

doi:10.13682/j.issn.2095-6533.2025.06.004

时频面旋转下电力系统光纤互感器计量 信号增强方法

张强, 李洋, 刘馨卉, 张俊, 李梅

(国网山西省电力公司营销服务中心, 山西太原 030032)

摘要: 针对电力系统光纤互感器计量信号在复杂运行环境中易受内外部噪声干扰而导致质量下降的问题, 提出一种时频面旋转下电力系统光纤互感器计量信号增强方法。量化计算热噪声、散粒噪声、振动噪声和衰减噪声, 并采用改进小波变换进行多类型噪声滤波预处理, 利用短时傅里叶变换结合自适应旋转算子分解信号时频面, 解耦并分离干扰分量与有效分量, 同时沿频率轴扩散提取的幅频参数以增强目标特征, 通过相位重构算法校正传播路径延迟, 输出增强信号。实验结果表明, 该方法增强后信号的谐波振幅倍数显著降低至 0.06~0.18, 远低于基准值 0.25 及其他对比方法, 信号幅值有效提升至 $[-0.5, 1.5]$ V 范围, 总信噪比为 16.5 dB。所提方法有效提升了光纤互感器计量信号的幅频特征质量与抗噪能力, 失真度低, 满足了电力系统精准计量需求, 为复杂噪声环境下的信号处理提供了有效方案。

关键词: 电力系统; 信号增强; 光纤互感器; 计量信号; 互感器信号; 时频面旋转

中图分类号: TN957

文献标志码: A

文章编号: 2095-6533(2025)06-0031-09

Measurement signal enhancement method for fiber optic transformers in power systems under time-frequency plane rotation

ZHANG Qiang, LI Yang, LIU Xinhui, ZHANG Jun, LI Mei

(State Grid Shanxi Marketing Service Center, Taiyuan 030032, China)

Abstract: To address the issue of degraded signal quality in power system fiber optic transformers (FOTs) due to internal and external noise interferences in complex operational environments, a method for enhancing FOT measurement signals under time-frequency domain rotation is proposed. Quantitative calculations for thermal noise, shot noise, vibration noise, and attenuation noise are performed, and an improved wavelet transform is employed for multi-type noise filtering preprocessing. The short-time Fourier transform is combined with an adaptive rotation operator to decompose the signal's time-frequency domain, decoupling and separating the interference components from the effective components, while extracting amplitude-frequency parameters along the frequency axis to enhance the target features. A phase reconstruction algorithm is used to correct the propagation path delays, and the enhanced signal is output. Experimental results show that the harmonic amplitude multiples of the enhanced signal are significantly reduced to 0.06~0.18, far below the baseline value of 0.25 and other comparison methods. The signal am-

收稿日期: 2025-03-25

基金项目: 国网山西省电力公司营销服务中心科研项目(SGSXKF00YGJS2200212)

通信作者: 李梅, 2382204966@qq.com

引文格式: 张强, 李洋, 刘馨卉, 等. 时频面旋转下的电力系统光纤互感器计量信号增强方法[J]. 西安邮电大学学报, 2025, 30(6): 31-39.

ZHANG Q, LI Y, LIU X H, et al. Measurement signal enhancement method for fiber optic transformers in power systems under time-frequency plane rotation[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2025, 30(6): 31-39.

plitude is effectively increased to the range of $[-0.5, 1.5]$ V, with a total signal-to-noise ratio of 16.5 dB. This method effectively improves the amplitude-frequency characteristic quality and noise resistance of optical fiber mutual inductor measurement signals with low distortion, meeting the precise measurement requirements of power systems, and providing an effective solution for signal processing in complex noise environments.

Keywords: power system; signal enhancement; fiber optic transformer; metering signal; transformer signal; time-frequency plane rotation

光纤互感器凭借其不易受到电磁干扰的优势,逐渐成为电力系统中计量电力参数的设备工具之一。通过对光纤互感器计量信号的分析,能够准确获悉电力系统的运行情况,从而对发生的故障进行及时的检测与维护^[1]。在这一过程中,光纤互感器计量信号的质量十分关键。为了避免信号受到噪声的干扰,或者在传输过程中发生衰减等因素导致信号质量的下降,如何对信号进行有效的增强处理成为领域内共同关注的热点。

文献[2]设计了非正交多址接入下的信号增强方法,利用黎曼共轭梯度算法实现非正交多址接入信号的增强处理,但该方法难以有效估计信号衰减下的功率幅值,导致增强后的信号质量不高。文献[3]设计了结合小波变换和稀疏主成分分析的信号增强方法,但小波变换对于突变非平稳信号无法有效去噪,增强后的信号质量有待提升。文献[4]设计了基于 RSETransformer 的信号增强方法,建立基于 RSETransformer 的信号增强模型,实现区块信号的增强,但 RSETransformer 模型在训练数据有限时,可能无法充分学习信号区块特征,影响了信号增强的最终质量。文献[5]设计了基于滤波器组的信号增强方法,利用伽马通滤波器组进行信号的分频带增强处理,但滤波器组在信号增强的过程中需要分辨信号的频率与时间特征,如果信号的时间特性较弱,可能会影响信号增强效果。文献[6]设计了基于卷积递归神经网络的信号增强方法,利用网络卷积核为信号递归分配增强权值,输出增强后的信号,但该神经网络在实际应用中存在梯度爆炸的问题,可能无法有效增强信号质量。

