

# 基于短时傅里叶变换的局部放电窄带干扰抑制

周涛, 万子逸, 段永生, 吴辰阳, 钱琪

(云南电网有限责任公司昆明供电局, 云南昆明 650200)

**摘要:**为有效抑制局部放电(PD)信号中周期性窄带干扰,文中提出短时傅里叶变换和矩阵束相结合的局部放电窄带干扰抑制方法。该方法利用短时傅里叶变换分析染噪PD信号,得到窄带干扰数目,同时分离出染噪PD信号中信号帧和噪声帧;采用矩阵束算法在噪声帧中对窄带干扰参数进行估计,重构出全时段的窄带干扰,实现局部放电的窄带干扰抑制。仿真及实测染噪PD信号的去噪效果表明,与传统的傅里叶级数法和局部能量比法相比,所提方法去噪后的残余噪声更小,对染噪PD信号中窄带干扰有很好的抑制效果。

**关键词:**局部放电;周期性窄带干扰;短时傅里叶变换;矩阵束

**中图分类号:**TM 935 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)04-0011-05

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220403

## Narrowband Interference Suppression of Partial Discharge Based on Short-time Fourier Transform

ZHOU Tao, WAN Ziyi, DUAN Yongsheng, WU Chenyang, QIAN Qi

(Kunming Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650200, Yunnan, China)

**Abstract:**In order to effectively suppress the periodic narrowband interference in partial discharge (PD) signal, a method combining short-time Fourier transform and matrix pencil is proposed. The short-time Fourier transform algorithm is used to analyze the noisy PD signal, and to obtain the number of narrowband interference and separate noise frame and signal frame from noisy PD signal. The matrix pencil algorithm is used to estimate the narrowband interference parameters in the noise frame, and to reconstruct the narrowband interference of the entire period and suppress the narrowband interference in partial discharge. The denoising results of the simulated and measured noisy PD signals show that compared with the traditional Fourier series method and local energy ratio method, the proposed method can get the smaller residual noise and produce a good effect of narrowband interference suppression.

**Key words:** partial discharge; periodic narrowband interference; short-time Fourier transform; matrix pencil

## 0 引言

局部放电(partial discharge, PD)是监测电力电缆绝缘老化状态的有效手段之一<sup>[1-2]</sup>,但是实际的PD信号能量极其微弱,容易被白噪声、窄带干扰和脉冲性干扰所污染;其中窄带干扰有着能量强、数量多和持续时间长的特点,会严重污染PD信号,使得PD信号难以识别,因此国内外学者针对PD信号的窄带干扰抑制技术开展了大量研究工作<sup>[3]</sup>。

文献[4-5]采用傅里叶变换在频域中抑制窄带干扰,该方法可以有效提高PD信号的信噪比,但是

实际该方法的窄带干扰抑制效果会受到频谱泄露效应的限制。文献[6-7]提出利用小波分解方法来抑制PD信号中窄带干扰;小波分解方法拥有优异的时频局部化能力,可以清晰地分离出PD信号和窄带干扰,但是该方法中小波基函数、分解层数和小波阈值等参数难以选择,窄带干扰抑制效果受人因素影响较大。文献[8-9]提出将经验模态分解方法应用于窄带干扰抑制中;该方法可以根据信号的特征自适应地选取分解的基函数,窄带干扰抑制效果更好,但是该方法存在的模态混叠现象会使算法的稳定性和准确性受到影响。文献[10-11]提出了基于奇异值分解的窄带干扰抑制方法;该方法可以自

适应地分离出窄带干扰信号子空间和 PD 信号子空间,算法的稳定性较好,但该方法难以抑制和 PD 信号存在频率混叠的窄带干扰。

针对上述局部放电窄带干扰抑制方法存在的问题,提出了一种基于短时傅里叶变换和矩阵束的局部放电窄带干扰抑制方法。该方法首先对染噪 PD 信号做短时傅里叶变换,并将时间-频率-幅值信息绘制成图谱,得到短时傅里叶变换的模矩阵(short-time fourier transform modular matrix, STFTMM)。在 STFTMM 中借助 PD 信号和窄带干扰信号不同的时频特征,确定窄带干扰个数并分离出染噪 PD 信号中的信号帧和噪声帧;接着采用矩阵束算法处理染噪 PD 信号中的噪声帧得到窄带干扰参数的估计值;最后,通过重构全时段的窄带干扰信号实现干扰抑制。

