

基于参考传感器的OPGW线路低噪声覆冰舞动监测

马丽山 刘雨 沈斐 何炜 刘世斌 叶宝安

Low-noise ice galloping monitoring of OPGW lines based on reference sensors

MA Lishan, LIU Yu, SHEN Fei, HE Wei, LIU Shibin, YE Baoan

引用本文:

马丽山, 刘雨, 沈斐, 等. 基于参考传感器的OPGW线路低噪声覆冰舞动监测[J]. 应用光学, 2024, 45(4): 812–818. DOI: 10.5768/JAO202445.0403007

MA Lishan, LIU Yu, SHEN Fei, et al. Low-noise ice galloping monitoring of OPGW lines based on reference sensors[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(4): 812–818. DOI: 10.5768/JAO202445.0403007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0403007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光子集成芯片的可穿戴光纤光栅解调研究

Wearable fiber grating demodulation based on photonic integrated chip

应用光学. 2023, 44(1): 219–225 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0108001>

基片式光纤光栅传感器加速度试验研究

Acceleration test of substrate-packaged fiber Bragg grating sensor

应用光学. 2022, 43(1): 152–159 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0108001>

基于光纤光栅传感器的体外血管模型应力测量

Circumferential stress measurement of blood vessels model in vitro based on fiber Bragg grating sensor

应用光学. 2022, 43(5): 1007–1014 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508003>

基于长周期光纤光栅的FBG解调方法

FBG demodulation method based on long-period fiber gratings

应用光学. 2022, 43(1): 160–166 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0108002>

基于智能跑道光栅阵列传感器的机型辨识方法

Aircraft type identification method based on FBG sensing array of smart runway

应用光学. 2024, 45(2): 453–460 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0208002>

基于拉锥光纤布拉格光栅的法布里-珀罗应变传感器的仿真研究

Simulation of Fabry-Perot strain sensor based on tapered fiber Bragg grating

应用光学. 2020, 41(5): 1129–1136 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0508002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 04-0812-07

基于参考传感器的 OPGW 线路低噪声覆冰舞动监测

马丽山¹, 刘雨¹, 沈斐¹, 何炜¹, 刘世斌¹, 叶宝安²

(1. 国网青海省电力公司果洛供电公司, 青海 果洛 813500; 2. 武汉康普常青软件技术股份有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘要: 针对外场环境下光纤复合架空地线舞动周期监测困难等问题, 提出一种基于参考传感器输入的弱反射光栅低噪声舞动监测阵列, 通过理论模型推导了参考传感器及监测传感器信号模型及自适应滤波器信号处理步骤, 并基于不同相关系数的噪声输入进行仿真, 对比分析了监测传感器的降噪效果, 最后将低噪声分布式弱反射光栅舞动监测系统布设于西部某自治州 220 kV 输电线路。外场实验结果表明, 经过参考传感器构建输入信号实现自适应滤波后, 平均噪声功率谱密度在 100 Hz 带宽内降低 6.34 dB, 且阵列监测强度图谱经过算法优化后, 能够明显观测到监测档距内呈现约 100 m 舞动周期事件。该研究成果为进一步完善典型事件分类数据处理及模式识别数据库创造了一定条件, 有一定的工程应用前景。

关键词: 光纤复合架空地线; 舞动监测; 自适应滤波; 光栅阵列

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0403007

Low-noise ice galloping monitoring of OPGW lines based on reference sensors

MA Lishan¹, LIU Yu¹, SHEN Fei¹, HE Wei¹, LIU Shibin¹, YE Baoan²

(1. Guoluo Power Supply Company, State Grid Qinghai Electric Power Company, Guoluo 813500, China;

2. Wuhan Kangpu Evergreen Software Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Aiming at the difficulties in monitoring the galloping period of optical power grounded waveguide in the external field environment, a low-noise galloping monitoring array based on the input of reference sensor for weak fiber Bragg grating was proposed. The signal models for reference sensor and monitoring sensor were analyzed, and then the signal processing steps of adaptive filter through theoretical model were derived. Besides, by changing noise input with different correlation coefficients, the corresponding simulation results were calculated, so that the noise reduction effect of the monitoring sensor was compared and analyzed. Finally, the low-noise distributed galloping monitoring system based on weak fiber Bragg grating was deployed in a western autonomous prefecture with 220 kV power transmission line. The results of the field experiment show that, after self-adaptive filtering for the input signal constructed by the reference sensor, the average noise power spectral density is reduced by 6.34 dB within 100 Hz bandwidth, the monitoring intensity spectrum is optimized by the algorithm, and the galloping period events of about 100 m can be obviously observed within the monitoring interval. The research results create certain conditions for further improving the typical event classification data processing and pattern recognition database, and prove the effective prospects in engineering application.

