

用于变压器局部放电在线监测的改进 NLMS 自适应滤波算法

雷云飞¹, 杨高才², 刘盛祥¹

(1. 湖南省电力公司 超高压管理局, 湖南省 长沙市 410004;
2. 湖南电力试验研究院, 湖南省 长沙市 410004)

An Improved Adaptive Normalized Least Mean Square Filtering Algorithm for On-Line Monitoring of Transformer Partial Discharge

LEI Yun-fei¹, YANG Gao-cai², LIU Sheng-xiang¹

(1. EHV Administration of Hunan Electric Power Corporation, Hunan 410004, Changsha Province, China;
2. Hunan Electric Power Test and Research Institute, Hunan 410004, Changsha Province, China)

ABSTRACT: It is significant for secure and stable operation of high-capacity power transformers to carry out on-line monitoring of partial discharge (PD) and the key problem of on-line monitoring is how to extract the weak PD pulse signal from strong interference signals. Due to its advantages in simple structure and stable performance, the adaptive least mean square (LMS) filtering algorithm is widely applied in noise cancellation, however there is a defect in this algorithm that the demands on its convergence speed and steady-state error cannot be met at the same time. For this reason, an adaptive normalized LMS (NLMS) filtering algorithm is proposed and during calculating the power of input signal the forgetting factor is led in as well as the sign function is used to replace step correction factor. The calculation burden of the proposed algorithm is light and the contradiction between convergence speed and steady state error can be well solved. Applying the proposed algorithm in on-line PD monitoring of power transformers, the effects are satisfied.

KEY WORDS: transformer partial discharge; adaptive filtering; forgetting factor; sign function; normalized least mean square (NLMS); on-line monitoring

摘要: 局部放电在线监测对大型电力变压器的安全稳定运行具有重要意义, 监测的关键是从强干扰信号中提取微弱的局部放电脉冲信号。最小均方自适应滤波算法具有结构简单、性能稳定等优点, 广泛应用于自适应噪声对消中, 但其收敛速度与误差存在矛盾, 不能同时得到满足。基于此, 提出了改进的归一化最小均方自适应滤波算法, 在计算输入信号功率时, 引入了遗忘因子, 并应用符号函数替代步长校正因子。该算法计算量小, 较好地解决了收敛速度与误差的矛盾, 在变压器局部放电在线监测中应用效果良好。

关键词: 变压器局部放电; 自适应滤波; 遗忘因子; 符号函数; 归一化最小均方; 在线监测

0 引言

油浸式电力变压器的绝缘介质中往往含有一定数量的气隙和油隙, 当电场强度超过临界值(本征击穿场强)时, 这些气隙或油隙就会发生局部放电, 即使介质中不含有气隙或油隙, 极不均匀分布的电场也可能导致局部放电。由于局部放电是导致变压器绝缘老化和损坏的主要原因之一, 近年来局部放电在线监测问题受到了广泛的关注和重视。由于现场局部放电信号中包含强电磁干扰信号, 有可能导致局部放电信号完全淹没在复杂的干扰信号中, 因此在线监测的主要是如何抑制和消除现场存在的强干扰信号。目前抑制窄带干扰的方法主要有自适应滤波法^[1-4]、小波法^[5-6]、非线性形态滤波法^[7-9]等。普通的模拟滤波器能够抑制部分已知频段的周期性干扰, 但其参数固定, 不能随干扰信号的频带变化自动调整。最小均方(least mean square, LMS)自适应滤波算法不需要任何信号和噪声的先验知识, 可直接利用有限个观测数据来估计噪声分量, 自动调节滤波器参数, 以适应信号变化的特性, 实现信号和噪声的最优分离。LMS自适应滤波算法实现简单且具有极好的稳定性, 非常适合于局部放电在线监测中的数字信号滤波^[1-4]。

