光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022060102

基于三次样条函数的光栅传感光缆舞动波长估计

郭庆瑞[1]，尹　军[2]，李亚平[2]，张志军[2]，解　鹏[2]，张骞子[3]*

（1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院，乌鲁木齐 830000；2. 国网新疆电力有限公司，乌鲁木齐 830000；
3. 北京物联感知科技有限公司，北京 101100）

摘　要： 基于光栅传感的分布式光纤复合架空地线(OPGW)健康监测得到了广泛研究。针对OPGW光缆舞动事件，提出一种基于三次样条函数拟合的舞动波长预测方法。首先，通过理论推导，建立光栅传感相位变化量与舞动波长的数学联系；然后，利用仿真分析理想舞动情况下信号三次样条函数拟合前后的相移信号结果，初步证明了所提方法的有效性；最后，将其应用在某220 kV线路，对比分析典型弱风环境及强风环境下的舞动监测强度图。实际监测结果表明，所选取方法能够有效改善强度图信号特征，可得出强风条件下档距内舞动波长约为200 m，弱风条件下档距内舞动波长约50 m。该方法为舞动事件的图像识别智能监测提供技术参考，具有较好的应用前景。

关键词： 光纤光栅；舞动监测；健康监测；光纤复合架空地线

中图分类号： O436；TP212　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1190－07

Galloping Wavelength Estimation of Fiber-optic Grating Sensor Based on Cubic Spline Function

GUO Qingrui[1], YIN Jun[2], LI Yaping[2], ZHANG Zhijun[2], XIE Peng[2], ZHANG Qianzi[3]

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd, Urumchi 830000, CHN;
2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd, Urumchi 830000, CHN;
3. Wuhan CommScope Evergreen Software Technology Co., Ltd, Wuhan 430073, CHN)

Abstract: Distributed optical fiber composite overhead ground wire (OPGW) health monitoring based on FBG (fiber Bragg grating) sensor has been widely studied. In this paper, a wave prediction method based on cubic spline function fitting is proposed for OPGW galloping cable event. Firstly, the mathematical relation between the phase variation of sensor and the galloping cable wavelength was established through theoretical derivation. Then, the simulation results of the phase shift signal before and after the cubic spline function fitting under ideal galloping condition were analyzed, and the effectiveness of the proposed method was proved. Finally, it was applied to a 220 kV line, and the intensity graphs of galloping monitoring in typical weak wind environment and strong wind environment were compared and analyzed. According to the actual monitoring results, the method selected in this paper can effectively improve the signal characteristics of intensity graphs, and it can be concluded that the wavelength within the range is about 200 m under strong wind condition, and the wavelength within the range is about 50 m under weak wind condition. This method provides technical reference for intelligent monitoring of image recognition of cable galloping events and has strong application prospect.

Key words: fiber Bragg grating; galloping monitoring; health monitoring; fiber optic composite overhead ground wire

收稿日期：2022－06－01.

* **通信作者：**张骞子 **E-mail:** 13911216617@139.com

0　引言

近年来，全球低温、雾霾、雨雪、冰雹等灾害天气频发[1-2]，具有不可预见性和不可抗拒性特征的自然灾害对输电线路的安全运行造成了巨大威胁[3-4]。其中低温雨雪的出现将使输电线路产生不均匀覆冰，在强风激励下易产生多周期、大振幅、低频率的舞动[5-6]。当输电线路部分档距处于舞动状态时，极易导致线路损坏，从而导致断电跳闸等事故发生[7]。