## 1 技术原理

### 1.1 STFTMM

傅里叶变换算法可以将信号从时域转换到频域开展分析,但该方法只能对全时段开展分析,无法得到信号的时频信息,因此短时傅里叶变换算法<sup>[12]</sup>应运而生。

定义一个具有一定时间宽度的窗函数  $w(t)$ , 使该窗函数顺着时间轴平移, 截取对应信号  $y(t)$  的时间片段开展傅里叶变换, 以此得到  $y(t)$  的短时傅里叶变换为

$$S_F(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\tau) w(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

式中:  $\tau$ 、 $t$  为时间;  $f$  为频率;  $S_F(t, f)$  为时刻  $t$  的频谱。

考虑实际局部放电信号为离散信号, 因此需要研究短时傅里叶变换的离散形式。令  $y(t)$  的离散形式为  $y(k)$ ,  $k=0, 1, \dots, N-1$ 。  $N$  为  $y(k)$  的采样点总数。进而得到  $y(k)$  的离散短时傅里叶变换结果为

$$S_F(t, f) \Big|_{t=mT, f=\frac{n}{NT}} = S_F(m, n) = \sum_{k=0}^{N-1} y(kT) w(kT - mT) e^{-j2nk\pi/N} \quad (2)$$

式中:  $T$  为采样周期;  $m$  和  $n$  分别为时间和频率的离散点, 为了便于观察, 通过将  $n$  取小数的方式进行了频域谱细化;  $S_F(m, n)$  为二维复数矩阵, 行变量为时间, 列变量为频率, 矩阵元素包含了各时刻和各频率的幅值相位信息。

进一步得到  $S_F(m, n)$  的 STFTMM 为

$$S_{Fa}(m, n) = |S_F(m, n)| \quad (3)$$

### 1.2 矩阵束算法

矩阵束算法通过矩阵的分解和变换求解指数型函数的参数<sup>[13]</sup>, 将其引入用于窄带干扰参数估计, 其具体计算步骤如下:

1) 利用  $y(k)$  构造对应的时延矩阵  $\mathbf{Y}$ 。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & y_2 & \cdots & y_{L-1} \\ y_1 & y_2 & y_3 & \cdots & y_L \\ y_2 & y_3 & y_4 & \cdots & y_{L+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{N-L} & y_{N-L+1} & y_{N-L+2} & \cdots & y_{N-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $L$  为列长度, 通常选为  $N/4 \sim N/3$ 。

2) 对  $\mathbf{Y}$  开展奇异值分解。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{SVD}^T \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{S}$  和  $\mathbf{D}$  分别为左正交矩阵和右正交矩阵;  $\mathbf{V}$  为奇异值对角阵, 其对角元素  $\delta_i$  被称为  $\mathbf{Y}$  的奇异值, 并会呈现由大到小的排列。

3)  $p$  个窄带干扰的能量会集中于前  $2p$  个  $\delta_i$  中, 因此取  $\mathbf{V}$  中前  $2p$  列为  $\mathbf{V}_2$ , 取  $\mathbf{D}$  的前  $2p$  个右奇异向量构成矩阵  $\mathbf{D}_2$ , 以此得到窄带干扰能量集中矩阵  $\mathbf{Y}_2$ 。

$$\mathbf{Y}_2 = \mathbf{SV}_2\mathbf{D}_2^T \quad (6)$$

4) 根据  $\mathbf{Y}_2$  构造具有时延关系的矩阵  $\mathbf{Y}_3$  和  $\mathbf{Y}_4$ , 其中  $\mathbf{Y}_3$  为  $\mathbf{Y}_2$  去掉矩阵最后 1 行,  $\mathbf{Y}_4$  为  $\mathbf{Y}_2$  去掉矩阵第 1 行, 求解矩阵束  $\mathbf{Y}_4 - \lambda\mathbf{Y}_3$  的广义特征矩阵  $\mathbf{G}$ 。

$$\mathbf{G} = \mathbf{Y}_3^+ \mathbf{Y}_4 \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{Y}_3^+$  为  $\mathbf{Y}_3$  的伪逆矩阵。  $\mathbf{G}$  存在  $2p$  个特征值为  $\lambda_i$ 。