LMS自适应滤波算法存在收敛速度与稳态误差之间的矛盾, 当输入信号自相关矩阵的特征值分

散时，其收敛性会变差。为了克服 LMS 算法的这一问題，文献[10-14]采用变步长改进了滤波算法，其基本思想是：当误差较大时，可采用大步长以加快收敛；当误差较小时，可采用小步长以减小稳态失调并提高收敛精度。文献[10-12]提出了变步长滤波算法的误差非线性函数，但步长调整公式过于复杂；文献[13]根据滤波器权系数梯度计算新步长；文献[14]提出的鲁棒 RSL 算法能获得较高的信噪比，但计算复杂度远大于 LMS 算法。本文将提出归一化最小均方(normalized least mean square, NLMS)自适应滤波算法，采用遗忘因子计算信号输入功率，并利用符号函数减少计算量，在初始阶段和时变阶段其步长能够自适应增大，而在稳态阶段其步长很小，加快了收敛速度，降低了计算误差。

1 LMS 自适应滤波原理

LMS 自适应滤波算法是 Widrow B 和 Hoff 于 1960 年提出的，由于其具有计算简单、性能稳定等优点，在自适应噪声对消、自适应谱线增强和自适应波束形成等方面获得了极为广泛的应用。LMS 自适应滤波算法是在基于最小均方误差(least mean square error, LMSE)准则的维纳滤波器和最陡下降法基础上提出的，可沿权值的梯度估值负方向搜索，并达到权值最优，以实现均方误差最小意义下的自适应滤波。自适应滤波器原理如图 1 所示。

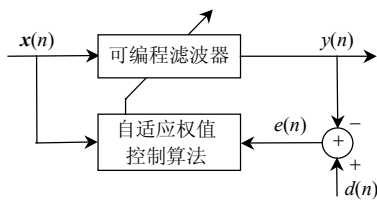


图 1 自适应滤波原理

Fig. 1 The principle of adaptive filtering process

标准的实信号 LMS 迭代公式为

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n) \quad (1)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2)$$

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + 2\mu\mathbf{x}(n)e(n) \quad (3)$$

式中： $\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-M+1)]^T$ ，其为输入信号向量； M 为滤波器阶数； $\mathbf{w}(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{M-1}(n)]^T$ 为权系数矢量； $d(n)$ 为期望输出信号； $y(n)$ 为实际输出信号； $e(n)$ 为误差信号； μ 为步长因子，需满足收敛条件($0 < \mu < \lambda_{\max}$ ， λ_{\max} 为输入信号 $\mathbf{x}(n)$ 自相关矩阵的最大特征值)。

根据最小均方误差准则，最佳滤波器参量 \mathbf{w}_{opt}

应使性能函数 $f(\mathbf{w}) = E\{e(n)^2\}$ 最小，该问题可看作为一个估计问题，即根据 $x(n)$ ， $x(n-1), \dots$ ， $x(n-M+1)$ 估计 $d(n)$ ， \mathbf{w}_{opt} 应使估计误差的均方值和 $f(\mathbf{w})$ 最小。

2 改进 NLMS 算法

LMS 算法的收敛速度和稳态误差不能同时得到满足，其性能由步长来控制。步长大，则收敛速度较快，稳态误差也较大；步长小，则收敛速度较慢，稳态误差也较小。在输入信号较大的情况，NLMS 算法可避免放大梯度噪声，因而具有更好的收敛性能。

LMS 算法的均方误差变化规律与最陡下降法的近似，权系数矢量 $\mathbf{w}(n)$ 的随机性使 LMS 算法的 $E\{e(n)^2\}$ 高于最陡下降法的 $E\{e(n)^2\}$ 。在 $E\{\mathbf{w}(n)\}$ 收敛到最佳值 \mathbf{w}_{opt} 后，权系数矢量继续按式(3)变化，其校正值 $2\mu\mathbf{x}(n)e(n)$ 不为 0，而是继续随机起伏，最终导致稳态均方误差 ξ 大于维纳误差 ξ_{\min} ，Widrow 引入失调系数 δ 来描述稳态均方误差对维纳误差的相对偏差，并证明 $\delta = \mu MP_{\text{in}}$ 。由此可知，滤波器阶数 M 越高，步长因子 μ 和输入信号功率 P_{in} 越大，则失调系数 δ 越大。如果使步长随输入功率成反比变化，则失调系数将保持不变，NLMS 算法正是基于该思路推导出的。

