。由于不同厂家、不同类型甚至同一类型不同批次的光纤布里渊频移存在一定的差异,两根初始布里渊频移不同的光纤在熔接处会发生布里渊频移跳变,可通过该现象识别接续点,并结合杆塔明细表定位接续杆塔。如果布里渊频移相同的两根光纤相互熔接,接续点处就不会产生布里渊频移跳变,因此利用一根光纤的布里渊频移差异能够定位接续杆塔存在覆盖不全的问题。由于 OPGW 光缆内有多根纤芯,可以综合考虑多根空余纤芯布里渊频移,若某一位置至少有一根光纤的布里渊频移发生跳变,则判定此处为接续点。在图 2 中,A 线路 A24# 纤芯在 L1 处无布里渊频移变化,无法利用一根 A24# 纤芯光纤准确定位接续点,但 A21# 纤芯在此处存在布里渊频移跳变,可以通过 A21# 纤芯 L1 处布里渊频移跳变定位此处为接续点,且接续点处于布里渊频移跳变区域的中心位置,A21# 纤芯 L1 处布里渊频移跳变与仿真结果一致。

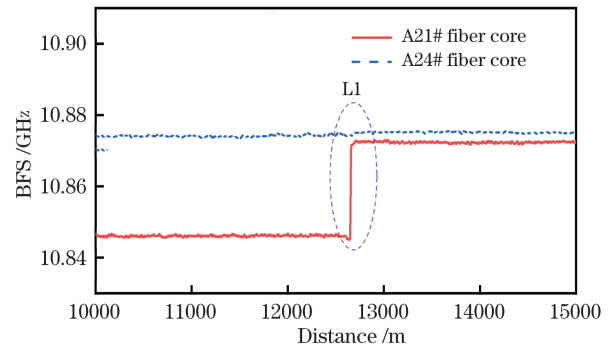


图 2 布里渊频移跳变

Fig. 2 BFS hopping

接续杆塔处两段 OPGW 光缆由金具固定在塔顶,两侧引下线延伸到地面并在接续盒内完成两段光缆的熔接,熔接后再将引下线盘起,连同接续盒一同固定在杆塔上。由于两金具为 OPGW 光缆承力点,且金具中间引下线部分光纤不受力,若金具处光纤由于余长耗尽而受到应力时,金具处布里渊频移就会明显高于引下线处布里渊频移,且金具处会出现布里渊频移跳变,由此可以将两段引下线中间位置判定为接续点。如图 3 所示,比较 A 线路 A17#、A21#、A24# 3 根纤芯在 L2 处布里渊频移,其中 A17# 纤芯在此处布里渊频移明显低于两侧,且出现布里渊频移跳变,满足引下线处布里渊频移特征,故将 L2 处判定为接续点。

利用上述杆塔定位方法在实际 OPGW 光缆线路中测试定位效果,首先测量 A 线路,将 A17#、A21#、

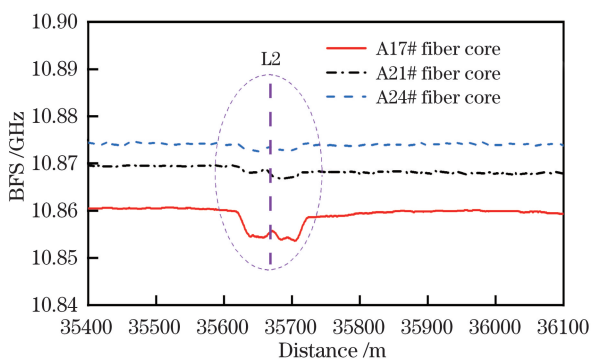


图 3 引下线布里渊频移特征
Fig. 3 Download BFS characteristics

A24# 纤芯的光纤布里渊频移曲线绘制于图 4 中, 根据资料记载的杆塔档距、高度、海拔高度、引下线长度等信息, 利用 CAD 画出真实比例的接续杆塔间隔图, 最后将杆塔间隔图与布里渊频移曲线按比例置于图 4 中, 并标注接续杆塔与布里渊频移对应的位置关系。如图 4 所示, 线路中共有 25 个接续杆塔, 对比分析 A17#、A21#、A24# 纤芯的布里渊频移, 利用布里渊频移跳变共定位 22 个接续杆塔, 利用引下线处布里渊频移特征可以定位余下的 317#、365#、409# 3 个杆塔, 通过上述两种接续杆塔处的布里渊频移特征可准确定位全部接续杆塔。