鉴于上述文献所提出的信号增强方法存在不同程度的弊端,提出一种时频面旋转下电力系统光纤互感器计量信号增强方法。分别量化计算光纤互感器计量信号的内外噪声,采用小波变换方法,滤波去除信号的多类型噪声值,解决突变非平

稳信号难以有效去噪的问题。利用短时傅里叶变换,进行时频面旋转,提取并扩散其幅频参数,在有效估计信号衰减下功率幅值的同时,解决训练数据有限难以学习信号局部区块特征,影响分辨精度的问题。最后,通过计量信号相位重构,有效识别完整的信号参数,得到增强后的计量信号。

1 光纤互感器计量信号增强方法

1.1 预处理光纤互感器计量信号噪声

电力系统中,光纤互感器在运行的过程中受到内外环境的双重影响,存在着多种噪声的干扰。为了避免在信号增强处理中信号噪声被一并增强,本研究利用小波变换的方法对光纤互感器计量信号的噪声进行预处理,量化计算光纤互感器计量信号中的多种噪声。计量信号在光纤互感器内部元件的干扰下,主要包含热噪声和散粒噪声,在外部环境振动干扰下,主要包含振动噪声和衰减噪声。

计量信号的热噪声由光纤互感器元件内部载流子的热运动所产生,故以白噪声形式表示,通过对原始信号进行幅频参数扩散处理,结合改进型小波包变换对信号进行多尺度分解,提取各频带能量分布特征^[7],即

$$R_1 = \left(\frac{4\kappa T}{L}\right)\alpha\Delta f \quad (1)$$

式中: R_1 表示热噪声; α 表示热噪声常数; κ 表示玻尔兹曼常数; L 表示光纤互感器元件的实时负载; T 表示元件内部的绝对温度; Δf 表示光纤互感器的光源带宽。

由于光纤互感器元件内部载流子的运行呈现不规则的运动状态,计量信号产生了一定的散粒噪声,通过调节扩散系数实现信号高频分量与低频分量的自适应加权融合^[8],即

$$R_2 = 2q(I + I_0)\Delta f \quad (2)$$

式中: R_2 表示散粒噪声; q 表示光子载流子; I 表示计量信号的电流值; I_0 表示光子载流子的暗电流。

振动主导频段通常为 100~2 000 Hz,12 层小波分解可产生 4 096 个子频带,每个子带宽度约为 1.06 GHz。该分辨率确保对振动噪声频段实现至少 2 个以上子带覆盖,满足动态阈值调整的粒度需求。对原始光信号进行 12 层小波包分解时,结合振动特征频带分析结果,动态调整各子带阈值。在重构阶段,对包含 50 Hz 工频及其谐波的关键频带保留原始系数,振动噪声^[9]为

$$R_3 = \frac{P^2}{\rho c} \quad (3)$$

式中: P 表示元件振动声压; ρ 表示声能密度; c 表示光速。

光纤互感器的计量信号在光纤信道中受到介质的影响,存在衰减噪声^[10]

$$R_4 = l \lg \delta \quad (4)$$

式中: l 表示光纤信道长度; δ 表示介质特性。

选取噪声滤波处理的最优小波基,根据计量信号中各类型噪声的量化值,分析相应的信息熵。信号噪声信息熵^[11]为

$$H(R) = p_R \log_2 W \quad (5)$$

式中: p_R 表示不同噪声类型的小波系数分布概率; W 表示噪声在计量信号中的频带。对振动主导频段(通常为 100~2 000 Hz)进行收缩处理,同时通过相位补偿算法校正振动引起的偏振态随机波动,且不影响信号上升沿等关键暂态特征的保真度。

小波去噪重构的计量信号^[12]为

$$x = \sqrt{2} g C(H + 2k) \quad (6)$$

式中: g 表示选定的小波基; C 表示尺度函数; k 表示小波基的共轭转置。

在分解过程中,针对光纤信号特有的 $1/f$ 噪声和周期性干扰,采用改进的阈值函数(如 SURE 阈值)对小波系数进行非线性处理,对高频细节系数进行自适应收缩。通过重构算法将处理后的近似系数和细节系数进行合成,在保留信号中有效谐波成分(如 50 Hz 工频及其谐波)的同时,显著抑制了宽频带噪声和随机脉冲干扰。