Key words: optical power grounded waveguide; galloping monitoring; adaptive filtering; fiber Bragg grating array

收稿日期: 2023-08-07; 修回日期: 2023-09-07

基金项目: 国网青海省电力公司科技项目 (SGTYHT/21-JS-223)

作者简介: 马丽山 (1982—), 男, 高级工程师, 主要从事输电线路运维管理。E-mail: qinghaig100@163.com

通信作者: 叶宝安 (1989—), 男, 助理工程师, 主要从事光纤传感技术、智能电网监测技术研究。

E-mail: balabala20211012@163.com

引言

我国西部地区地形环境较为复杂,早晚及季节转换时温度变化明显,这些都给沿途输电线路运维监测造成极大困难^[1]。当低温伴随雨雪及冰雹等灾害天气出现时,长距离输电沿线将在温差作用下产生局部非均匀覆冰^[2-4],在外界强风持续激励下,形成档距内长时间较低频率的舞动^[5]。输电线路的舞动状态将进一步为线路运行带来不稳定因素,更严重情况下会造成部分路段断电瘫痪等重大事故^[6]。

为了避免因舞动造成的输电线路恶劣后果,对易发生覆冰舞动的关键线路区间进行实时监测有着重要的意义^[7]。相关单位从成熟工程应用入手,通过加装电子式传感模块实现光纤复合架空地线(optical power grounded waveguide, OPGW)重点档距的实时监控,但该方式受到复杂电磁环境干扰,且难以实现分布式监测^[8]。而近年来光纤传感技术的蓬勃发展为恶劣环境下的输电线路监测提供了新思路^[9],OPGW 包层内部的光纤在传输数据的同时还能兼顾传感特性,能够解决传统电子传感器外置结构的二次维护保养难题,具有一定的应用前景^[10]。通过构建覆冰状态与环境的联系理论模型,范鹏^[11]等人结合布里渊传感技术实现了对 OPGW 覆冰状态的监测,基于布里渊频移特性对应的温度信息求解对应的覆冰位置,该方法需满足布里渊频移与光缆应力建立理论联系的技术前提,在全流程监测上存在盲区^[12]。研究人员从另一方面出发,利用线路正常工作时存在的多种物理量实现状态监测,并基于温度、湿度、倾斜等参数,在四川泸州某 110 kV 路线进行了为期数月的实时覆冰监测,初步验证了上述技术在 OPGW 线路监测的可行性^[13-14]。为进一步细化不同工作机理的光纤传感技术在 OPGW 线路的实际效果,谢凯等人在河南尖山长约 4 km 的真型输电线路布设了光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)、相位敏感光时域反射计(ϕ optical time domain reflectometer, ϕ -OTDR)以及分布式温度传感器(distributed temperature sensor, DTS)等 3 种不同技术的传感线路,分析不同方案特色的同时总结了其工程应用价值^[15]。

上述技术初步实现了 OPGW 光缆的监测需求,但经实际工程应用发现,不同风振激励下线路覆冰状态存在很大差异。在自然状态背景噪声的

作用下,分布式光纤传感技术难以通过直接监测结果分析舞动状态,监测结果受到环境干扰影响较大^[16]。YAN Q Z^[9]等人通过弱反射光栅阵列模拟了 70 m 档距长度的模拟舞动平台,通过传感器的阵列信号计算预测了光缆运动轨迹,但该方法忽略了复杂的工程应用强噪声背景对直接监测阵列计算结果准确性的影响。为了解决长距离监测阵列信噪比较低的问题,叶博^[17]等人基于自适应噪声消除方法实现了阵列信号降噪,但该方法只能针对周期信号,对宽频的舞动信号特征没有较大提升。而 CAI Y F^[18]等人利用另一组独立的干涉仪输入实现噪声对消,实现了监测阵列本底噪声抑制,该方案需搭建另一套干涉系统,增加了 OPGW 长距离监测阵列光路传输及解调负担。为简化考虑,LUO Z H 等人^[19]提出了一种基于最小均方误差的低噪声阵列处理算法,提升了系统的信噪比,该算法验证了单频信号的优化结果,而对于复杂周期的 OPGW 舞动信号的处理效果目前尚并不明确。