为预防输电线路事故发生，对舞动高频易发区域进行健康监测能够实时跟踪线路状态，从而反演估计当下光缆运动及受力状态[8]，为线路除冰预防提供参考。业界当下一般利用电子传感及图像采集监控方式实现对光纤复合架空地线（OPGW）工作过程分析判断[9]，但该方式受环境电磁干扰或其他天气因素影响较大。基于光纤传感技术的 OPGW 光缆由于其轻量化、小体积、可分布式布放等优势在输电线路监测领域得到了重点关注[10]，将传感光纤段置于架空线光缆包层内部，获取光缆可靠数据的同时不会增加外置冗余设备，具有良好应用前景[11]。考虑到 OPGW 光缆覆冰时的典型环境特征，覃兆宇等[12]将布里渊传感技术应用于线路覆冰状态监测，通过计算布里渊频移表征得到的温度及应变来估计覆冰位置，但该方法仅当光缆受力大于 60％额定极限断裂拉力时，才能使布里渊频移与光缆应力建立良好关系，从而限制了覆冰初期状态的全流程监测[13]。另一方面，监测高压输电线路运行过程中产生的温度及应变也能间接分析线路状态[14]，王磊等[15]结合温度补偿、湿度传感、风速传感、拉力传感、倾角传感等技术，在泸州 110 kV 路线 44 号塔进行了数月的覆冰监测，初步证明上述技术满足实时在线监测需求。为了更全面地验证光纤传感技术在 OPGW 线路的监测效果，谢凯等[16]在河南尖山 4 km 距离的真型输电线路实现了光纤光栅（FBG）、相位敏感光时域反射计（ϕ-OTDR）和拉曼散射温度传感（DTS）不同技术的长期综合应用，通过数年时间实时监测验证了该方案具有系统的工程应用潜力。

解决光纤温度、应变传感技术对 OPGW 光缆的定性分析监测需求后，如何定量分析计算覆冰厚度、振幅及线缆温度等具体参数成为阻碍该技术走向推广应用的又一难题[17]。陆飙等[18]针对输电线舞动事件，利用频谱分析及实际包络拟合方法定量测量了导线的舞动频率及摆幅，该技术使用 OTDR 技术实现了长距离测量定位，但由于 OTDR 技术利用光纤瑞利散射实现干涉测量，因此处于复杂环境风区时，对低信噪比结果的分析将存在一定困难；为提升传感信号特征，Yan 等[10]利用弱反射光栅构建 OPGW 光缆舞动监测线路，测试距离为 70 m，设置光栅间距为 2 m，通过振动幅度实现光缆运动轨迹预测，建立了光缆振幅与光栅干涉相位的联系。经过上述分析可知，当下利用分布式光纤传感监测的 OPGW 光缆覆冰舞动具有工程应用价值，且已经实现简单环境下的定量分析计算。而对于实际工程应用环境而言，覆冰舞动呈现随机性大、变化快速、低信噪比等特征，按照上述计算方法得到的结果存在较大不确定性，舞动幅度测量存在困难。

本文结合上述研究，考虑到大风激励下的覆冰线缆为非线性的舞动，提出一种基于三次样条函数实现振动监测图像特征强化的舞动线缆幅度及波长预测方法，推导并建立了干涉型光纤光栅传感器中相位变化量和舞动波长的宏微观具体联系，初步实现复杂环境下低信噪比监测图像上的覆冰舞动位置及波长直观估计。该方法能够提升 OPGW 实际信号监测图像的信噪比特征，特别适用于复杂环境条件、长距离监测应用下，光栅传感器布设间隔较大时的舞动波长分析。

1　基本原理

输电光缆在大风天气舞动是常见的现象，主要由于同向阻力与横向升力的相互作用，当二者达到一定状态时，便会使光缆呈现低频、大振幅舞动。舞动频率一般处于 0.1～3 Hz 区间，振幅可达 10 m 以上[19]。

基于光纤光栅振动传感系统的 OPGW 光缆舞动在线监测系统如图 1 所示。窄线宽激光器发出的脉冲光经过环形器（CIR1）进入 OPGW 线路的各个光栅（FBG），其中光栅间距为L，经过光栅反射后，

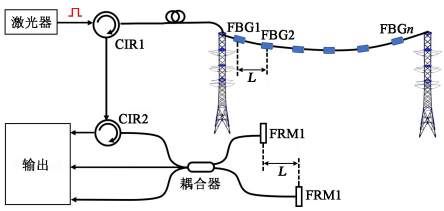


图 1　基于光纤光栅振动传感系统的 OPGW 光缆舞动在线监测系统

通过环形器 2(CIR2)经过耦合器进入不同长度的法拉第旋转镜 1(FRM1)和法拉第旋转镜 2(FRM2),干涉仪臂长差与光栅间距一致。前后相邻的光脉冲经非平衡干涉仪实现光程匹配,进而发生双光束干涉,通过相位解调振动幅度,进而反演光缆舞动状态。