1.2 计量信号幅频参数扩散

计量信号幅频参数扩散是指信号在传输或处理过程中,其幅度和频率特征因噪声、非线性器件或信道干扰而发生的失真或展宽现象。典型表现为幅度扩散、频率扩散和时频关联性。

解析去噪处理后的光纤互感器计量信号的特征。为了深度解构计量信号的特征参数,本研

究采用时频面旋转的方法将信号分解为不同频率分量的时间序列,以此解析信号特征。在此基础上,根据信号特征的幅频参数将其扩散处理。

构建计量信号的时域幅度矩阵 $U(x)$ 和频域幅度矩阵 $J(x)$ ^[13-14] 分别为

$$U(x) = \begin{bmatrix} a \\ \varphi \end{bmatrix} \cdot \left[\frac{n}{l} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$J(x) = \arctan \begin{bmatrix} \beta \\ A(t) \end{bmatrix} \cdot e^{\varphi} \quad (8)$$

式中: a 表示泰勒常数; β 表示信号频程; φ 表示信号相位; n 表示信号时域的一阶分量; t 表示时间点; $A(t)$ 表示相应时间点下,计量信号的瞬时幅值; e 表示自然常数。

结合构建的计量信号时频域幅度矩阵,本研究对其扩充运算。在矩阵中引入 Dirac delta 函数,将信号矩阵转换为稀疏表达的形式。转换后的信号时频为^[15]

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \gamma(t, \omega) \left[\frac{U}{J} \right] g^{\varepsilon^{-t}} dt \quad (9)$$

式中: $s(t)$ 表示信号时频的稀疏表达; γ 表示 Dirac delta 函数; ω 表示信号的一阶时变。

在此基础上,在原始信号中添加汉宁窗口进行帧分割,将窗口长度设置为工频周期的整数倍(20 ms),以 5 ms 的步长滑动并计算局部频谱,并在时频域中引入旋转算子。电力系统标准工频为 50 Hz,整数倍窗口 20 ms 可完整包含 1 个基波周期,避免频谱泄漏;5 ms 步长对应时域分辨率 5 ms,采样频率为 200 Hz,大于信号最高频率(暂态信号频率一般低于 100 Hz)的两倍,满足 Nyquist 准则。通过自适应调整时频平面的旋转角度,使信号能量在倾斜的时频平面上重新分布。旋转角度通过分数阶的迭代优化自适应生成,其数值由信号能量聚集程度动态决定。一方面,通过旋转操作解耦原始耦合的时频特性,可以在旋转的时频平面上对信号中的瞬态脉冲分量(如振动干扰)和时不变分量(如基波)进行空间分离;另一方面,通过利用旋转时频平面的方向选择性,有效地抑制了与信号主能量方向正交的宽带噪声。短时傅里叶变换的窗函数表达为^[16-17]

$$G(s) = [2\pi s(0)]^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)^u dt \quad (10)$$

式中: $G(s)$ 表示短时傅里叶变换的窗函数; $s(0)$ 表示信号在 0 时的时频稀疏值; u 表示信号时域在频域方向上的积分。

通过调节分数阶次使信号时频能量在旋转下实现最大聚集^[18-19]。基于窗函数旋转计量信号的时频面,则旋转算子定义为

$$z = \frac{1}{\sigma^2} G(s \cdot \cos(t, \eta) + \pi) \quad (11)$$

式中: σ 表示信号二阶时变阶次; η 表示信号时频离散系数。

提取包含幅值、频率的深度特征参数,在保持信号相位连续性的同时,将深度特征参数沿频率轴自适应扩散^[20],扩散方程为

$$M = B \sqrt{\frac{2\sigma\pi}{1 - z(\omega - \varphi)^2}} \quad (12)$$

式中: B 表示扩散系数。

基于幅频参数的扩散处理,增强计量信号的幅值特征,对目标频段进行选择性增强,同时提取瞬时幅值包络,最终通过逆变换重构信号,完成计量信号的时频面旋转,以及相应信号特征的幅频参数扩散处理^[21]。

1.3 计量信号增强

计量信号增强是提升有效信号信噪比的过程。在电力系统中,针对光纤互感器等设备存在的噪声干扰,如电磁干扰、热噪声等,本研究以信号幅值特征计量信号的相位为基准进行重构,得到增强后的光纤互感器计量信号^[22-23]。