本文在上述研究基础上,针对复杂场景风振激励下的 OPGW 线缆舞动受噪声干扰影响较大的问题,提出一种基于参考传感器输入的低噪声舞动监测阵列,并通过理论推导噪声处理步骤,再利用仿真分析验证所提方法的有效性,最后结合外场试验验证本文所提方法的实际效果。为进一步完善典型事件分类、数据处理及模式识别数据库等工程应用作出积极探索。

1 工作原理

基于参考传感器的 OPGW 光缆低噪声舞动监测阵列如图 1 所示。激光器发出脉冲光后经过环形器 1(CIR₁)依次进入参考传感器(Sensor₀)以及 OPGW 线路的光栅阵列。脉冲光经过光栅反射后形成脉冲阵列,并继续通过环形器 2 进入干涉仪中,其中,干涉仪由 2 个干涉臂、3×3 耦合器(Coupler, CP)、2 个法拉第旋转镜(Faraday rotating mirror, FRM)组成,干涉仪臂长并不相等。经过非平衡干涉仪后,前后脉冲实现光程匹配,随即满足双光束干涉条件,进而实现系统干涉测量。系统中参考传感器两光栅间距、监测光栅阵列相邻光栅间距和干涉仪两臂差值保持相等,均为 L ,以保证参考传感器及舞动监测阵列的正常干涉。

经过解调器解调后分别得到监测传感器相位信号 φ_s 和参考传感器相位信号 φ_{n1} , 将其作为输入端

输入到自适应滤波器中, 以实现低噪声的解调信号输出。

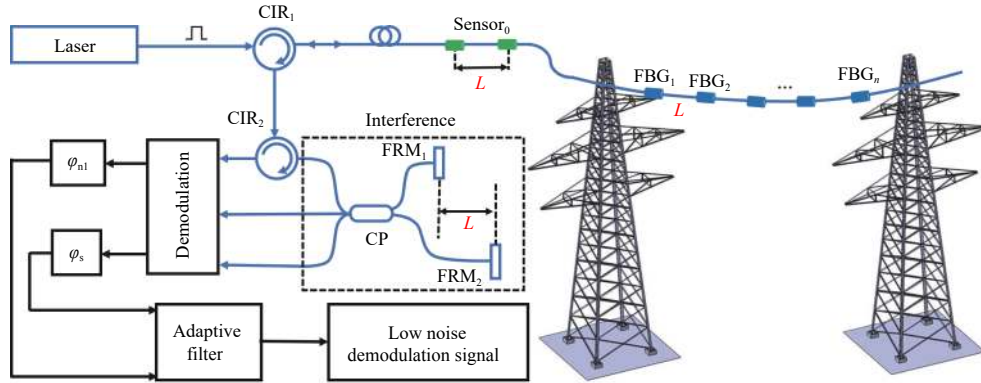


图1 基于参考传感器的OPGW光缆低噪声舞动监测原理图。

Fig. 1 Schematic diagram of low-noise galloping monitoring of OPGW cable based on reference sensor