5) 根据式(8)通过最小二乘法求解参数  $C_i$ 。

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \cdots & \lambda_{2p}^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_{2p} \end{bmatrix} \quad (8)$$

6) 确定估计的窄带干扰幅值  $\tilde{B}_i$ 、频率  $\tilde{f}_i$  和相位  $\tilde{\theta}_i$ 。

$$\tilde{B}_i = 2 |C_i| \quad (9)$$

$$\tilde{f}_i = \frac{1}{2\pi T} \text{angle}(\lambda_i) \quad (10)$$

$$\tilde{\theta}_i = \text{angle}(B_i) \quad (11)$$

式中,  $\text{angle}()$  为对复数求相角。

### 1.3 窄带干扰抑制流程

1) 利用短时傅里叶变换算法生成染噪 PD 信号的 STFTMM, 在 STFTMM 中 PD 信号的频率能量分布宽且时间范围有限; 窄带干扰的频率能量分布集中且时间范围长。

2) 利用上述窄带干扰和 PD 信号不同的时频特征确定信号帧和噪声帧, 同时确定窄带干扰数目  $p$ 。

3) 在噪声帧中利用矩阵束算法确定窄带干扰参数, 利用该参数重构全时段的窄带干扰信号, 最后通过和染噪 PD 信号进行时域相减得到干扰抑制后的 PD 信号。

## 2 仿真测试

### 2.1 PD 信号与窄带干扰

由于实际的 PD 信号通常呈现衰减振荡的趋势, 因此选用了如式 (12) 所示的单指数衰减模型和如式 (13) 所示的双指数衰减模型开展仿真测试<sup>[11]</sup>。

$$s_1(t) = Ae^{-t/\tau} \sin(2\pi f_s t) \quad (12)$$

$$s_2(t) = A(e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \sin(2\pi f_s t) \quad (13)$$

式中:  $A$  为 PD 幅值;  $f_s$  为 PD 振荡频率。

这里共构建 4 组 PD 脉冲, 脉冲 1 和脉冲 2 由式 (12) 构成, 脉冲 3 和脉冲 4 由式 (13) 构成;  $A$  分别为 7 mV、7 mV、28 mV、28 mV;  $t$  分别为 0.8  $\mu$ s、1.2  $\mu$ s、0.8  $\mu$ s、1.2  $\mu$ s;  $f_s$  分别为 3 MHz、2 MHz、2 MHz、3 MHz。仿真的采样频率为 20 MHz, 时间总长为 90  $\mu$ s, 即采样点总数为 1800, 得到原始的 PD 脉冲波形如图 1(a) 所示。在原始的 PD 脉冲波形中叠加窄带干扰信号, 窄带干扰信号可由式 (14) 所示的正弦信号产生。

$$z(t) = \sum_{i=1}^p B_i \sin(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (14)$$

式中:  $B_i$  为窄带干扰幅值;  $f_i$  为窄带干扰振荡频率;  $\theta_i$  为初始相位。

文中  $p$  设置为 4,  $B_i$  分别设置为 1.2 mV、1.2 mV、2.2 mV、2.2 mV;  $f_i$  分别设置为 1.03 MHz、2.10 MHz、3.14 MHz、6.30 MHz;  $\theta_i$  分别设置为  $\pi/2$  rad、 $\pi/3$  rad、 $\pi/4$  rad、 $\pi/6$  rad。以此得到染噪 PD 信号的波形如图 1(b) 所示, 从图 1(b) 中可以看出 PD 信号几乎完全淹没在窄带干扰中, 难以进行识别。