通过多种光栅解调方法能够得到传感器相位变化量[20]。对于 OPGW 光缆沿途监测传感光栅来说,第 i 个传感器在第 j 采样点得到的解调信号 $A_{i,j}$ 为

$$A_{i,j}=\varphi_i(t_j)+\varphi_0 \tag{1}$$

式中,$\varphi_i(t_j)$为光缆舞动引起的相位变化量,φ_0 为初始相位。由于在不同舞动时刻,每个传感器相位均处于持续变化状态,对前后时刻解调信号进行差分处理,得到的相位变化量可表示为

$$\Delta A_{i,j}=\Delta A_{i,j+1}-\Delta A_{i,j}=\Delta\varphi_i(t_j) \tag{2}$$

但对于采样率为 S 的在线监测系统来说,当单次差分得到相位变化量较小时,无法获得稳定的监测对比结果。在时间尺度上累积有利于放大传感阵列差异特征,具体累积次数与 OPGW 光缆存在舞动时的一般舞动周期 f_0 相关,累积半个周期后,第 i 个光栅的差分相位可表示为

$$\Phi_{i0}=\sum_{j=1}^{2S/f_0}|\Delta\varphi_i(t_j)| \tag{3}$$

对累积的差分相位求均值能够平滑得到的相位,抑制复杂环境下得到的强度噪声,平滑后的差分相位表示为

$$\Phi_i=\frac{1}{2S/f_0}\sum_{j=1}^{2S/f_0}|\Delta\varphi_i(t_j)| \tag{4}$$

此时,OPGW 监测光缆线路上 N 个传感单元差分相位可表示为

$$[\Phi_i]_{\text{all}}=[\Phi_1\quad\Phi_2\quad\Phi_3\quad\Phi_4\quad L\quad\Phi_N] \tag{5}$$

将矩阵按照“相位变化量-传感器”绘图便可得到舞动状态下传感信号的变化,进而通过理想条件反演 OPGW 光缆舞动规律,推测光缆在环境作用下的舞动频率及波长。但对于 OPGW 光缆监测系统来说,光缆线路一般达到上百千米,实际工况对准分布式光纤光栅阵列提出更高的复用要求,当光栅间距较大时,不连续的传感数据点将导致监测终端无法得到准确的舞动波长。

对于 OPGW 光缆来说,由于其运动状态受风向、温度、覆冰、直径等多重因素影响,因此舞动光缆呈现曲线特性,但全段不符合单一数学曲线模型。此时,考虑某一区间的舞动光缆运动状态,将 N 个传感单元的差分相位分成子区间分析,即$[(\Phi_1,\Phi_2),(\Phi_2,\Phi_3),\cdots,(\Phi_{N-1},\Phi_N)]$。由于 OPGW 光缆舞动时具备曲线运动特征,因此线路中某段总是满足三次样条函数 $s(\Phi)$,使单个子区间内的曲线满足三次方程,此时曲线光滑,即原函数 $s(\Phi)$、一阶导数 $s'(\Phi)$、二阶导数 $s''(\Phi)$均连续,满足上述假设的边界条件复合函数关系为

$$\begin{cases}s''(\Phi_1)=f''_1=M_1,s''(\Phi_n)=f''_n=M_n\\ s'(\Phi_1)=f'_1=m_1,s'(\Phi_n)=f''_n=m_n\\ s'(\Phi_2+0)=s'(\Phi_n+0),s''(\Phi_2+0)=s''(\Phi_n+0)\end{cases} \tag{6}$$