低噪声 OPGW 光缆舞动监测原理图中, 参考传感器 $Sensor_0$ 由 2 个光栅组成, 由于远离杆塔舞动区域, 因此得到的干涉信号不包含线路舞动导致的相位变化量, 此时 3×3 耦合器输出的参考传感器干涉信号 I_r 可表示为

$$I_r = D + I \cos(\varphi_{n1}(t) - (k-1)2\pi/3), (k=1,2,3) \quad (1)$$

式中: $\varphi_{n1}(t)$ 为参考传感器处环境干扰引起的相位噪声; D 为输出直流分量; I 为干涉信号振幅。

而对于舞动监测阵列上的传感器来说, 干涉信号不仅包含环境干扰噪声引起的相位变化量, 同时还有线路舞动导致的相位变化量。此时 3×3 耦合器 (CP) 输出的监测传感器干涉信号 I_c 可表示为

$$I_c = D + I \cos(\varphi_s(t) - (k-1)2\pi/3), (k=1,2,3) \quad (2)$$

式中 $\varphi_s(t) = \varphi_1(t) + \varphi_{n2}(t)$, $\varphi_1(t)$ 为线路舞动导致监测传感器耦合的相位变化量, $\varphi_{n2}(t)$ 为监测传感器处环境干扰引起的相位噪声。

通过 3×3 耦合器解调算法能够得到各传感器内干涉效应产生的相位变化量^[20], 由于工作区域的不同, 参考传感器和监测传感器得到的解调相位分别为 $\varphi_{n1}(t)$ 与 $\varphi_s(t)$, 将两传感器解调信号设置为自适应噪声抵消算法的输入端, 进行后续处理。基于参考传感器的自适应算法流程如图2所示。参考传感器和监测传感器分别通过解调算法求出解调相位, 并分别作为离散信号的噪声输入和总体输入端。基于自适应滤波器最快下降法对权系数更新迭代, 实现低噪声信号输出, 进而形成监测阵列强度图。

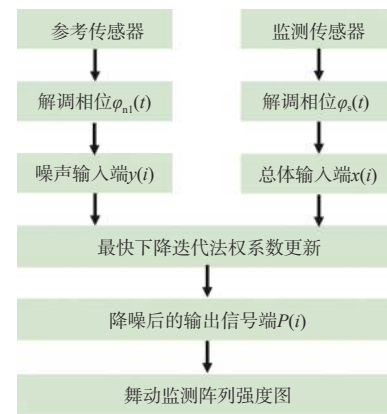


图2 基于参考传感器的自适应算法流程图

Fig. 2 Flow chart of adaptive algorithm based on reference sensor

对于 OPGW 光缆监测应用来说, 线路舞动产生非平稳信号^[9], 因此传统滤波器难以直接使用。不同于固定参数的数字滤波器, 自适应滤波器通过不同的自适应算法调节滤波器参数, 进而实现数字滤波, 通过调节步长不断迭代更新, 以获得期望的低噪声有效信号。考虑到滤波过程是离散数据处理, 自适应噪声抑制系统将监测传感器得到的解调相位 $\varphi_s(t)$ 作为总体输入端 $x(i)$, 将参考传感器得到的解调相位 $\varphi_{n1}(t)$ 作为系统噪声输入端 $y(i)$, 可得表达式为

$$\begin{cases} x(i) = \varphi_1(i) + \varphi_{n2}(i) \\ y(i) = \varphi_{n1}(i) \\ z(i) = x(i) - p(i) = \varphi_1(i) + \varphi_{n2}(i) - p(i) \\ p(i) = w_j(i)y(i-1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x(i)$ 为原始含噪信号, 由监测传感器解调相

位构成; $y(i)$ 为参考信号, 由参考传感器解调相位构成; $z(i)$ 为误差信号; $p(i)$ 为数字滤波器输出信号; $w_j(i)$ 为滤波器权系数矢量的第 j 个取值; $y(i-1)$ 为 $y(i)$ 在 i 时刻之前第 j 个采样点取值。在传输光路中, 由于处于类似的噪声环境中, 监测传感器处环境噪声引起的相位变化量 $\varphi_{n2}(t)$ 与参考传感器处环境噪声引起的相位变化量 $\varphi_{n1}(t)$ 具有很强的相关性, 经过自适应算法处理后, 滤波器的输出信号 $p(i)$ 将会向原始信号的噪声 $\varphi_{n2}(t)$ 逼近, 使输出的误差信号 $z(i)$ 经迭代运算后接近期望输出。