解析增强前后,计量信号的相位变化为

$$\Delta\varphi = cl \left(\frac{\Delta l}{\lambda} \right)^\varphi \quad (13)$$

式中: λ 表示光纤互感器光源的波长。

依据求解的相位变化值,根据计量信号的轴向传播特性重构信号相位,建立信号传播的轴向位置-相位变化映射关系,针对不同介质界面的相位突变,对轴向传播路径上的相位延迟进行逐段校正。重构后的增强计量信号^[24-25]为

$$\hat{x} = \frac{\pi l}{2E} (x + \Delta\varphi)^\varepsilon \quad (14)$$

式中: E 表示光纤折射率; ε 表示弹光系数。

经过信号的相位重构,得到增强处理后的计量信号。计量信号增强算法的伪代码如下。

算法: 计量信号增强算法

输入: 原始计量信号 $s(t)$ # 来自光纤互感器

输出: 增强信号 hat_x

1: 量化噪声: // 式(1)~式(4)

$$R_1 \leftarrow (4 \kappa T / L) \alpha \Delta f \text{ # 热噪声}$$

$$R_2 \leftarrow 2q(I + I_0) \Delta f \text{ # 散粒噪声}$$

$$R_3 \leftarrow P^2 / (\rho c) \text{ # 振动噪声}$$

$$R_4 \leftarrow l \lg \delta \text{ # 衰减噪声}$$

2: 小波去噪: // 式(6)

$$x \leftarrow \sqrt{2} \cdot g \cdot C \cdot (H + 2k) \text{ # 重构信号, } g \text{ 为小波基, } C \text{ 为尺度函数}$$

3: 构建幅度矩阵: // 式(7)~式(8)

$$U(x) \leftarrow [a; \varphi] \cdot (n/D) \cdot \{1/2\} \text{ # 时域幅度矩阵}$$

$$J(x) \leftarrow \arctan[\beta A(t)] \cdot e^{-\varphi} \text{ # 频域幅度矩阵}$$

4: 时频面旋转: // 式(9)~式(11)

$$s(t) \leftarrow \int \gamma(t, \omega) [U; J] g\{e^{-t}\} dt \text{ # 稀疏表达}$$

$$G(s) \leftarrow (2 \pi s(0)) \cdot \{-1\} \int s(t) u dt \text{ # 窗函数(短时傅里叶变换)}$$

$$z \leftarrow (1/\sigma^2) G(s \cos(t, \eta) + \pi) \text{ # 旋转算子}$$

5: 幅频参数扩散: // 式(12)

$$M \leftarrow B \sqrt{(2 \sigma \pi / (1 - z(\omega - \varphi)^2))} \text{ # 扩散方程, } B \text{ 为扩散系数}$$

6: 相位重构: // 式(13)~式(14)

$$\Delta\varphi \leftarrow cl(\Delta l / \lambda)^\varphi \text{ # 相位变化}$$

$$\text{Hat_x} \leftarrow (\pi l / 2E) (x + \Delta\varphi)^\varepsilon \text{ # 增强信号输出}$$

2 实例应用

根据本次实例应用的实际需求,选用由上海电气互感器有限公司生产的 EPI-HV 型号光纤互感器。该型号光纤互感器的主要元件包含光源设备、耦合器、相位调制器、偏振器、光纤波片以及光纤延时环等元件。各元件在光纤互感器实际运行过程中的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 光纤互感器各元件主要技术参数

光纤互感器元件	参数/单位	典型值
光源设备	光源中心波长/nm	1 290~1 320
	消光比/dB	1
	带宽/nm	30
	发射功率/uW	600
耦合器	分光比	50 : 50
相位调制器	输入光功率/mW	15
	工作波长/nm	1 300
	回波损耗/dB	50
	平均插入损耗/dB	3.12
偏振器	半波电压/V	3.33
	消光比/dB	32
光纤波片	插入损耗/dB	≤0.6
	归一化温度因子	≤10 ⁻⁴
	消光比/dB	≤0.5
光纤延时环	插入损耗/dB	≤0.3
	长度/m	200
	最小缠绕面直径/mm	50

选用符合表 1 中参数的光纤互感器作为本次应用测试的实验对象。将该设备连接至上位机,获取相应的计量信号。

基于电力系统的实际运行环境,搭建本次测试中光纤互感器的计量环境。由于条件有限,本次测试仅模拟搭建了 IEC61850-9-1 一种电力系统的组网方式,其组网架构的拓扑示意图如图 1 所示。