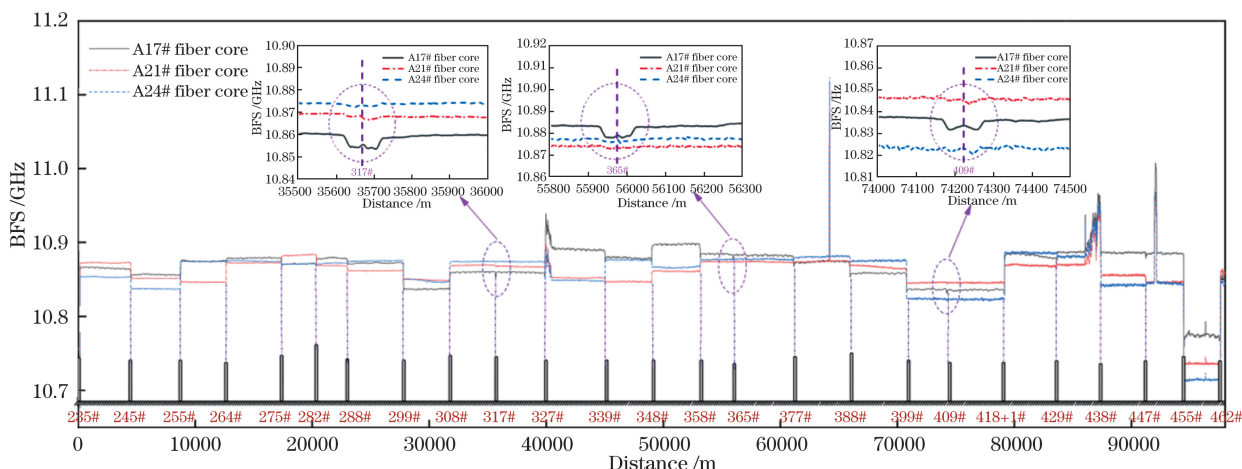


图 4 利用引下线布里渊频移特征实现杆塔定位

Fig. 4 Connection tower positioning by download BFS characteristics

在 OPGW 光缆线路 B 线中, 如图 5 所示, 线路中共有 24 个接续杆塔, 通过 B6# 纤芯布里渊频移跳变定位到 19 个接续杆塔, 准确率为 79.2%, 利用 B6#、B11# 两根纤芯布里渊频移跳变共定位到

23 个接续杆塔, 准确率为 95.8%, 利用 B6#、B11#、B13# 3 根纤芯布里渊频移跳变共定位到 24 个接续杆塔, 准确率为 100%, 可以看到利用多根纤芯的布里渊频移跳变可以更准确地定位接续杆塔。