为了减少运算量, 采用最快下降迭代法实现自适应滤波器的权系数更新, 基于均方误差负斜率值调节后可得:

$$\nabla(i) = \frac{dE(z^2(i))}{dw(i)} = -2E[z(i) \times y(i)] \quad (4)$$

利用随机梯度求解最小二乘估计, 再利用误差信号 $z(i) \times y(i)$ 的瞬时值对式中 $E[z(i) \times y(i)]$ 值进一步估计, 得到自适应滤波器权系数的迭代计算公式:

$$W(i+1) = W(i) + 2u \times z(i) \times y(i) \quad (5)$$

式中: $W(i+1)$ 、 $W(i)$ 为数字滤波器在第 $i+1$ 、 i 阶权系数矢量; u 为迭代的步长。自适应滤波器利用权值不断更新, 使其逐步收敛到最佳滤波器权值, 在迭代步骤中, 通过查询均方误差的梯度更新权值。经过自适应噪声处理, 可以从理论上消除监测传感器上与参考传感器较为相关的噪声, 从而增强 OPGW 线路舞动监测信号的信噪比, 提升监测信号特征。

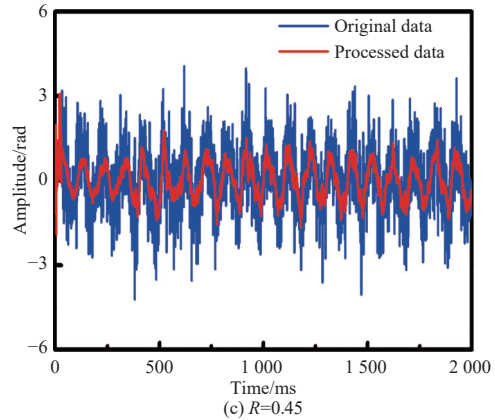
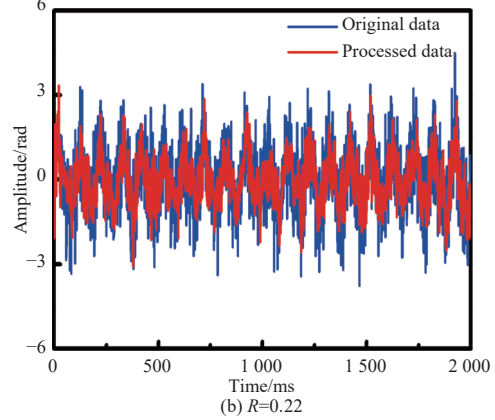
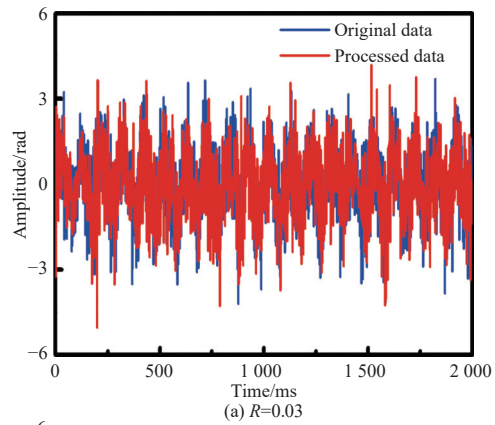
2 仿真分析

基于参考传感器的 OPGW 光缆低噪声舞动监测系统算法的核心在于, 选取相关性较强的噪声信号实现噪声抑制, 为了验证算法的有效性, 分别选取相关性不同的噪声数据及原始数据作为自适应滤波器输入端。在仿真过程中, 监测传感器仿真信号由单频信号叠加噪声组成, 参考传感器仿真信号由噪声组成, 通过 3×3 耦合器解调算法得到解调信号后分别输入到自适应滤波器中, 最终输出对比计算结果。对于自适应滤波器输入端而言, 输入信号相关性越强, 噪声信号抑制效果越好。为验证本文所提出方法的有效性, 引入与监测传感器具有不同相关性的参考传感器仿真信号, 对比分析自适应滤波算法输出结果, 因此采用

Person 相关系数计算方法量化上述 2 个连续信号之间的线性相关程度^[21]。两信号的相关性计算公式可表示为

$$R[\varphi_s(i), \varphi_{n1}(i)] = \frac{\text{Cov}[\varphi_s(i), \varphi_{n1}(i)]}{\sqrt{\text{Var}[\varphi_s(i)] \text{Var}[\varphi_{n1}(i)]}} \quad (6)$$