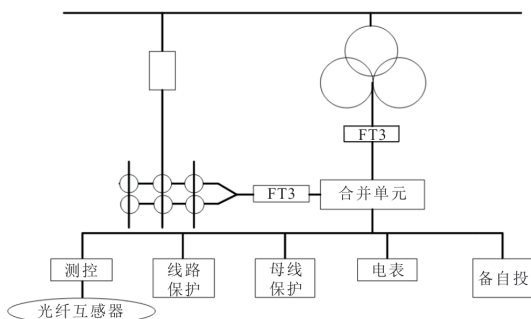


图 1 电力系统组网拓扑示意图

图 1 所示的 IEC61850-9-1 拓扑结构采用点对点直接通信模式,其网络结构相对简化,存在未覆盖星型、环网等复杂拓扑的局限性。但本文研究的是信号质量增强,影响信号质量的光纤互感器的关键噪声源(热噪声、衰减噪声等)及其量化模型与组网方式无关,而是由设备内部元件和外部环境决定。而 IEC61850-9-1 是电力系统数字化变电站的基准协议,能够直接反映计量信号的核心需求,具有组网典型性。此外,为了准确模拟计量环境实际运行条件,采用广泛的光源中心波长作为实验对象,光源带宽扩展至 30 nm,确保噪声干扰与信号衰减符合工程实际。因此可以按照如图 1 所示的组网方式构建光纤互感器运行的电力系统环境。通过在电力系统的测控单元中连接选定的光纤互感器,得到光纤互感器对电力系统运行状态的实时计量信号。信号采样率为 4.8 kHz;噪声源设置如下:内部噪声为热噪声;外部噪声为机械振动噪声(10~200 Hz)和信道衰减噪声。信号 AD 采集卡分辨率为 16 位。总信噪比为 16.5 dB。在该环境下,测试对光纤互感器计量信号的增强处理效果。

采集一组光纤互感器的原始计量信号,并采用所提方法对其进行增强处理。所采集时段的噪声干扰下光纤互感器计量信号原始幅值如图 2 所示。分析图 2 可知,所采集的原始光纤互感器信号的幅值较弱,这表明光纤互感器计量信号在传输的

过程中,受到环境噪声干扰等因素的影响出现了较大幅度的衰减。基于此,采用所提方法增强该时段的信号。经过预处理后,转换该信号的时频面,计量信号时频面转换图像如图 3 所示。

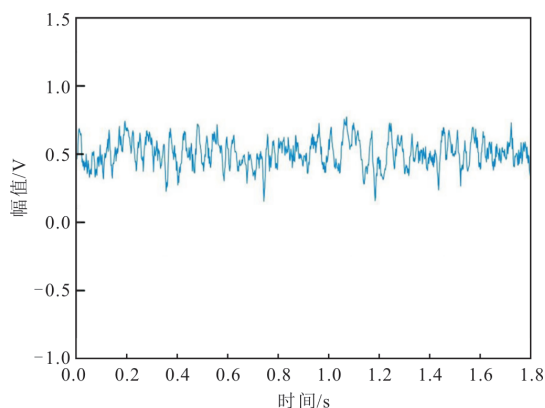


图 2 噪声干扰下光纤互感器计量信号原始幅值

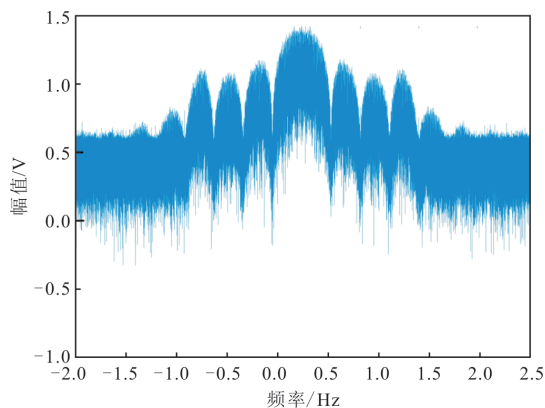


图 3 计量信号时频面转换图像

根据图 3 所示的时频面转换图像,本研究根据光纤互感器信号的主要频率区域,着重增强了 $[-1, 1.5]$ Hz 频段的计量信号幅值,并将相应的信号幅值区间扩大到了 $[-0.5, 1.5]$ V 的范围内,大幅度增强了信号的幅值。

采用对比分析的方法检验所提方法增强处理下,光纤互感器计量信号的质量水平。分别应用所提方法、文献[4]、文献[5]以及文献[6]所提出的信号增强方法对同一时段内部噪声和外部噪声干扰下衰减的计量信号进行增强处理。噪声干扰下增强后计量信号所表现出的幅值图像如图 4 所示。

对比图 4 和图 2 的信号幅值图像可知,经过所提方法的增强处理后,缓解了信号内外部噪声的干扰问题,不仅大幅度增强了干扰衰减信号的整体幅值,还有效增强了信号的频率,增强效果较为明显。而文献[6]方法增强了信号的频率,但幅值增强效果不佳。而文献[4]方法、文献[5]方法虽然提升了