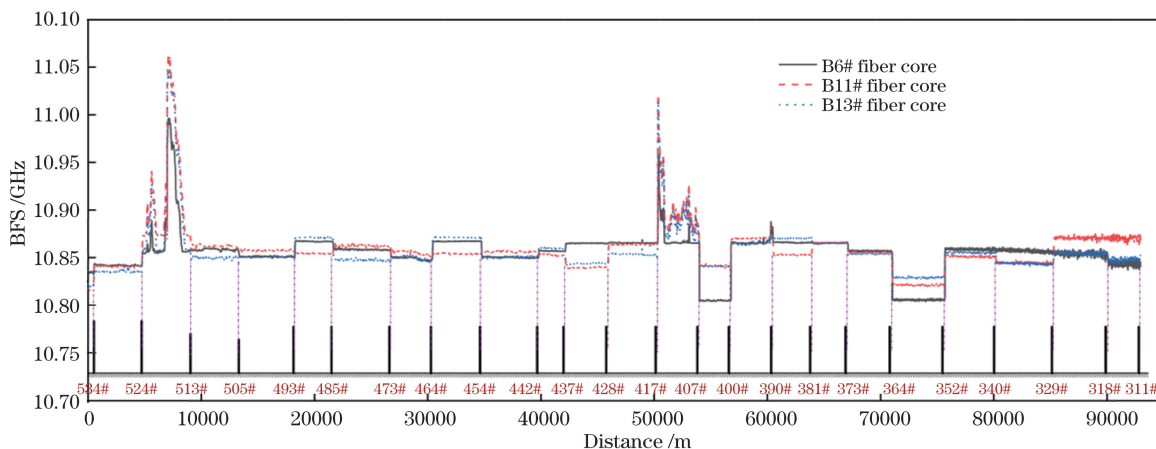


图 5 利用布里渊频移跳变实现杆塔定位

Fig. 5 Connection tower positioning by BFS hopping

如果在布里渊频移跳变或引下线处没有对应接续杆塔, 则说明在后期维护过程中存在换线或增塔

等情况, 通过布里渊频移和已知线路信息进行相互验证, 能够实现准确的接续杆塔定位。图 6 是 C 线

两次测试结果对比图,其中图 6(a)测试时间为 2019 年 9 月,图 6(b)测试时间为 2020 年 11 月,对比结果显示 667 # -668 # 杆塔间更换了一段新的 OPGW 光缆,668 # 杆塔处增加了接续盒。同时可

见,图 6 中 682 #、693 #、705 #、712 # 杆塔处图 6(b) 中的频移跳变点相比于图 6(a)均后延约 130 m,这是由于 668 # 杆塔处增加了接续点,且增加了两个引下线的长度。

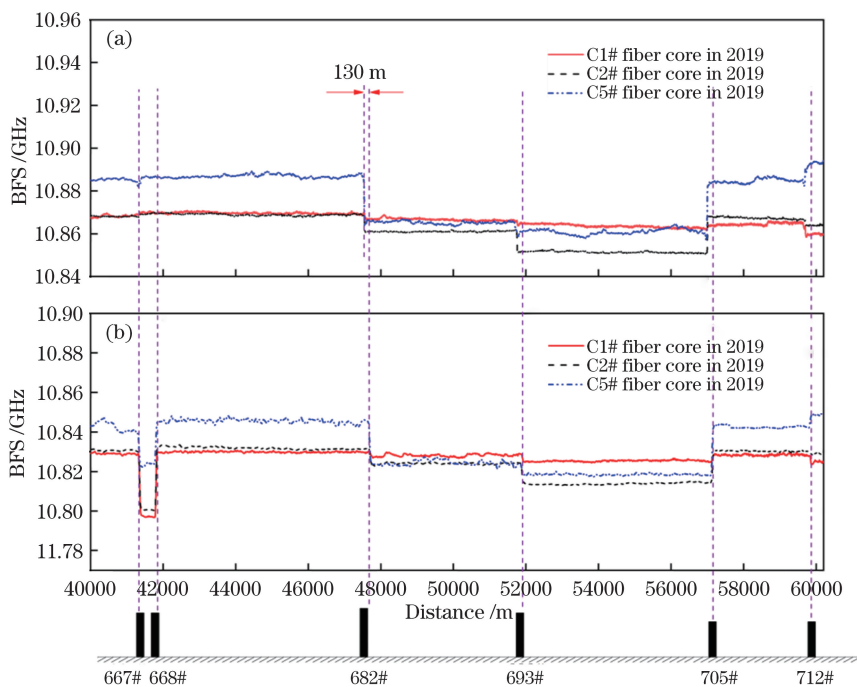


图 6 OPGW 光缆换线前后的数据对比。(a)2019 年测试结果;(b)2020 年测试结果

Fig. 6 Data comparison before and after OPGW optical cable swapping. (a) Results in 2019; (b) results in 2020

4 断纤定位分析

图 7 是 A 线路中 Z 站至 L 站光缆示意图,两站之间距离为 98 km,测量结果显示 A17 # 纤芯完好, A3 # 纤芯在 23 km 处中断, A6 #、A7 #、A10 #、A12 #、A18 # 5 根纤芯在 40 km 处中断,后文分析