由式(3)可知，自适应调整方向仅取决于 $\mathbf{x}(n)e(n)$ 的符号，故可将其转化为式(4)定义的符号函数 $s(x)$ ：

$$s(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

转化后可减少计算量，降低算法的物理实现难度。本文采用简化公式 $s[x(n-i)]s[e(n)]$ 替换 $x(n-i)e(n)$ ，则式(3)可改为

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \frac{2\mu}{M\hat{\sigma}^2(n) + \gamma} s[x(n-i)]s[e(n)] \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}^2(n) = \alpha x_0^2(n) + (1-\alpha)\hat{\sigma}^2(n-1) \quad (6)$$

式中： $i = 0, 1, \dots, M-1$ ； μ 为步长因子($0 < \mu < 1$)， α 为遗忘因子($0 \leq \alpha \ll 1$)； γ 为大于 0 的常数，当输入信号功率很小时，权系数校正值过大，故实际应用时加入常数 γ 可防止权系数不稳定； $\hat{\sigma}^2(n)$ 为输入信号功率的估计值。当 x 不为 0 时，符号函数亦可表示为 $s(x) = x/|x|$ ， $x \neq 0$ ，因此改进 NLMS 算法也可视为一种变步长 LMS 算法。

3 仿真分析

3.1 算法收敛性能比较

采用与文献[10]相同的仿真条件：自适应滤波器阶数 $M=2$ ；滤波器权系数矢量初值 $\mathbf{w}=[0.8,0.5]^T$ ，在第500个采样点处，权系数矢量变为 $\mathbf{w}=[0.4,0.2]^T$ ；输入信号是均值为0，方差为1的高斯白噪声；在 $\mathbf{x}(n)$ 中加入方差为0.04的不相关高斯白噪声 $\mathbf{v}(n)$ 得到 $d(n)$ ；采样点数为1000，仿真次数为200，对各次仿真结果求平均值得最终结果，并由此绘出收敛曲线。

图2是LMS、标准NLMS和改进NLMS算法分别采用文献[5]仿真条件所得均方误差，结果表明改进NLMS算法的收敛特性明显优于LMS及标准NLMS算法的收敛特性。

图3为变符号函数归一化最小均方(NLMS-ISA)算法和本文算法在保证相同稳态误差情况下采用文献[5]仿真条件所得均方误差，NLMS-ISA算法参数来自文献[15]。

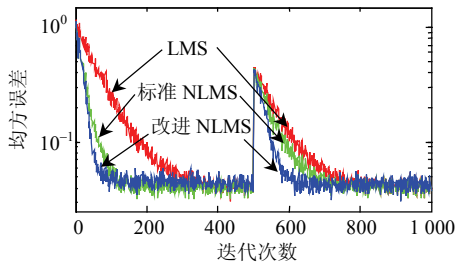


图2 LMS、标准NLMS和改进NLMS算法的均方误差
Fig. 2 Mean squared errors of LMS, standard NLMS and improved NLMS algorithms

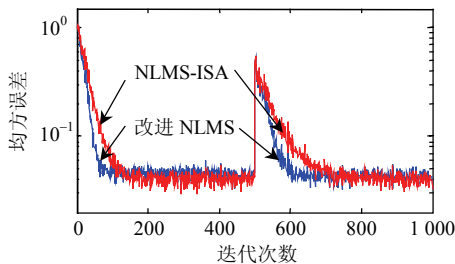


图3 NLMS-ISA和改进NLMS算法的均方误差
Fig. 3 Mean squared errors of NLMS-ISA and improved NLMS algorithms

由图3可知，改进NLMS算法的收敛速度较快。改进NLMS算法引入了遗忘因子，并采用式(6)的迭代方法计算输入信号功率，计算量增加很少，同时将标准NLMS算法中的乘法运算转化为式(4)和(5)给出的符号运算，使改进NLMS算法计算量小于标准NLMS算法计算量。

3.2 局部放电信号去噪分析

局部放电信号是超宽频带信号，从局部放电点沿变压器绕组传播到检测点的过程中会产生较大的振荡和衰减，因此现场检测到的局部放电信号一般为衰减振荡信号。局部放电脉冲在理论上可以用以下2种模型来表示：

$$f_1(t) = A_1 e^{-t/\tau} \sin(f_c 2\pi t) \quad (7)$$

$$f_2(t) = A_2 (e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \sin(f_c 2\pi t) \quad (8)$$