式中: $\text{Cov}[\cdot]$ 表示两数据协方差; $\text{Var}[\cdot]$ 表示数据方差。监测传感器仿真信号由幅度为 1 rad 且频率为 10 Hz 的正弦信号和噪声幅度为 1 rad 的高斯白噪声构成, 通过改变参考传感器噪声信号的种子值及幅度, 选取两信号归一化相关系数分别为 0.03、0.22、0.45 和 0.76 的噪声数据, 其中, 相关系数计算方法如式(6)所示。4 组数据输入自适应滤波器进行仿真, 得到的计算结果如图 3 所示。



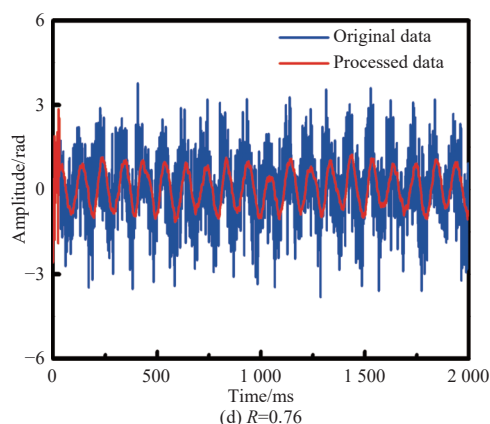


图3 不同相关系数下自适应滤波对比结果

Fig.3 Comparison results of adaptive filtering under different correlation coefficients

通过仿真结算结果可知,本文基于参考传感器的自适应算法降噪效果明显,且随着参考传感器与监测传感器信号相关性的提升,降噪效果更佳,但当参考传感器噪声信号与监测传感器信号相关性很低时,该方法信号质量提升效果并不明显。因此在实际试验中,选取相同环境但不易受舞动干扰的区域布设参考传感器,能够使整个系统拾取到的参考信号与监测传感器内非舞动噪声信号实现最大程度相关。

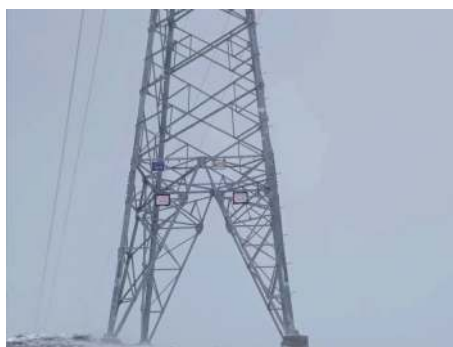
3 外场试验

基于参考传感器的OPGW光缆低噪声舞动监测阵列部署于西部某自治州220 kV线路部分监测路段,沿线中低山、丘陵交错,并伴随河谷冲积平原,此外微地貌呈现荒山、荒地、草场、农田,OPGW光缆低噪声舞动监测阵列施工现场如图4所示。外场施工中激光器输出脉冲重复频率设置为2 000 Hz,中心波长为1 550 nm,线宽3 kHz,输出光功率27 mW。基于时分、空分复用技术将弱反射率的光栅传感器组成舞动监测阵列,实现档距内的分布式传感,其中光栅反射率为1%,中心波长为1 550 nm,3 dB带宽0.8 nm,弱反射光栅布设间距为10 m,在前期共布设52个FBG形成准分布式监测阵列。另外,参考传感器布设于杆塔位置,降低线缆舞动影响的同时,尽量保证参考传感器与监测传感器拾取相同噪声。

为了进一步分析OPGW线路在外场舞动状态下的监测效果,选取风振较为均匀时段截取部分舞动信号进行数据处理,监测传感器原始信号及处理后的信号时域结果如图5所示。



(a) 全线布放环境



(b) 局部布放环境

图4 基于参考传感器的OPGW光缆低噪声舞动监测阵列施工现场

Fig.4 Construction site of low-noise galloping monitoring array of OPGW cable based on reference sensor