以 A18 # 纤芯为例。根据布里渊频移跳变和引下线处的布里渊频移特征识别 OPGW 光缆的光纤接续点,再配合杆塔信息完成杆塔定位,判别断纤位置对应的杆塔,最后对比断纤处中断纤芯与完好纤芯的布里渊频移,实现断纤的精准定位,并对断纤原因进行分析。

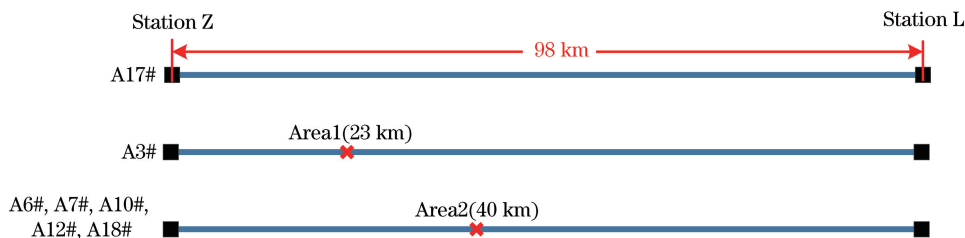


图 7 OPGW 光缆断纤区域分布示意图

Fig. 7 Area distribution of OPGW optical cable fiber breakage

故障区域 1 的布里渊频移曲线如图 8 所示, A3 # 故障纤芯在 282 # 杆塔处中断。为更清楚地显示断纤处布里渊频移曲线,图 8 插图中使用左侧坐标轴表示 A3 # 纤芯布里渊频移,右侧坐标轴表示 A17 #、A18 # 纤芯布里渊频移,两坐标轴布里渊频移差为 25 MHz。比较该故障区域 A3 # 纤芯与完好纤芯的布里渊频移曲线,可以看出 A17 #、A18 #

纤芯在此处均发生布里渊频移跳变,该区域为 282 # 杆塔引下线,且 A3 # 纤芯中断位置在 282 # 杆塔引下线的中间位置处,断点在接续盒内光纤熔接处。由于光纤在 OPGW 光缆内受到铝管或不锈钢管的保护,在 OPGW 光缆结构未损坏的情况下不易发生断纤,但光缆在接续处为裸纤熔接,且固定在接续盒内,当温度和应变变化导致 OPGW 光缆

拉伸或收缩时,接续盒内光纤余长发生变化,接续盒内熔接处光纤容易被拉断,同时接续盒内进水等原因也会引起光纤故障。经验证明,排除雷击等其他因素的影响,OPGW 的故障多发生在接续盒内。

测量并对分析多根纤芯布里渊频移,不仅能更准确地实现杆塔定位,通过分析断纤处完好纤芯布里渊频移的变化,也能够对故障点进行精准定位,并分析其故障原因。

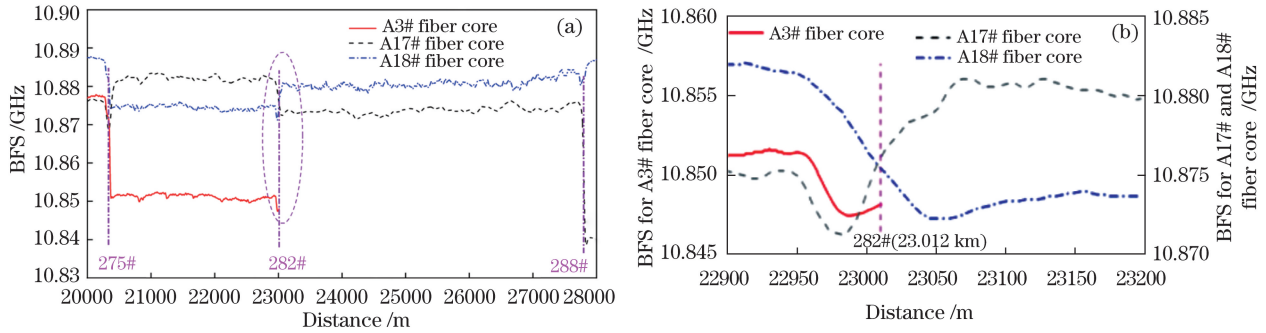


图 8 区域 1 断纤分析。(a)完整图;(b)椭圆虚线标识处的细节图

Fig. 8 Fiber breakpoint analysis at area 1. (a) Whole graph; (b) detail graph at dotted elliptical line