式中： A 为放电信号幅值； τ 为衰减系数； f_c 为振荡频率。

令 $A_1=0.5$ ， $A_2=5$ ， $\tau=2 \times 10^{-7}$ ， $f_c=5 \times 10^6$ ，系统采样频率 $F_s=3 \times 10^7$ ，则局部放电脉冲信号仿真结果如图4(a)所示，在模拟过程中加入幅值为1的调幅干扰，则混合信号仿真结果如图4(b)所示。由图4(b)可知局部放电信号已全部淹没在干扰信号中。

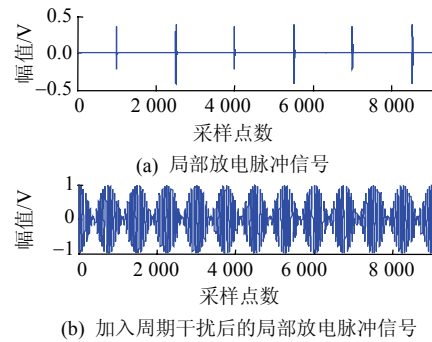


图4 干扰信号加入前后局部放电信号
Fig. 4 Partial discharge pulses before and after mixed with noises

利用改进NLMS算法对信号去噪时，将输入信号 $\mathbf{x}(n)$ 延时 Δt ，使 $\mathbf{x}(n)$ 与期望输出 $d(n)$ 中的局部放电脉冲尽量不相关，这样滤波后实际输出 $y(n)$ 中仅含有周期干扰，因此，式(2)所得误差信号即为局部放电脉冲信号。令 $\mu=0.001$ ， $\gamma=0.001$ ，滤波器阶数 M 分别取4、8、15，仿真所得去噪波形如图5所示。由图5可知，滤波器阶数 M 越大收敛速度越快。 $M=15$ 时，所得脉冲幅值与图4(a)中输入的局放信号幅值基本相同；继续提高 M 后，去噪效果不再有明显改善； $M < 8$ 时，稳态误差较大，所得脉冲幅值远大于图4(a)中输入的局部放电信号，并且收敛速度也较慢。

4 现场实际信号分析

现场局部放电信号来自笔者参与开发的变压器在线监测系统，该系统现已在某变电站成功运

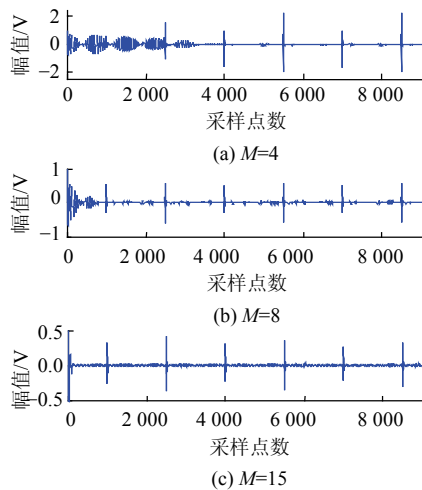


图 5 局部放电信号去噪结果

Fig. 5 Denoised results using improved NLMS to simulate partial discharge signals

行。在变压器铁心接地线上安装电流传感器，这样无论局部放电发生在变压器高压侧、中压侧还是低压侧，在铁心接地线上都有较好响应。分析现场数据后发现，局部放电信号中包含大量的周期性窄带干扰信号，有的甚至已淹没在干扰信号中。

现场最强的干扰信号是电力载波通信干扰和电力系统高频保护信号，干扰频率在 30 kHz 到 0.5 MHz 之间，每个单向通道占用标准频带 4 kHz，这是一类十分强大的干扰信号，干扰波峰值一般在 0.5 V 以上，干扰较强时甚至可以达到 1 V 以上。信号从传感器到 A/D 数据采集模块需要首先通过信号调理单元对信号进行前置处理，故文中信号只有几个频段的周期干扰信号。另外，周期性窄带干扰信号的出现也不是固定不变的，不同时期干扰噪声的频带和强度也可能不一样。本文给出的实测数据是局部放电试验时获取的现场信号，试验时离线试验装置检测的局部放电在放电量小于 300 pC，此时系统检测的最大放电幅值约为 1 V。图 6 即为现场捕获的包含大量周期性干扰的局部放电信号。