### 2.2 窄带干扰抑制

STFTMM 可以有效反应出染噪 PD 信号时

频能量分布特征, 为了保证合理的时频分辨率, 将  $w(t)$  选为汉宁 (Hanning) 窗<sup>[14]</sup>, 窗口长度设置为 128, 以此得到图 1(b) 中染噪 PD 信号的 STFTMM 如图 2 所示。从图 2 中可以清晰看出 PD 信号和窄带干扰的时频特征, 其中 PD 信号的频率能量分布宽且时间范围有限; 窄带干扰的频率能量分布集中且时间范围长, 利用上述时频分布特征可以提取出窄带干扰数并区分染噪 PD 信号中的噪声帧和信号帧。

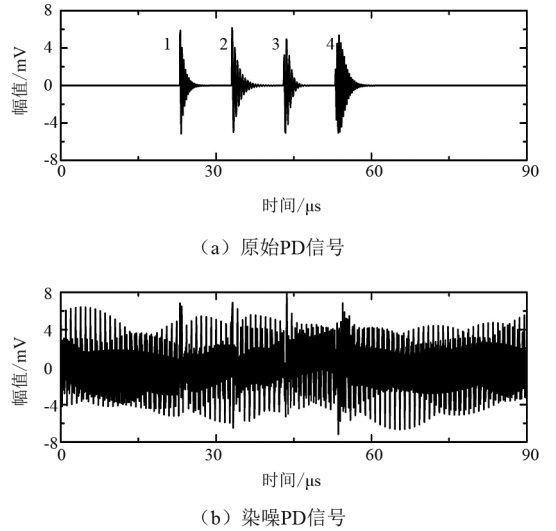


图 1 叠加窄带干扰前后的 PD 信号

根据图 2 中染噪 PD 信号的 STFTMM 可以确定窄带干扰数为 4, 然后利用矩阵束算法对染噪 PD 信号某一噪声帧内数据进行窄带干扰参数估计 (文中对噪声帧 2 内数据进行窄带干扰参数估计), 得到窄带干扰参数估计结果如表 1 所示。值得说明的是, 表 1 中窄带干扰参数估计值为噪声帧 2 内数据的窄带干扰参数值。因为噪声帧 2 的起始时间和整个染噪 PD 信号的初始时间存在时间差, 所以估计得到窄带干扰相位和整个染噪 PD 信号中窄带干扰相位会存在相位差; 同时矩阵束算法估计得到为余弦函数下的相位, 而非正弦函数下的相位; 上述两者共同造成了表 1 中  $\tilde{\theta}_i$  和  $\theta_i$  的差异。以此得到重构全时段的窄带干扰信号  $\tilde{z}(t)$  为

$$\tilde{z}(t) = \sum_{i=1}^p \tilde{B}_i \cos [2\pi \tilde{f}_i (t - t_0) + \tilde{\theta}_i] \quad (15)$$

式中,  $t_0$  为噪声帧 2 的初始时间。

利用式 (15) 重构全时段的窄带干扰信号, 进而得到干扰抑制后的 PD 信号如图 3 所示, 同时对干扰抑制后的 PD 信号进行短时傅里叶变换, 得到其 STFTMM 如图 4 所示。从图 3 和图 4 中可以清晰看