故障区域的 2 布里渊频移曲线如图 9 所示,图 9(a)是 Z 站向 L 站的测试结果。图 9(b)为 L 站向 Z 站的测试结果,由图 9(a)中布里渊频移跳变区域的放大图可知,该区域位于 327 # 杆塔引下线处, T1、T2 为塔顶金具处光缆的引下线位置。结合杆塔信息可知,T1 是 327 # 塔顶的 Z 站侧金具处,T2

是 327 # 塔顶的 L 站侧金具处。对比故障纤芯和完好纤芯的布里渊频移可知,断纤发生在 327 # 杆塔引下线位置,且靠近塔顶 Z 站侧 T1 金具。利用 BOTDR 由 L 站向 Z 站测量多根纤芯布里渊频移,如图 9(b)所示,故障纤芯经过 327 # 杆塔引下线后未到达 T1 金具处就出现了断纤,故可知故障点出现在

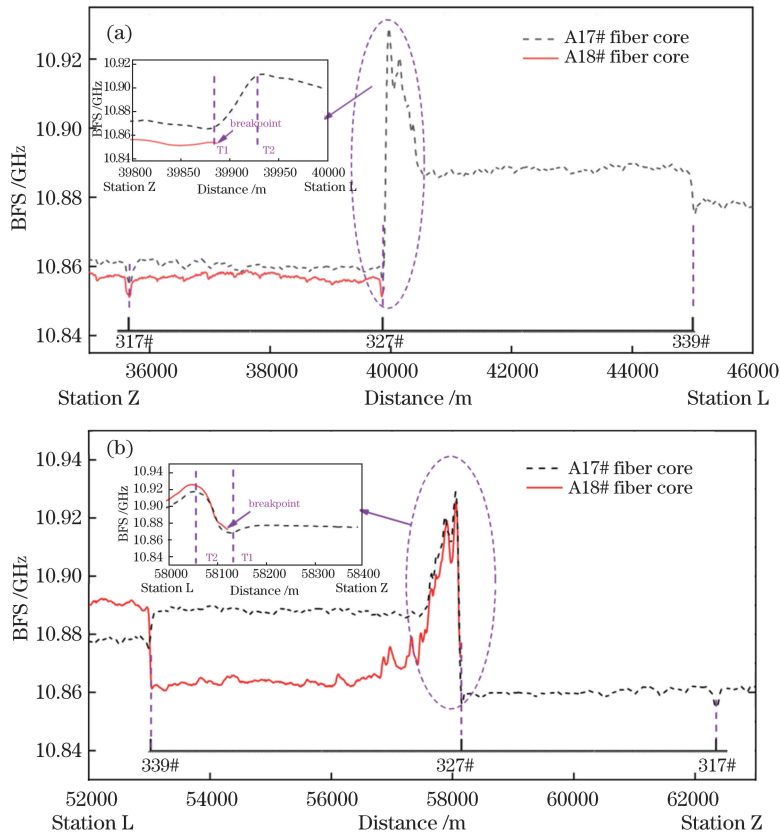


图 9 区域 2 断纤分析。(a) Z 站到 L 站;(b) L 站到 Z 站

Fig. 9 Fiber breakpoint analysis at area 2. (a) Station Z to Station L; (b) Station L to Station Z