信号幅值,但仍低于所提方法。

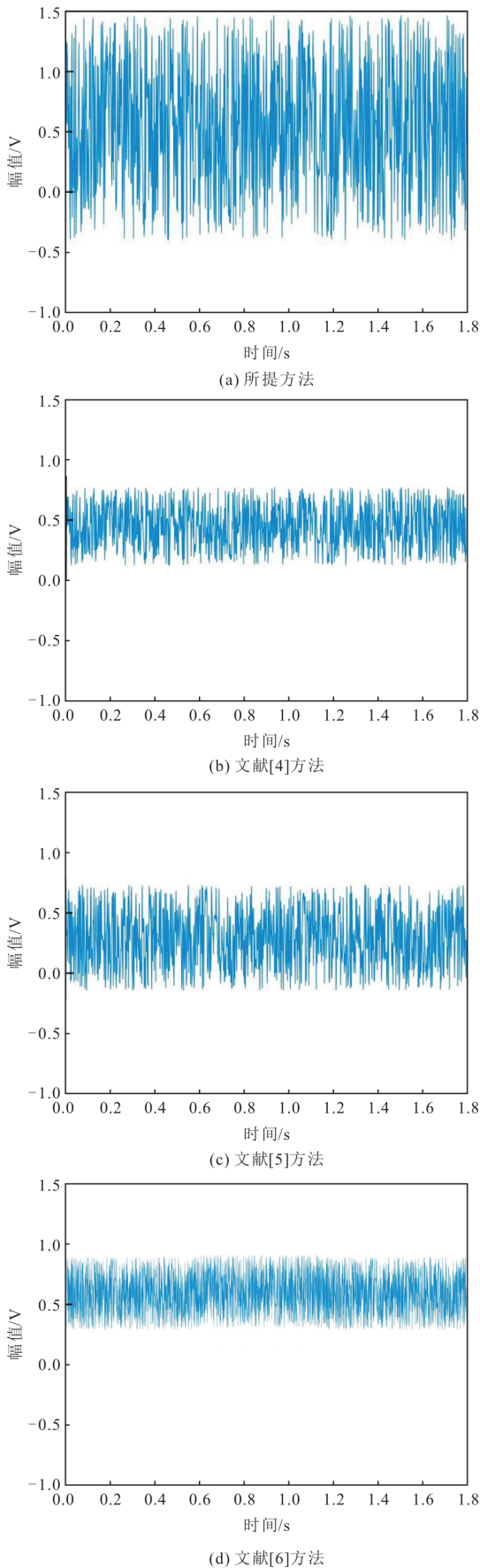


图4 噪声干扰下增强后计量信号幅值图像

信号谐波振幅倍数越大,说明谐波能量越强,信号的基波失真程度越大,信号质量也就越差。根据这一原理利用谐波振幅倍数分析不同方法增强信号的质量水平。谐波振幅倍数的基准为 0.25,计算谐波振幅与信号基波振幅之间的倍数。得到不同方法下的增强信号质量状况,如图 5 所示。

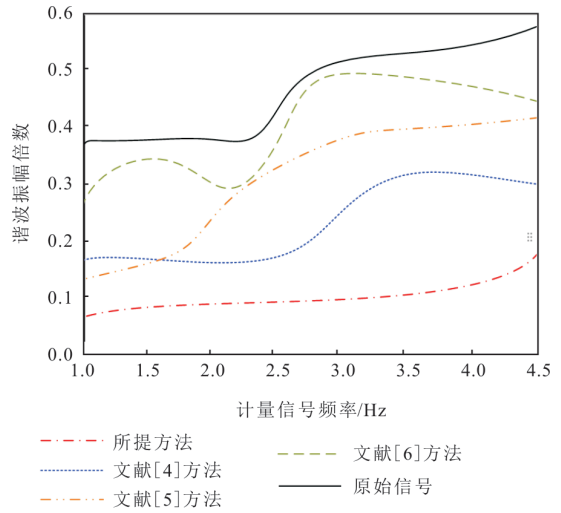


图5 不同方法增强信号质量对比

在本次对比测试中,采用不同频率的原始光纤互感器计量信号。从图 5 可以明显看出,与原始频率的信号幅值相比,所提方法增强处理下的谐波振幅倍数更小,保持在 0.06~0.18,低于基准要求,谐波能量较低,信号的失真程度较低。而文献[4]方法增强后信号所表现出的谐波振幅倍数为 0.17~0.29,文献[5]方法增强后信号所表现出的谐波振幅倍数为 0.13~0.41,文献[6]方法增强后信号所表现出的谐波振幅倍数为 0.28~0.42。这些文献方法增强后的信号谐波振幅倍数虽然与原始信号比有所降低,但均较所提方法有着较大的差距,谐波能量仍会导致信号失真程度较高。

基于这一对比测试结果,分析可知所提方法在电力系统光纤互感器计量信号的增强处理实践中能够得到较高质量的信号数据。这表明了所提方法对信号的增强处理不会导致计量信号出现较严重的失真问题,能够在很大程度上保留原始信号所携带的信息,满足了计量信号的应用分析需求。