通过求解边界条件可递推得到各个子区间满足的三次函数关系式,进而对准分布式光栅传感信号做插值,得到更加连续密集的传感点。利用三次样条插值 M 点后,OPGW 监测光缆线路上传感单元差分相位可表示为

$$[\Phi'_i]_{\text{all}}=[\Phi'_1\quad\Phi'_2\quad\Phi'_3\quad\Phi'_4\quad L\quad\Phi'_{N+(N-1)M}] \tag{7}$$

OPGW 光缆由包层和骨架等部分组成,传感光栅作为其中一部分填充于光缆内部,因此光缆受环境作用产生舞动时应力传递到光栅传感器上进而产生相位变化。将 OPGW 光缆分成微元处理可建立某段光缆拉力 ΔF 与相移 $\Delta\varphi$ 的联系,即

$$\begin{cases}\Delta\varphi=4\pi n\cdot\Delta l/\lambda\\ \Delta F=m\cdot\Delta a=K\cdot\Delta l\end{cases} \tag{8}$$

式中,n 为光纤折射率,Δl 表示微元内纤芯长度变化量,λ 代表光波波长,m 为该部分光缆质量,Δa 为光缆微元舞动状态下的加速度,K 为光缆整体弹性系数。根据上式可建立加速度 Δa 与相移 $\Delta\varphi$ 的联系,加速度 Δa 可表示为

$$\Delta a=\frac{K\lambda}{4\pi nm}\Delta\varphi \tag{9}$$

式中,$K\lambda/4\pi nm$ 为定值。由于光缆微元位移的两次微分可得加速度,因此可建立光缆位移 ΔS 与光栅传感器相移 $\Delta\varphi$ 的联系,可表示为

$$\Delta S\propto\frac{K\lambda}{4\pi nm}\Delta\varphi^2 \tag{10}$$

结合 OPGW 监测光缆线路上传感单元差分相位,可得 OPGW 光缆舞动振幅 S 与构建三次样条函数后所得传感测量信号的联系,即

$$S\propto\frac{K\lambda}{4\pi nm}\{[\Phi'_i]_{\text{all}}\}^2 \tag{11}$$

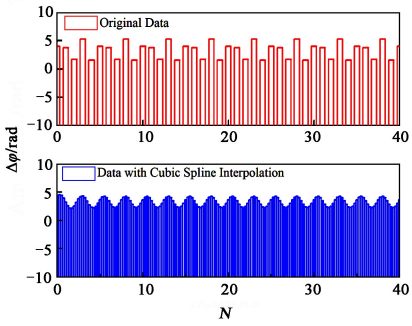
通过上述分析进一步得到 OPGW 传感光缆内部更加准确的相位变化规律，从而提升利用光栅传感系统监测信号反演舞动波长的测量精度。

2　仿真分析

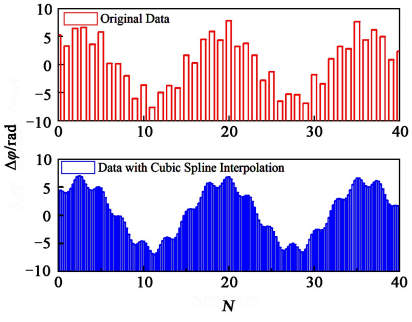
受到外界环境的影响，OPGW 光缆并不存在固定的舞动波长及振幅，因此光栅布放位置及分布密度对整个监测效果有较大影响。考虑到光栅传感系统的技术特点，对于长距离的线路监测需求，光栅需进行复用才能形成准分布式的传感阵列，但对反射率为 1%的弱反射光栅来说复用数量有限，因此利用有限的传感点位最大限度发挥监测作用有着重要意义。根据上一节内容得到的理论，传感器得到的相位变化量与舞动光缆所承受拉力及振幅存在联系，在离散的传感点位构建三次样条函数可以得到更加精确的传感差分相移信号。

通过仿真分析理想情况解调相位信号，不同舞动波长下信号处理前后所得的传感信号监测结果如图 2 所示。原始信号舞动信号产生的相移幅度均为 10 rad，不同舞动波长下得到的结果如图 2(a)、图 2(b)和图 2(c)所示，其中坐标轴横轴表示传感器编号 N，纵轴表示仿真结果下解调得到的相位变化量 $\Delta\varphi$，单位为弧度。