自适应滤波时，选取滤波器阶数 $M = 10$ ，初始步长 $\mu = 0.001$ 。采用 LMS、标准 NLMS 和改进

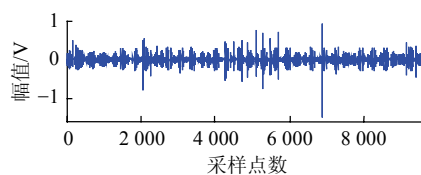


图 6 在线监测系统捕获的现场局部放电信号
Fig. 6 Partial discharge signal from on-line monitoring system

NLMS 算法分别对信号进行处理，其降噪结果如图 7 所示。LMS 算法能使周期干扰幅值有较小衰减，标准 NLMS 算法次之，改进 NLMS 算法可使周期干扰基本被剥离，得到的放电脉冲幅值与原始信号接近，几乎没有相移，去噪效果较为理想。

图 8 为滤波器阶数对改进 NLMS 算法去噪效果的影响， M 分别取 3、6、10， $\mu = 0.001$ 。 $M=3$ 时，周期干扰信号几乎没有衰减，脉冲信号幅值约等于原始信号的 2 倍； $M=6$ 时，部分周期干扰被去除，且脉冲幅值与 $M=3$ 时的一致，有较大的稳态失调，去噪效果不理想。因此，局部放电在线监测中利用改进 NLMS 算法处理信号时需要选择合理的参数，才能在收敛速度和稳态失调之间获得均衡。

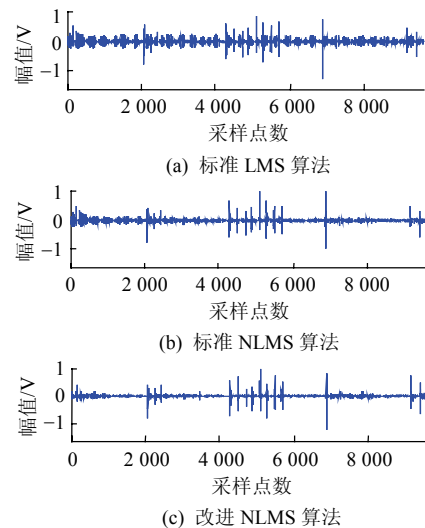


图 7 标准 LMS、标准 NLMS 和改进 NLMS 算法降噪结果
Fig. 7 Denoised results using LMS, standard NLMS and improved NLMS

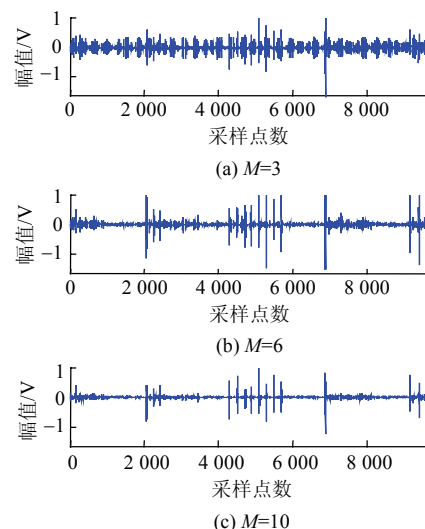


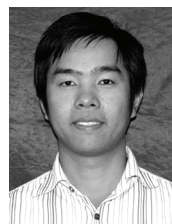
图 8 滤波器阶数 M 不同时改进 NLMS 算法的去噪效果
Fig. 8 Denoised results using different filter orders ($M=3, 6, 10$)

5 结论

局部放电在线监测信号的处理实时性要求很高,针对复杂的周期性窄带干扰,本文采用改进NLMS自适应滤波算法进行去噪,减少了计算量,并具有较快的收敛速度和较小的稳态误差。滤波器阶数 M 、初始步长 μ 和遗忘因子 α 等参数的选择对算法的收敛速度和稳态失调影响较大,实际应用中应依据情况合理选择。