3 结语

为缓解信号噪声干扰,增强信号质量,提出时频面旋转下电力系统光纤互感器计量信号增强

方法。通过对电力系统光纤互感器计量信号内外噪声进行量化计算,解析信号特征并根据信号特征的幅频参数将其扩散处理,利用短时傅里叶变换,完成计量信号的时频面旋转。通过计量信号相位重构,得到增强后的计量信号。使用所提方法的谐波振幅倍数范围为0.06~0.18,明显低于其它方法的谐波振幅倍数,信号失真度更低。因此,所提方法能够有效增强信号的幅值及频率参数,保证信号的整体质量,可广泛应用于电力系统光纤互感器计量信号的应用与分析。但所提方法只是降低了谐波振幅倍数,对信号的增强处理仍存在计量信号失真问题,未来仍需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 刘学,孙翱,李冬,等. 时频流形自适应稀疏重构的遥测振动信号特征增强方法[J]. 振动工程学报, 2022, 35(1): 246-254.
LIU X, SUN A, LI D, et al. Telemetry vibration signal feature enhancement method based on timefrequency manifold adaptive sparse reconstruction[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(1): 246-254. (in Chinese)
- [2] 侯天为,李洁,王俊,等. 非正交多址接入的同步透射反射智能超表面信号增强算法[J]. 北京邮电大学学报, 2024, 47(1): 7-12.
HOU T W, LI J, WANG J, et al. A signal enhancement algorithm for simultaneous-transmitting-and-reflecting reconfigurable intelligent surface based on non-orthogonal multiple access networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024, 47(1): 7-12. (in Chinese)
- [3] 张圆,刘薇,李津蓉,等. 结合小波变换和稀疏主成分分析的复合材料缺陷信号增强算法[J]. 传感技术学报, 2022, 35(12): 1664-1670.
ZHANG Y, LIU W, LI J R, et al. Enhancement of defect signals in composite materials using a combination of wavelet transforming and sparse principal component analysis[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(12): 1664-1670. (in Chinese)
- [4] 苏琮智,吴宏超,杨承志,等. 基于RSETransformer的低截获概率雷达信号增强[J]. 战术导弹技术, 2022(5): 44-54.
SU C Z, WU H C, YANG C Z, et al. LPI radar signal enhancement based on RSETransformer[J]. Tactical Missile Technology, 2022(5): 44-54. (in Chinese)
- [5] 陈允锋,刘超. 一种基于滤波器组设计的多频带组合信号增强方法[J]. 声学技术, 2022, 41(2): 295-300.
CHEN Y F, LIU C. A multi-band combined signal enhancement method based on filter bank design[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(2): 295-300. (in Chinese)
- [6] GAO S H, ZHENG C Y, ZHAO Y C, et al. Comparison of enhancement techniques based on neural networks for attenuated voice signal captured by flexible vibration sensors on throats[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2022, 5: 013001.
- [7] 孙玲,刘冀. 基于脉冲涡流技术的光伏电压互感器信号故障检测[J]. 制造业自动化, 2022, 44(5): 180-184.
SUN L, LIU J. Signal fault detection of photovoltaic voltage transformer based on pulsed eddy current technology[J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(5): 180-184. (in Chinese)
- [8] 杨小权,刘曰木,刘江. 基于卡尔曼滤波与子带选取的轴承声信号增强方法[J]. 机电工程, 2023, 40(11): 1673-1681.
YANG X Q, LIU Y M, LIU J. Acoustic signal enhancement method for bearings based on Kalman filtering and sub-band selection[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40(11): 1673-1681. (in Chinese)
- [9] 东晨,郭畅,吴田宜,等. 微弱光信号的量子增强接收优化方法[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(6): 140-149.
DONG C, GUO C, WU T Y, et al. Optimization of quantum-enhanced receiving method for weak optical signal[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(6): 140-149. (in Chinese)
- [10] 张涵,胡宏林. 基于散粒噪声模型的协作缓存放置策略[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(11): 3201-3207.
ZHANG H, HU H L. Cooperative cache placement strategy based on SNM model[J]. Computer Engineering and Design, 2023, 44(11): 3201-3207. (in Chinese)
- [11] 罗丹,徐卫林,韦保林,等. 一种低信号衰减的三阶噪声整形 SAR ADC[J]. 微电子学, 2023, 53(4): 568-573.
LUO D, XU W L, WEI B L, et al. A third-order noise-shaping SAR ADC with signal attenuation slightly[J]. Microelectronics, 2023, 53(4): 568-573. (in Chinese)