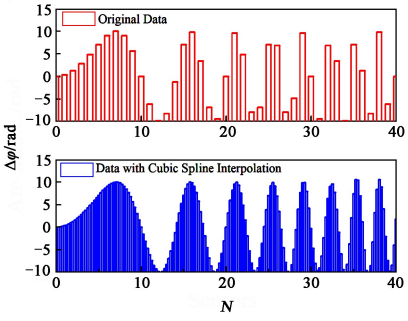
其中，图 2(a)为假设舞动为单一波长下每个传感器相移矩阵柱状图，前 10 个传感器上共呈现 4 个周期波长，在不同初始相位下可以看出，舞动波长与光栅间距相近时，将导致相邻传感器相位变化量强度相似，导致无法分辨舞动周期。由于光缆舞动与绳波类似，因此波形分布满足曲线形式，构建三次样条函数后的拟合波长已经可以清晰看出舞动波形周期。图 2(b)为假设舞动为两种波长下每个传感器相移矩阵柱状图，可以看出当舞动波长跨越多个传感器时，原始信号舞动周期较为明显，而波长较短的部分依然难以分辨，但三次样条函数拟合后的波长周期较为清晰。图 2(c)为假设舞动为多种波长下每个传感器相移矩阵柱状图，当波长更短时，已完全无法分辨具体波长周期，而三次样条函数拟合后的舞动波形特征较为明显。考虑到实际大风天气环境下的光缆覆冰舞动一般会伴随不同周期及振动噪声，受限于固定的传感位置及间距，因此舞动波长将分辨更加困难，利用三次样条函数拟合能够增强舞动波长的信号特征。



(a)　舞动为单一波长



(b)　舞动为两种波长



(c)　舞动为多种波长

图 2　三次样条函数拟合前后舞动信号对比

前文理论部分已经推导了传感器相位变化量与波长存在联系，而仿真结果证明，当舞动波长较短时光栅振动已无法精确分辨舞动周期，当光栅所处的位置不在舞动波峰/波谷时，解调幅度将不准确。定量分析单个舞动周期内光栅数量与解调幅度均方根误差的关系，多次仿真求平均后得到的均方根误差如图 3 所示。

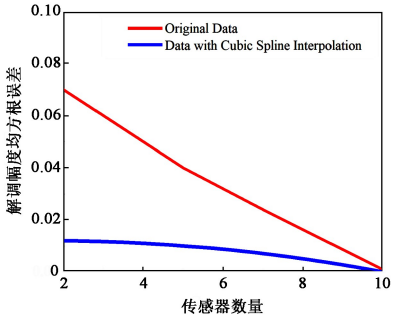


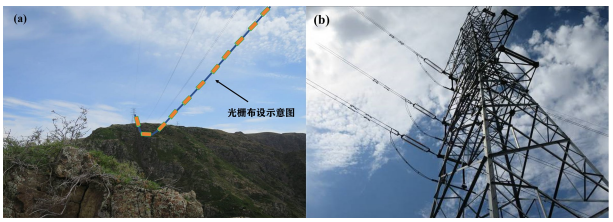
图 3　单个舞动周期内传感器数量与解调幅度均方根误差的关系

可以看出，随着传感器数量的增加，解调幅度误差呈下降趋势，且当传感器数量较少时，三次样条函数拟合后得到的信号幅度恢复更加准确，误差更小，说明该方法不仅在恢复舞动波形特征上有较大优势，在解调幅度还原度方面依然有效，优于原始未处理信号结果。

3 实际应用

对于实际覆冰光缆舞动监测而言，一般电子式（无线）传感器安装在档距中部，数量为 2～3 个，无法满足舞动波长监测。考虑到将光纤光栅嵌入 OPGW 光缆技术成熟，本文利用弱反射率的光栅传感器采用波分、空分复用，实现了档距内分布式传感监测，其中光栅反射率为 1%，布设间距为 10 m。