出,所提方法可以精准重构窄带干扰,以达到抑制染噪 PD 信号中窄带干扰的目的,并且 PD 波形的还原度较高。

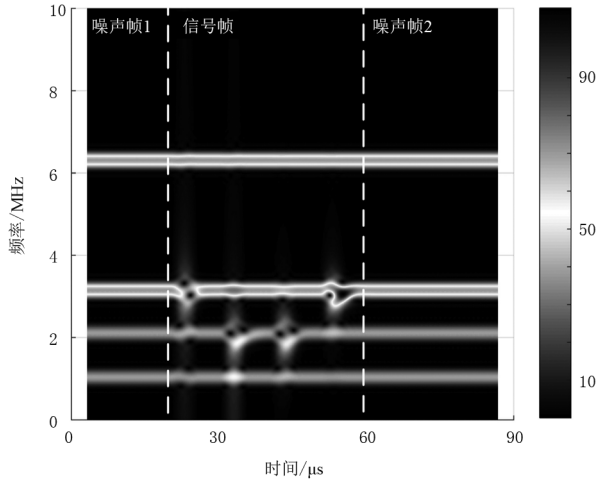
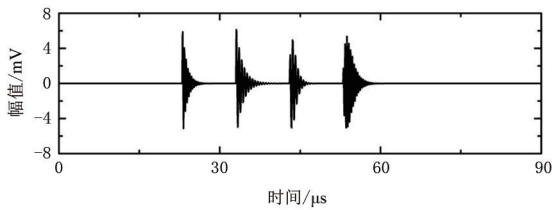
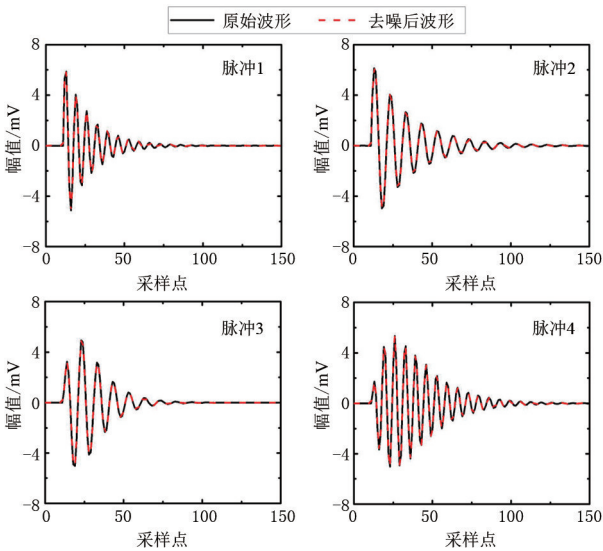


图 2 染噪 PD 信号的 STFTMM



(a) 染噪 PD 信号的窄带干扰抑制结果



(b) 窄带干扰抑制前后的波形对比

图 3 所提方法的窄带干扰抑制结果

表 1 仿真 PD 信号的窄带干扰参数估计结果

参数	干扰 1	干扰 2	干扰 3	干扰 4
$\tilde{B}_i/\text{mV}$	2.200 0	2.200 0	1.200 0	1.200 0
$\tilde{f}_i/\text{MHz}$	6.300 0	3.140 0	2.100 0	1.030 0
$\tilde{\theta}_i/\text{rad}$	0.115 2	-1.143 5	1.958 3	-0.637 7

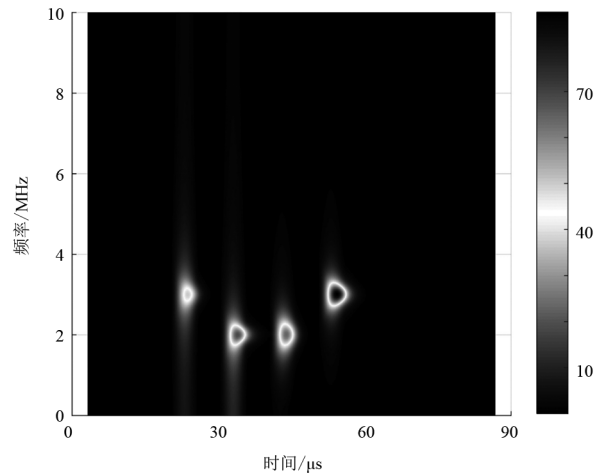


图 4 所提方法处理后的 STFTMM

为了进一步说明所提方法的优越性,利用傅里叶级数法<sup>[15]</sup>和局部能量比法<sup>[16]</sup>对图 1(b)中染噪 PD 信号进行窄带干扰抑制,得到窄带干扰抑制结果如图 5 所示。从图 5 中可以清晰地看出,传统的傅里叶级数法和局部能量比法的窄带干扰抑制结果中存在较大的残余噪声,PD 波形的还原度较差。而所提方法不存在上述问题,得到的 PD 波形更利于后续波形特征分析。