- Chinese)
- [12] 陈可洋. 逆时偏移数据体低波数噪声相对保幅衰减技术及应用[J]. 石油物探, 2023, 62(2): 305-313.
CHEN K Y. Relative amplitude-preserving attenuation technology of low wavenumber noise in reverse time migration data volume and its application [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2023, 62(2): 305-313. (in Chinese)
- [13] 马愈昭, 刘逵, 张岩峰, 等. CEEMD 结合改进小波阈值的激光雷达信号去噪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(1): 93-100.
MA Y Z, LIU K, ZHANG Y F, et al. Laser radar signal denoising algorithm based on CEEMD combined with improved wavelet threshold [J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(1): 93-100. (in Chinese)
- [14] 安冬, 魏亚静, 张倩, 等. 轴系轮廓重构信号的 CEEMDAN—小波阈值去噪方法[J]. 工具技术, 2023, 57(8): 153-159.
AN D, WEI Y J, ZHANG Q, et al. CEEMDAN-wavelet thresholding denoising method for axial system profile reconstruction signals [J]. Tool Engineering, 2023, 57(8): 153-159. (in Chinese)
- [15] 刘倩, 徐彦, 梁春燕, 等. 基于 CEEMDAN 和小波熵的心音信号去噪算法研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(2): 321-325.
LIU Q, XU Y, LIANG C Y, et al. Research on heart sound signal denoising algorithm based on the combination of CEEMDAN and wavelet entropy [J]. Computer Simulation, 2023, 40(2): 321-325. (in Chinese)
- [16] 刘必达, 黄智蒙, 张帆, 等. 基于偏振调控的脉冲时域相干分割合成技术[J]. 光电技术应用, 2024, 39(5): 29-33.
LIU B D, HUANG Z M, ZHANG F, et al. Coherent pulse division and combination in time-domain by controlling polarization [J]. Electro-Optic Technology Application, 2024, 39(5): 29-33. (in Chinese)
- [17] 付卫红, 赵祎晨. 基于性能权重聚类的频域盲分离排序算法[J]. 信号处理, 2023, 39(2): 335-342.
FU W H, ZHAO Y C. Frequency domain blind separation permutation algorithm based on performance weight clustering [J]. Journal of Signal Processing, 2023, 39(2): 335-342. (in Chinese)
- [18] 孙寅酉, 郭俐辉, 刘冬冬. 初值含 Dirac 函数的一个简化趋化性模型的 Riemann 问题[J]. 吉林大学学报(理学版), 2023, 61(1): 32-40.
SUN Y Y, GUO L H, LIU D D. Riemann problem of a simplified chemotaxis model with Dirac functions in initial value [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2023, 61(1): 32-40. (in Chinese)
- [19] 刘杰, 高云兰. 一类具有复权函数和两个不连续点的 Dirac 算子的逆问题[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 6-11.
LIU J, GAO Y L. The inverse spectral problems of a class of Dirac operators with complex weight function and two discontinuities [J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 43(1): 6-11. (in Chinese)
- [20] 葛晓伟, 周颖. 基于事件触发的 Delta 算子网络控制系统故障检测[J]. 电子科技, 2024, 37(5): 79-87.
GE X W, ZHOU Y. Event-triggered fault detection for delta operator network control systems [J]. Electronic Science and Technology, 2024, 37(5): 79-87. (in Chinese)
- [21] LI Z, LIANG Y, WANG J Y, et al. IoT empowered early warning of transmission line galloping based on integrated optical fiber sensing and weather forecast time series data [J]. Computers, Materials & Continua, 2025, 82(1): 1171-1192.
- [22] 钱旭盛, 翟千惠, 朱萌, 等. 傅里叶变换下电力系统采样数据加密仿真[J]. 计算机仿真, 2024, 41(11): 142-145.
QIAN X S, ZHAI Q H, ZHU M, et al. Simulation of power system sampling data encryption under Fourier transform [J]. Computer Simulation, 2024, 41(11): 142-145. (in Chinese)
- [23] 唐荣芳, 何华光. 基于离散傅里叶变换的光纤陀螺电路串扰自检测 [J]. 电子器件, 2023, 46(6): 1708-1713.
TANG R F, HE H G. Self-detection of crosstalk in FOG circuit based on discrete Fourier transform [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2023, 46(6): 1708-1713. (in Chinese)
- [24] 田园, 李雨伶, 李明楚. 重构稀疏相位信号的投影/迭代算法[J]. 信息与控制, 2022, 51(4): 444-455.
TIAN Y, LI Y L, LI M C. Projection/iteration algorithm for reconstructing signals with sparse phases [J]. Information and Control, 2022, 51(4): 444-455. (in Chinese)
- [25] 王泽, 何方敏, 卢洽然, 等. 基于模数混合子带划分的信号重建建模分析与优化[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(11): 3991-4002.

WANG Z, HE F M, LU Q R, et al. Analysis and optimization of signal reconstruction modeling based on mixed analog-digital subband division[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45 (11): 3991-4002. (in Chinese)

[作者简介]



张强(1986—),男,山西太原人,硕士,国网山西营销服务中心高级工程师,主要研究方向为电力系统、电力营销等。E-mail:1044351192@qq.com



李洋(1982—),男,山西大同人,工程硕士,国网山西营销服务中心高级工程师,主要研究方向为电气工程、电力营销等。E-mail:2257287924@qq.com



刘馨卉(1985—),女,山东烟台人,工程硕士,国网山西营销服务中心高级工程师,主要研究方向为电力营销、电能计量等。E-mail:3802668283@qq.com



张俊(1982—),女,山西文水人,硕士,国网山西营销服务中心高级工程师,主要研究方向为电力系统、电力营销等。E-mail:3077330380@qq.com



李梅(1976—),女,山西临汾人,国网山西营销服务中心高级工程师,主要研究方向为电力系统、电力营销等。E-mail:2382204966@qq.com

[责任编辑:蔡秀梅]