将装置部署于伊犁哈萨克自治州的某 220 kV 线路，实际现场如图 4 所示。线路沿线地貌属于中山、低山、丘陵及河谷冲洪积平原地貌，微地貌为荒山、草场、农田及荒地。全线路中导线采用 2×LGJ-400/35 型钢芯铝绞线，导线采用双分裂、垂直排列。全线架设双地线，一根采用 LGJ-95/55 钢芯铝绞线，另一根采用 24 芯 OPGW 光缆。线路设计为全线 15 mm 覆冰，Ⅲ级污秽区设防，分 31 m/s 风区、28 m/s 风区。其中本装置部署在 31 m/s 风区、属中山地貌，覆冰、舞动易发。该档距长度 500 m，两塔高差 160 m，档距平均海拔约 1 580 m。

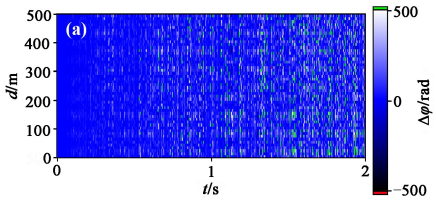


（a） 光栅布设示意图 （b） 输电线路塔

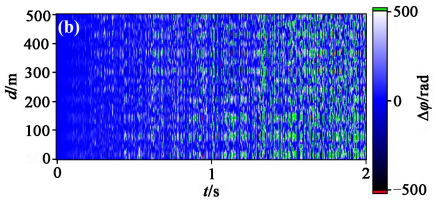
图 4 伊犁哈萨克自治州某 220 kV 线路 OPGW 光缆现场

在不同气象条件下光缆舞动情况不同，而覆冰大风天气同样较难预测，得到的监测图像呈现较大区别，因此为对比本文所提出方法的有效性，专门选取有代表性的监测信号作对比说明。同时，在信号分析过程中还需调整监测灵敏度，以保证强度图图像中数组数据处于量程内，尽量使图像具有明显特征，从最直观角度观测是否有明显舞动事件发生。

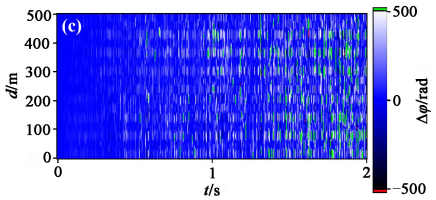
图 5 为风速较弱情况下得到的舞动检测强度图，其中，图 5(a)为未经处理的原始监测信号强度图；图 5(b)为利用本文所提出的三次样条函数拟合后得到的强度图；图 5(c)为结合三次样条函数拟合和相移信号累加求平均后得到的强度图。整体可以看出，风速较低情况下光缆整体产生受力，强度图呈现周期波动；从信号特征来看，经过三次样条函数拟合后的信号特征更加明显，整个档距内产生了波长约为 50 m 的轻微舞动，档距区间内可能存在多处覆冰情况；而经过平滑及拟合后的信号特征整体进一步增强，证明了本文所提出的方法应用在舞动检测的有效性。



（a） 原始监测信号强度图



（b） 三次样条函数拟合后的强度图



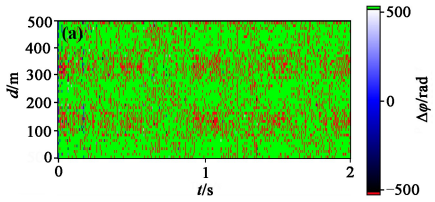
（c） 三次样条函数拟合并平滑后的强度图

图 5 风速较弱情况下舞动监测结果

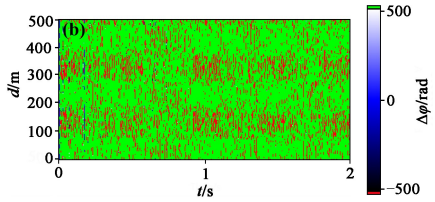
图 6 为风速较强情况下得到的舞动检测强度图，其中，图 6(a)为未经处理的原始监测信号强度图；图 6(b)为利用本文所提出三次样条函数拟合后得到的强度图；图 6(c)为结合三次样条函数拟合和相移信号累加求平均后得到的强度图。与图 5 对比明显的不同在于，在风速较强的条件下整体监测信号强度大幅增加，因此微弱舞动将可能淹没在大幅度舞动中，但能明显看出存在约 200 m 波长的强烈线缆舞动；图 6(b)表明，此时利用三次样条函数拟合整体强度图特征增加并不明显，可能是由于本身大风天气监测信号噪声强度较高；而图 6(c)表明，结合信号平滑对强噪声信号有一定抑制作用，提升监测信号特征。