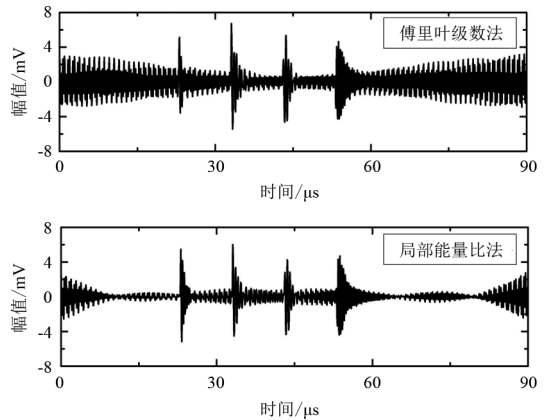


图 5 传统方法的窄带干扰抑制结果

### 3 应用案例

为了证实所提方法的实际使用效果,对实验室中 10 kV 交联聚乙烯电缆开展工频局部放电测试,电缆中预制有终端刀痕缺陷。局部放电采集传感器选用高频电流传感器,采集局部放电时将高频电流传感器扣在电缆的接地线上,采集频率设置为 100 MHz,采样时长设置为 40 s,即采样点总数为 4000。由于实验室中采集的 PD 信号噪声较小,人为向采集的 PD 信号中添加幅值为 2 mV,频

率为 2.00 MHz、4.00 MHz、16.00 MHz、6.31 MHz, 相位为  $\pi/3$  rad、 $\pi/4$  rad、 $\pi/2$  rad 以及幅值为 4 mV、频率为 9.32 MHz 和 12.00 MHz、相位为  $\pi/6$  rad 和  $\pi/3$  rad 的多组窄带干扰, 得到实测带有窄带干扰信号的 PD 信号如图 6 所示, 可以看出此时窄带干扰已经完全淹没了 PD 信号。

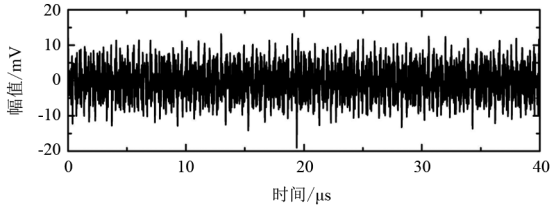


图 6 实测含有窄带干扰的 PD 信号

利用短时傅里叶变换得到图 6 中染噪 PD 信号的 STFTMM 如图 7 所示, 由于实测的染噪 PD 信号中窄带干扰呈现数目多且频率分布密集的特点, 此处将短时傅里叶变换的窗口长度设置为 256, 以提高频率分辨率。从图 7 中可以确定窄带干扰的数目为 5, 同时可以确定信号帧和噪声帧, 利用矩阵束算法在噪声帧 2 中估计窄带干扰参数, 得到参数估计结果如表 2 所示, 进而重构出全时段窄带干扰, 得到去噪结果如图 8(a) 所示。为了对比, 采用传统的傅里叶级数法和局部能量比法对图 6 中染噪 PD 信号进行了窄带干扰抑制, 得到抑制结果如图 8(b) 和图 8(c) 所示。从图 8 的对比结果中可以看出, 相比于

表 2 实测 PD 信号的窄带干扰参数估计结果

参数	干扰 1	干扰 2	干扰 3	干扰 4	干扰 5
$\tilde{B}_i/\text{mV}$	4.005 1	4.014 1	1.993 5	2.001 1	2.004 0
$\tilde{f}_i/\text{MHz}$	11.999 9	9.320 0	6.309 0	4.160 1	2.000 0
$\tilde{\theta}_i/\text{rad}$	-1.272 2	-1.381 4	-1.525 0	2.218 8	-0.642 7