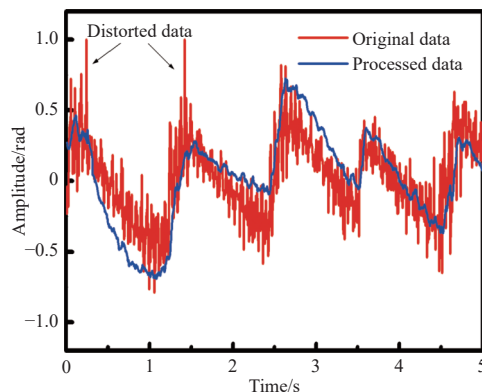


图5 参考传感器自适应滤波前后时域结果对比

Fig.5 Comparison of time-domain results before and after adaptive filtering of reference sensors

从图5的时域监测结果可以看出,传感器监测到了周期振动信号,线路出现轻微低频舞动,经过数据处理后的时域信号波形质量明显提升。值得注意的是,在部分时刻由于外场其他干扰的存在,单个传感器局部时刻数据产生突变,而利用所提出基于参考传感器的自适应滤波算法能够合理处理突变结果,使输出结果更加稳定,为后续阵列信号处理生成强度图奠定了良好基础。

基于参考传感器的自适应滤波频域结果对比如图 6 所示,可以看出,舞动能量主要集中于甚低频 0.01 Hz~10 Hz 频带内,主频率约为 1.2 Hz。虽然外场环境下噪声影响较大,时域信号整体信噪比不高,但依然可以直观看信号质量得到明显改善,同时监测传感器在 10 Hz~100 Hz 带宽内的噪声得到明显抑制,在 100 Hz 带宽内平均噪声功率谱密度降低 6.34 dB。由于试验环境会受到光路及杆塔扰动等复杂噪声背景影响,使监测传感器信号信噪比较低,但依然能够基本验证所提出的基于参考传感器自适应噪声抑制的有效性。

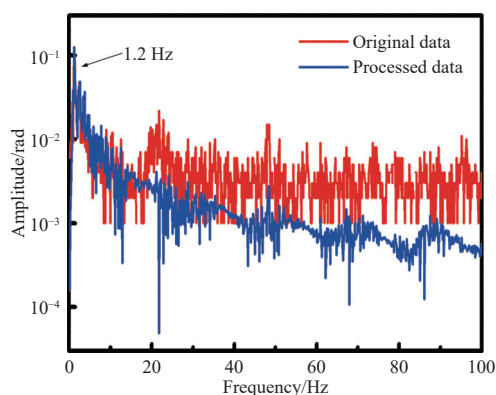


图 6 参考传感器自适应滤波前后频域结果对比

Fig. 6 Comparison of frequency-domain results before and after adaptive filtering of reference sensors

OPGW 光缆舞动情况下时间、距离强度图谱如图 7 所示。图 7(a) 为直接解调后得到的原始强度图,图 7(b) 为经过参考传感器自适应滤波后得到的强度图。

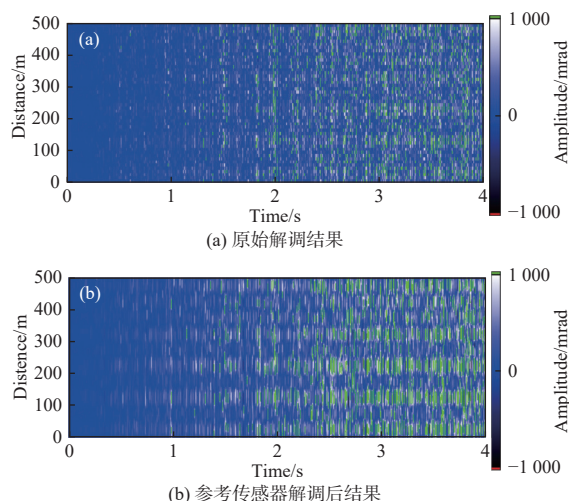


图 7 OPGW 光缆舞动监测强度图对比结果

Fig. 7 Comparison results of galloping monitoring intensity images of OPGW cable

可以发现,信号处理后强度图在信号特征上更加明显,随时间变化过程中档距内舞动周期较为明显,约为 100 m,结合监测传感器信号频率、强度及空间信息,有望实现舞动类型判断,为后续大容量数据优化处理提供一定参考。