当然，受限于气象条件等因素的不确定性，OPGW 光缆需要进行实时监测，这也为舞动监测人

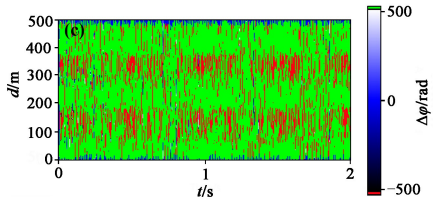
工判别带来一定困难，基于本文所提出方法能够实现舞动检测强度图信号特征增强，为未来舞动事件图像识别及无人智能监测提供技术参考。



（a）　原始监测信号强度图



（b）　三次样条函数拟合后的强度图



（c）　三次样条函数拟合并平滑后的强度图

图 6　风速较强情况下舞动监测结果

4　结论

本文针对 OPGW 光缆舞动事件，提出一种基于三次样条函数拟合的舞动波长预测方法。通过仿真结果初步证明该方法应用在 OPGW 线路上具有明显效果，利用相对更少的传感器能够得到更加完整周期的信号。而对伊犁哈萨克自治州的某 220 kV 线路上舞动事件的实际分析也证明了本方法的有效性，经过拟合后能够明显看出，弱风环境下整个档距内产生了波长约为 50 m 轻微舞动，强风条件下存在约 200 m 波长的强烈线缆舞动。本文所提出方法能够进一步增强复杂背景噪声下整体信号的特征，有效判别舞动事件及进行舞动波长分析预测。

在实际工作状态下，对架空线路的健康检测是一个长期的过程，极端气候导致 OPGW 光缆覆冰进而在风激状态下的舞动呈现出非常明显的不确定性、复杂特性。依靠分布式监测能够取得最直接、连续的光缆各个点位应变数据，但进一步对数据的特征提取同样有着非常重要的意义，便于线路舞动事件的智能识别，更有利于反演光缆所处物理状态，因此本文所提出方法作为降低人工判别难度的方法之一，具有一定工程应用价值。

参考文献：

[1] 马富齐，王　波，董旭柱，等. 面向输电线路覆冰厚度辨识的多感受野视觉边缘智能识别方法研究[J]. 电网技术，2021，45(6)：2161-2169.
Ma Fuqi，Wang Bo，Dong Xuzhu，et al. Research on multi-receptive field vision edge intelligent identification method for transmission line icing thickness identification [J]. Power System Technology，2021，45(6)：2161-2169.

[2] 蒋兴良，张志劲，胡　琴，等. 再次面临电网冰雪灾害的反思与思考[J]. 高电压技术，2018，44(2)：463-469.
Jiang Xingliang，Zhang Zhijing，Hu Qin，et al. Reflection and thinking on snow and ice disaster of power grid again[J]. High Voltage Engineering，2018，44(2)：463-469.

[3] Wang S，Jiang X，Sun C. Study status of conductor galloping on transmission line[J]. High Voltage Engineering，2005，31(10)：11-14.

[4] Xie K，Zhang C，Li Q，et al. Tracking galloping profile of transmission lines using wireless inertial measurement units [J]. J. of Computer and Communications，2015，3(5)：57179.

[5] Zhu K J，Liu B，Niu H J，et al. Statistical analysis and research on galloping characteristics and damage for iced conductors of transmission lines in China[C]// 2010 Inter. Conf. on Power System Technology，2010：1-5.

[6] Fu X，Li H N，Li G，et al. Failure analysis of a transmission line considering the joint probability distribution of wind speed and rain intensity[J]. Engineering Structures，2021，233：111913.