327#杆塔引下线位置,且靠近 Z 站侧塔顶金具,该故障点的定位结果与对向测量结果一致。若断纤发生在杆塔附近,通过对比故障点与完好纤芯布里渊频移差

异能够定位故障位置,若断纤发生在线路档距中间,可以利用故障点与左右两个接续杆塔相对距离定位故障位置。接续杆塔与断纤定位的方法流程如图 10 所示。

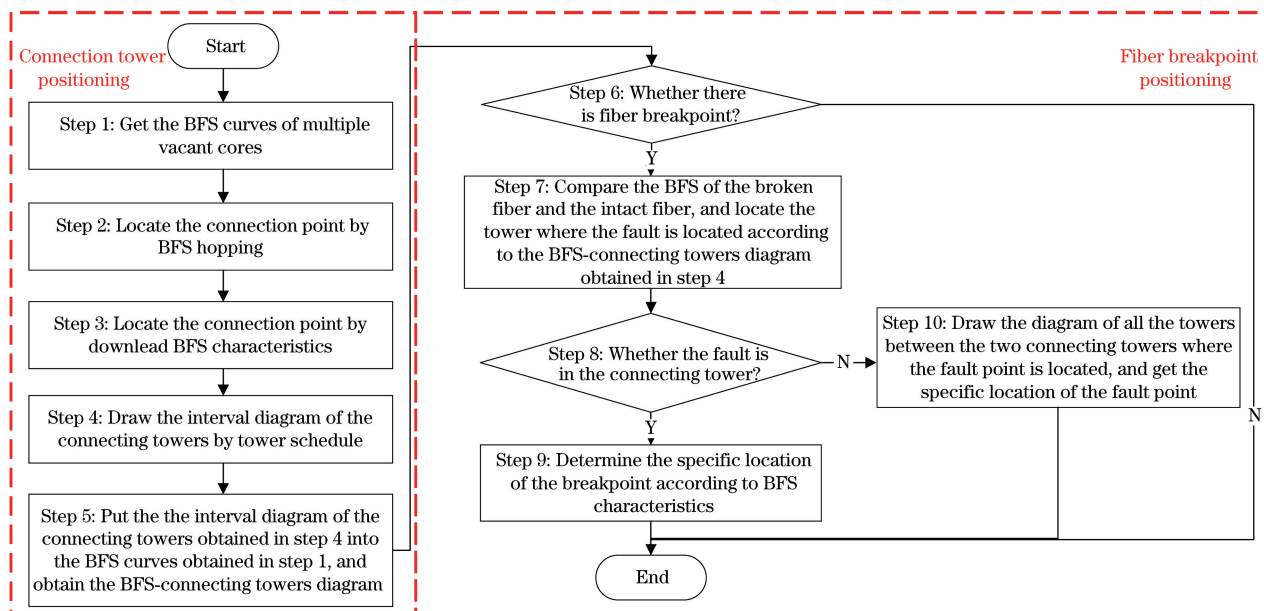


图 10 接续杆塔与断纤定位流程图

Fig. 10 Connection tower and fiber breakpoint positioning flow chart

为了验证断纤定位的准确性,利用无人机拍摄 327#杆塔引下线照片,进一步对断纤故障进行现场复核。如图 11 所示,现场拍摄图片显示 327#杆塔 Z 站侧 OPGW 光缆引下线的导体存在豁口,破坏了 OPGW 光缆结构,导致内部光纤中断,印证了故障定位结果的有效性。当由雷击、电腐蚀等因素导致线路档距中 OPGW 光缆外表面出现破损、光纤断裂时,可以先根据杆塔明细表绘制出断纤位置两侧接续点之间的所有杆塔,再对故障点进行精准定位,由此可显著地提高无人机的效率。



图 11 故障现场图片

Fig. 11 Picture of the fault scene

5 结 论

利用多根光纤布里渊频移跳变可以准确定位接

续杆塔,解决单根光纤定位覆盖不全的问题。若光纤熔接处无布里渊频移跳变,可以利用引下线处布里渊频移特征定位接续杆塔。当接续杆塔处发生断纤时,首先定位断纤故障所在杆塔,再通过对比故障纤芯和完好纤芯的布里渊频移找到故障点和接续点的相对位置关系,进而实现断纤故障的精准定位。当断纤发生在线路档距中间时,可以利用故障点与相邻两个接续杆塔的相对位置定位故障位置。通过分析 OPGW 光缆内多根空余纤芯的布里渊频移,能够实现接续杆塔定位,并对故障进行定位和对断纤的原因进行分析。通过准确判定故障点与熔接点的位置关系,利用机房的在线故障诊断代替传统拆开接续盒的离线检修,可为发生于线路中无外表皮损伤的故障点定位提供一种行之有效的解决方法,同时也为电力 OPGW 光缆的精细化运维提供新的技术支撑手段。