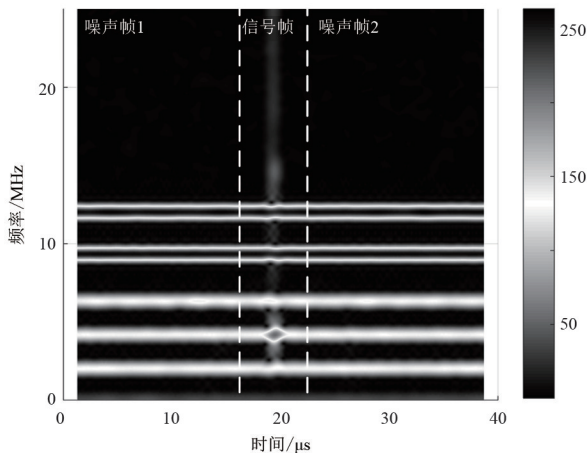
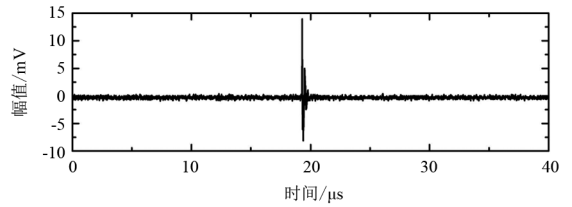
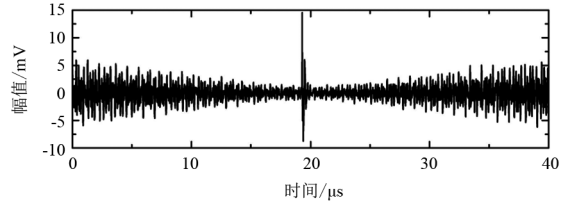


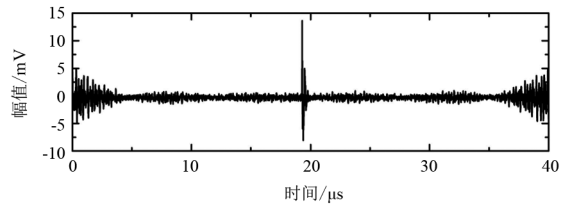
图 7 实测染噪 PD 信号的 STFTMM



(a) 所提方法



(b) 傅里叶级数法



(c) 局部能量比法

图 8 实测 PD 信号的窄带干扰抑制结果

传统算法, 所提方法的窄带干扰抑制效果更好, 去噪后波形的残余噪声更小。

由于仅仅是利用短时傅里叶变换确定窄带干扰个数和噪声帧的时间段, 而不需要用短时傅里叶变换估计窄带干扰相关参数, 所以短时傅里叶变换中频率分辨率的影响有限。在实际应用所提方法时, 可以多次选取不同长度的窗长来分析染噪 PD 信号, 当能较为清晰地确定窄带干扰数目和噪声帧的时间段即可。

## 4 结 论

1) 将短时傅里叶变换用于局部放电的窄带干扰抑制中, 短时傅里叶变换可以有效提取出窄带干扰数目和确定染噪 PD 信号中信号帧和噪声帧。

2) 矩阵束算法可以精确估计噪声帧中窄带干扰参数, 从而重构全时段的窄带干扰, 实现染噪 PD 信号的窄带干扰抑制。

3) 仿真和实测结果表明, 相比于传统的傅里叶级数法和局部能量比法, 所提方法对染噪 PD 信号的窄带干扰抑制效果更好, 残余噪声更少。

- [3] 胡国,颜云松,吴海,等.基于主配协同的配电网紧急负荷控制策略及终端实现[J].电力系统自动化,2022,46(2):180-187.
- [4] 吕军,盛万兴,刘日亮,等.配电网物联网设计与应用[J].高电压技术,2019,45(6):1681-1688.
- [5] 郑国华,黄朵,张伟,等.基于最大概率的故障指示器故障判定方法[J].电力系统保护与控制,2017,46(16):105-110.
- [6] 刘皓璐,邵建伟,王雪,等.基于数字孪生的配电自动化终端设备状态评价与故障预判[J].电网技术,2022,46(4):1605-1613.
- [7] 王东芳,黄国权,黄廷城,等.一二次融合柱上开关组合加权模糊状态评价[J].浙江电力,2020,39(2):48-52.
- [8] 周勳,么军,姚远,等.基于故障可观性指标的配电网FTU最优配置模型研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(17):117-124.
- [9] 闫磊,李远,赵文娜.关于配网自动化终端布点优化的研究[J].国外电子测量技术,2019,38(10):49-53.
- [10] 刘小春,伍惠斌,李映雪,等.配电自动化终端配置的双层优化模型[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):136-144.
- [11] 李兆拓,金松茂,张华.基于区域序号的自适应就地型馈线自动化故障处理方法[J].电力系统自动化,2019,43(19):179-184.
- [12] 刘小春,王巍璋,姚文昊,等.中压配电网故障处理模式配置研究综述[J].电测与仪表,2021,58(10):49-58.
- [13] 白宗璠,竞霞,张腾,等.MDBPSO算法优化的全波段光谱数据协同冠层SIF监测小麦条锈病[J].作物学报,2020,46(8):1248-1257.
- [14] 罗凡波,王平,徐桂菲,等.基于多尺度卷积神经网络的人群聚集异常预测[J].计算机工程与科学,2020,42(12):2223-2232.
- [15] 谢桦,亚夏尔·吐尔洪,陈昊,等.基于支持向量机算法的配电线路时变状态预测方法[J].电力系统自动化,2020,44(18):74-80.
- [16] 谢桦,陈昊,张沛.配电线路多源数据挖掘时变故障概率计算[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(9):63-67.
- [17] 刘辉,李鹏飞,林济铿,等.基于元胞自动机的山火蔓延及电力线路故障概率计算新方法[J].中国电力,2019,52(11):85-93.