参考文献

- [1] Khan S Z. A new adaptive technique for on-line partial discharge monitoring[J]. IEEE Trans on Dielectric and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 700-705.
- [2] 孙才新, 罗兵, 顾乐观. 自适应数字滤波在局部放电在线监测信号处理中应用的研究[J]. 变压器, 1997, 34(7): 19-23.
Sun Caixin, Luo Bing, Gu Leguan. A study on the application of the adaptive digital filter in on-line monitoring PD signal processing [J]. Transformer, 1997, 34(7): 19-23(in Chinese).
- [3] 乐波, 曹戌平, 李俭. 局部放电在线监测中的自适应数字滤波器研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(6): 617-621.
Yue Bo, Cao Xuping, Li Jian. Adaptive digital filter for on-line partial discharge monitoring[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(6): 617-621 (in Chinese).
- [4] Kwong R H, Johnston E W, A variable step size LMS algorithm [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1992, 40(1): 1633-1642.
- [5] 王立欣, 诸定秋, 蔡维铮. 局部放电在线监测中基于小波变换的阈值消噪算法研究[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 46-48.
Wang Lixin, Zhu Dingqiu, Cai Weizheng. Wavelet transform based de-noise algorithm by thresholding in on-line partial discharge detection[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 46-48(in Chinese).
- [6] 黄成军, 郁惟镛. 基于小波分解的自适应滤波算法在抑制局部放电窄带周期干扰中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 107-111.
Huang Chengjun, Yu Weiyong. Study of adaptive filter algorithm based on wavelet analysis in suppressing PD's periodic narrow bandwidth noise[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 107-111(in Chinese).
- [7] 岳蔚, 刘沛. 基于数学形态学消噪的电能质量扰动检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 13-17.
Yue Wei, Liu Pei. Detection of power quality disturbances based on mathematical morphology filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7): 13-17(in Chinese).
- [8] 凌玲, 徐政. 基于数学形态学的动态电能质量扰动的检测与分类方法[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 62-66.
Ling Ling, Xu Zheng. Mathematical morphology based detection and classification of dynamic power quality disturbances[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 62-66(in Chinese).
- [9] 欧阳森, 王建华, 宋政湘. 基于数学形态学的电力系统采样数据处理方法[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 61-65.
Ouyang Sen, Wang Jianhua, Song Zhengxiang. A new power system sampled data processing method based on morphology theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 61-65(in Chinese).
- [10] 覃景繁, 欧阳景正. 一种新的变步长LMS自适应滤波算法[J]. 数据采集与处理, 1997, 12(3): 171-174.
Qin Jingfan, Ouyang Jingzheng. A novel variable step size LMS adaptive filtering algorithm based on sigmoid function[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 1997, 12(3): 171-174(in Chinese).
- [11] 高鹰, 谢胜利. 一种变步长LMS自适应滤波算法及分析[J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1094-1097.
Gao Ying, Xie Shengli. A variable step size LMS adaptive filtering algorithm and its analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(8): 1094-1097(in Chinese).
- [12] 孙恩昌, 李于衡, 张冬英. 自适应变步长LMS滤波算法及分析[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14): 3172-3175.
Sun Enchang, Li Yuheng, Zhang Dongying. Adaptive variable-step size LMS filtering algorithm and its analysis[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(14): 3172-3175 (in Chinese).
- [13] 谷源涛, 唐昆, 崔慧娟. 新的变步长归一化最小均方算法[J]. 清华大学学报, 2002, 42(1): 15-18.
Gu Yuantao, Tang Kun, Cui Huijuan. Novel variable step size NLMS algorithm[J]. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2002, 42(1): 15-18 (in Chinese).
- [14] 赵雪梅, 王立欣, 蔡维铮. 局部放电在线监测中的自适应滤波方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(20): 29-32.
Zhao Xuemei, Wang Lixin, Cai Weizheng. Adaptive filter method for partial discharge on-line measurement system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(20): 29-32(in Chinese).
- [15] 田斌鹏, 张翠芳, 闫磊. 一种新的可变步长LMS自适应滤波算法[J]. 计算机仿真, 2007, 24(6): 89-91.
Tian Binpeng, Zhang Cuifang, Yan Lei. A variable step size LMS adaptive filtering algorithm[J]. Computer Simulation, 2007, 24(6): 89-91(in Chinese).



雷云飞

收稿日期: 2009-12-27。

作者简介:

雷云飞(1983—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为变电设备状态监测与检修试验等, E-mail: pglyf_ccee@163.com;

杨高才(1982—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为电力系统规划;

刘盛祥(1975—), 男, 工程师, 主要从事变电设备的修试及管理工作。

(编辑 徐梅)