参 考 文 献

- [1] Chen Z X, Wang Q M, Wang Y, et al. Research and application of physical performance detection index system for power OPGW fault optical cable [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(5): 64-68.
陈拽霞, 王乔木, 王颖, 等. 电力 OPGW 故障光缆物理性能检测指标体系的研究与应用[J]. 电力信息与

通信技术, 2020, 18(5): 64-68.

- [2] Sui Y, Ning P F, Niu P J, et al. Review on mounted UAV for transmission line inspection[J/OL]. Power System Technology: 1-15[2021-02-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20201125.0858.004.html>.
隋宇, 宁平凡, 牛萍娟, 等. 面向架空输电线路的挂载无人机电力巡检技术研究综述[J/OL]. 电网技术: 1-15 [2021-02-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20201125.0858.004.html>.
- [3] Yang D, Liu Y, Wang S R, et al. Research on icing monitoring of OPGW transmission line[J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(4): 7-11.
杨滴, 刘燕, 王世蓉, 等. 输电线路覆冰监测的 OPGW 传感应用研究[J]. 电力大数据, 2018, 21(4): 7-11.
- [4] Hao Y Q, Liu N N, Kun Y, et al. Online ice-coating monitoring research on overhead transmission lines with Brillouin optical time domain reflectometry[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 60: 102339.
- [5] Shang H, Huang Z T. OPGW cable icing status monitoring based on BOTDR[J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2073: 020065.
- [6] Lu L D, Sun X Y, Bu X D, et al. Study on passive, wide area and multi-state parameter monitoring and diagnosis for power transmission lines [C] // 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), November 6-8, 2018, Guangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018: 3903-3907.
- [7] 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.
张旭苹, 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.
- [8] Lei Y Q, Hou B S, Tong J, et al. Monitoring method of icing thickness and ice melting temperature of transmission line using all-optical fiber[J]. Optical Communication Technology, 2016, 40(11): 58-59.
雷煜卿, 侯宝素, 仝杰, 等. 一种全光纤输电线覆冰及融冰监测方法[J]. 光通信技术, 2016, 40(11): 58-59.
- [9] Huang L, Lü Q S, Lu J K, et al. Analysis on fiber optic positioning tower of transmission line [J]. Study on Optical Communications, 2017(5): 36-38.
黄良, 吕黔苏, 卢金科, 等. 基于光传感技术的电网光纤定位杆塔方法[J]. 光通信研究, 2017(5): 36-38.
- [10] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]. 4th ed. New York: Academic Press, 2007.
- [11] Zhu T, Zheng H, Zhang J D. Progress in research of Brillouin optical time domain analysis for dynamic strain sensing[J]. Journal of Applied Sciences, 2020, 38(2): 197-214.
朱涛, 郑华, 张敬栋. 布里渊光时域分析动态应变传感技术研究进展[J]. 应用科学学报, 2020, 38(2): 197-214.
- [12] Bao Y B, Sun J Q, Huang Q. Distributed fiber sensor based on Brillouin optical time domain reflection technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 210002.
包宇奔, 孙军强, 黄强. 布里渊光时域反射仪分布式光纤传感研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 210002.
- [13] Wang T, Tian F, Tang W Q, et al. Brillouin frequency shift extraction method for distributed optical fiber temperature sensing system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170631.
王婷, 田凤, 汤文青, 等. 分布式光纤温度传感系统的布里渊频移提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170631.
- [14] Wang B Z, Dong Y K, Ba D X, et al. High spatial resolution: an integrative review of its developments on the Brillouin optical time- and correlation-domain analysis[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(5): 052001.
- [15] Nishiguchi K. Analytical solution to equations of Brillouin optical time domain reflectometry and its properties[J]. Proceedings of the ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, 2012, 2012: 370-376.