[7] Wei F A，SZB D，WZ C，et al. An efficient dynamic formulation for the vibration analysis of a multi-span power transmission line excited by a moving deicing robot[J]. Appl. Mathematical Modelling，2022，103：619-635.

[8] Tian L，Zhang X，Fu X. Fragility analysis of a long-span transmission tower-line system under wind loads [J]. Advances in Structural Engineering，2020，23(10)：2110-2120.

[9] 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.
Wang Jianjian，Li Yongqian. Application status of distributed optical fiber sensing technology in OPGW monitoring[J]. Study on Optical Communications，2018(3)：25-27.

[10] Yan Q，Zhou C，Feng X，et al. Galloping vibration monitoring of overhead transmission lines by chirped FBG array[J]. Photonic Sensors，2022，12(3)：1-10.

[11] Lv A，Li Y，Li J. Research on strain and temperature measurement of OPGW based on BOTDR[C]//2013 Inter. Conf. on Optical Instruments and Technology：Optical Sensors and Applications，2014，9044：90441H.

[12] 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.
Qin Zhaoyu，Liu Weixin，Pan Zhezhe，et al. Icing identification technology of fiber optic Brillouin distributed transmission line [J]. Opto-Electronic Engineering，2016，43(10)：6-11.

[13] 范 鹏，王海涛，张雪峰，等. 基于 BOTDR 的 OPGW 应变实验研究[J]. 光通信技术，2015，39(4)：60-62.
Fan Peng，Wang Haitao，Zhang Xuefeng，et al. Experimental study of OPGW strain based on BOTDR [J]. Optical Communication Technology，2015，39(4)：60-62.

[14] Liu F L，Guo L R，Deng Y S，et al. Application of fiber Bragg grating device in icing monitoring system of transmission lines[J]. Appl. Mechanics & Materials，2014，543/547：1030-1034.

[15] 王 磊，曹 敏，梁仕斌，等. 应用于输电线路覆冰状态监测的光纤光栅在线监测技术的研究[J]. 电瓷避雷器，2014(5)：21-24.
Wang Lei，Cao Min，Liang Shibin，et al. Study on the fiber Bragg grating online monitor technology applied in icing states monitoring of transmission lines [J]. Insulators and Surge Arresters，2014(5)：21-24.

[16] 谢 凯，张洪英，赵衍双，等. 导线舞动条件下输电系统结构健康监测的光纤研究[J]. 激光与光电子学进展，2018，55(7)：107-119.
Xie Kai，Zhang Hongying，Zhao Yanshuang，et al. Study on optical fiber for structural health monitoring of transmission system under conductor dancing condition [J]. Laser & Optoelectronics Progress，2018，55(7)：107-119.

[17] Ma G，Li C，Jiang J，et al. A novel optical load cell used in icing monitoring on overhead transmission lines [J]. Cold Regions Science and Technology，2012，71：67-72.

[18] 陆 飙，陈利民，刘晓波，等. 一种新型输电线缆风舞在线监测系统及其舞动参数测量方法[J]. 电力学报，2012，32(1)：49-56.
Lu Biao，Chen Limin，Liu Xiaobo，et al. A novel on-line power transmission line galloping monitoring system and its quantative measurement method[J]. J. of Electric Power，2012，32(1)：49-56.

[19] Lu L，Liang Y，Li B，et al. Maintenance of the OPGW using a distributed optical fiber sensor[C]// 2014 Inter. Conf. on Power System Technol.，2014：1251-1256.

[20] 姚国珍，尹伊萌，李永倩，等. 高精度光纤光栅波长解调方法研究综述[J]. 光通信研究，2021(4)：41-49.
Yao Guozhen，Yin Yimeng，Li Yongqian，et al. Review on wavelength demodulation methods of high precision fiber gratings[J]. Study on Optical Communications，2021(4)：41-49.

作者简介：

郭庆瑞(1986—)，男，硕士，高级工程师，研究方向包括通信网仿真技术、光纤传感技术，以及OPGW 监测。