#### 作者简介:

高艺文(1989),男,高级工程师,主要研究方向为配电网自动化、继电保护。(收稿日期:2021-12-08)

(上接第15页)

#### 参考文献

- [1] 饶显杰,周凯,汪先进,等.基于改进SVD算法的局部放电窄带干扰抑制方法[J].高电压技术,2021,47(2):705-713.
- [2] 李乃一,曹俊平,王少华,等.高压交联聚乙烯电缆附件典型缺陷局部放电特性分析[J].浙江电力,2019,38(1):58-63.
- [3] 唐炬,黄江岸,张晓星,等.局部放电在线监测中混频周期性窄带干扰的抑制[J].中国电机工程学报,2010,30(13):121-127.
- [4] 樊高辉,刘尚合,刘卫东,等.FFT谱最小熵解卷积滤波抑制放电信号中的周期性窄带干扰[J].高电压技术,2017,43(4):1378-1385.
- [5] 卢毅,韩志锷,陈瑜.基于能量比预处理的FFT窄带滤波方法[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40(5):948-951.
- [6] 钱勇,黄成军,陈陈,等.多小波消噪算法在局部放电检测中的应用[J].中国电机工程学报,2007,27(6):89-95.
- [7] 刘卫东,刘尚和.基于小波分解与滑动峰态的微弱放电信号联合检测方法[J].电力自动化设备,2016,36(11):152-156.
- [8] 姚林朋,郑文栋,钱勇,等.基于集合经验模态分解的局部放电信号的窄带干扰抑制[J].电力系统保护与控制,2011,39(22):133-139.
- [9] 沈宏,张蒲,徐其惠,等.基于经验模态分解和自适应噪声对消算法的窄带干扰抑制[J].高压电器,2009,45(1):8-14.
- [10] 张宇辉,段伟润,李天云.抑制局部放电信号中周期性窄带干扰的子空间重构方法[J].电力自动化设备,2017,37(7):178-183.
- [11] 徐永干,姜杰,唐昆明,等.基于Hankel矩阵和奇异值分解的局部放电窄带干扰抑制方法[J].电网技术,2020,44(7):2762-2769.
- [12] 陈正颖,王黎明,怡勇.基于短时傅里叶变换的直流电晕无线电干扰激发电流计算[J].高电压技术,2019,45(6):1866-1872.
- [13] 陶顺,郭傲,刘云博,等.基于矩阵束和奇异值分解的间谐波检测算法系[J].电力系统保护与控制,2021,49(2):57-64.
- [14] 许珉,王玺,程凤鸣.基于加Hanning窗递推DFT算法的测频方法[J].电力自动化设备,2010,30(11):73-74.
- [15] 程养春,李成榕,王伟.用傅立叶级数法消除局部放电检测中窄带干扰的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(20):106-111.
- [16] 罗新,牛海清,胡日亮,等.一种改进的用于快速傅里叶变换功率谱中的窄带干扰抑制的方法[J].中国电机工程学报,2013,33(12):167-175.

#### 作者简介:

周涛(1984),男,工程师,主要从事电气设备试验和故障诊断方面的工作。(收稿日期:2022-05-20)