4 结论

本文针对复杂环境下 OPGW 舞动监测系统低信噪比问题,提出了一种基于参考传感器进行自适应噪声滤波的低噪声舞动监测系统。在监测阵列中选取传感器输出参考信号,与其他传感器信号共同实现自适应滤波。实际信号处理结果表明,本文所提出的方法不仅能够有效提升系统信噪比,使 1.2 Hz 的甚低频舞动信号特征更加清晰,平均噪声功率谱密度降低 6.34 dB,同时还能有效处理异常突变信号,使 OPGW 光缆舞动监测系统更加稳定。本文研究成果也为进一步完善典型事件分类数据处理及模式识别数据库的建立创造了一定条件,在工程应用上具有一定前景。

参考文献:

- [1] 许学莲, 韩忠全, 王发科, 等. 气候变暖下柴达木盆地风速、大风和沙尘暴日数的变化特征分析[J]. 青海环境, 2021, 31(1): 26-31.
XU Xuelian, HAN Zhongquan, WANG Fake, et al. Analysis on variation characteristics of wind speed, gale and sandstorm days in Qaidam Basin under climate warming[J]. Journal of Qinghai Environment, 2021, 31(1): 26-31.
- [2] 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. Receptive field vision edge intelligent recognition for ice thickness identification of transmission line[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2161-2169.
- [3] 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 Zhijin, HU Qin, et al. Thinkings on the restrick of ice and snow disaster to the power grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 463-469.
- [4] XIE K, ZHANG C, LI Q, et al. Tracking galloping profile of transmission lines using wireless inertial measurement

- units[J]. *Journal of Computer and Communications*, 2015, 3(5): 220-228.
- [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 International Conference on Power System Technology. Zhejiang, China: IEEE, 2010: 1-5.
- [6] FAN W, ZHANG S H, ZHU W D, et al. An efficient dynamic formulation for the vibration analysis of a multi-span power transmission line excited by a moving deicing robot[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, 103: 619-635.
- [7] 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.
- [8] 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.
WANG Jianjian, LI Yongqian. Progress on distributed optical fiber sensing technology in OPGW monitoring[J]. *Study on Optical Communications*, 2018(3): 25.
- [9] YAN Q Z, ZHOU C M, FENG X B, et al. Galloping vibration monitoring of overhead transmission lines by chirped FBG array[J]. *Photonic Sensors*, 2022, 12(3): 220310.
- [10] LYU A Q, LI Y Q, LI J. Research on strain and temperature measurement of OPGW based on BOTDR[C]//2013 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications. Beijing, China: SPIE, 2013: 90441H.
- [11] 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.
- [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. Optical Brillouin distributed ice-coating identification technology on transmission line[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(10): 6-11.
- [13] 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]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 543/544/545/546/547: 1030-1034.
- [14] 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 state monitoring of transmission lines[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2014(5): 21-24.
- [15] 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): 070606.
XIE Kai, ZHANG Hongying, ZHAO Yanshuang, et al. Structural health monitoring of power transmission system based on optical fiber sensor under transmission line galloping[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070606.
- [16] MA G M, LI C G, 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.
- [17] PLOTNIKOV M Y, VOLKOV A V. Adaptive phase noise cancellation technique for fiber-optic interferometric sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(14): 4853-4860.
- [18] CAI Y F, YU Z H, MO D L, et al. Noise reduction with adaptive filtering scheme on interferometric fiber optic hydrophone[J]. *Optik*, 2020, 211: 164648.
- [19] LUO Z H, DING S, TAN C, et al. Low-frequency fiber optic hydrophone based on ultra-weak fiber Bragg grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(11): 11635-11641.
- [20] PANG Y D, LIU H J, ZHOU C M, et al. Pretreatment of ultra-weak fiber Bragg grating hydrophone array based on cubic spline interpolation using intensity compensation[J]. *Sensors*, 2022, 22(18): 6814.
- [21] ADLER J, PARMRYD I. Quantifying colocalization by correlation: the Pearson correlation coefficient is superior to the Mander's overlap coefficient[J]. *Cytometry Part A*, 2010, 77(8): 733-742.