

改进的双 Sigmoid 函数变步长 自适应算法及在 OCT 中的应用

刘宪爽¹, 吴华明¹, 肖文波¹, 孙学勇², 朱俊²

(1. 江西省光电检测技术工程实验室 南昌航空大学测试与光电工程学院, 江西南昌 330063;
2. 江西省电力设计院, 江西南昌 330006)

摘要: 为提高光学电流互感器(Optical Current Transducer, OCT)在低信噪比环境下的测量准确度和长期稳定性, 该文从影响 OCT 性能关键因素之一的算法入手, 在分析现有的变步长自适应算法的基础上, 结合 OCT 输出信号的特征和 OCT 工作的环境, 提出一种改进的双 Sigmoid 函数变步长自适应算法, 并将这种算法与现有的变步长自适应算法进行了仿真对比分析以及利用 ActiveX 技术将该算法在 OCT 中进行了应用测试, 证明了该算法在低信噪比环境下提高 OCT 的测量准确度和长期稳定性的优势。

关键词: 光学电流互感器; 变步长自适应算法; 双 Sigmoid 函数; ActiveX

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)01-0234-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.01.031

Improved Double Sigmoid Function Variable Step Size Adaptive Algorithm and Its Application in OCT

LIU Xian-shuang¹, WU Hua-ming¹, XIAO Wen-bo¹, SUN Xue-yong², ZHU Jun²

(1. Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, School of Measuring and
Optical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China;
2. Jiangxi Electric Power Design Institute, Nanchang, Jiangxi 330006, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy and long-term stability of OCT in low SNR (signal-noise ratio) environment, this paper starts from the algorithm that one of the key factors affects the performance of OCT. Basing on the analysis on existing variable step size adaptive algorithm, combining the characteristics of the output signal of OCT and the working circumstance of OCT, we proposed an improved double Sigmoid function variable step size adaptive algorithm, and compared this algorithm with the existing variable step size adaptive algorithm through simulation. Then, the algorithm is tested in OCT based on ActiveX. The results demonstrated the advantage of this algorithm in improving the measurement accuracy and long-term stability of OCT in low SNR environment.

Key words: optical current transducer; variable step size adaptive algorithm; double sigmoid function; ActiveX

1 引言

OCT 因其先进的传感机理、相对简单可靠的绝缘性能以及消除了铁磁饱和等优点, 逐步成为智能电网发展的核心设备。但由于其本身大部分的光学元件易受到环境温度、湿度、振动等干扰因素的影响, 其输出数据中包含了光电探测器散粒噪声、 $1/f$ 噪声和光源相对强度噪声等, 这些噪声大部分频段与被测电流信号频

段重叠, 并且是时变的, 相互耦合, 没有准确的统计特性, 这便影响到了 OCT 在电力系统控制、保护和测量等方面的精度和可靠性; 因此 OCT 的大面积推广和应用受到了限制^[1]。近年来, 通过在一些变电站的应用中了解到基于最小均方误差算法 (Least Mean Square, LMS) 的自适应光学电流互感器 (Adaptive Optical Current Transducer, AOCT) 在一定程度上提高了 OCT 的测量准确度, 但从低信噪比环境下的变电站的工作情况来看,

收稿日期: 2017-05-17; 修回日期: 2017-12-29; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11264031); 江西省自然科学基金 (No. 20151BAB207054, No. 20114BAB201019); 江西省青年科学基金项目 (No. 20143ACB21011)

由于传统 LMS 算法本身收敛速度和失调量之间固有的矛盾,以致 AOCT 的长期稳定性不太令人满意^[2]. 目前,对于 AOCT 在低信噪比环境下运行稳定性的问题,仅仅停留在对光学材料的改进以及对系统结构的改善,而缺乏对算法有效性的研究和验证^[3]. 基于此,本文提出了一种更加适用于处理 OCT 输出信号的改进双 Sigmoid 函数变步长 LMS 算法,并利用微软提出的使用组件对象模型的 ActiveX 自动化技术,设计了一种变步长自适应滤波系统,然后运用该系统将几种变步长自适应算法进行了对比应用测试,测试结果表明本文提出的算法在处理 OCT 输出信号方面具有显著的优势.

2 改进的双 Sigmoid 函数变步长自适应算法原理及性能

2.1 改进算法原理分析

变步长自适应算法在很大程度上解决了传统 LMS 算法的不足,其基本原则是在算法收敛的过程中动态调整步长因子的大小^[4]. 在众多的变步长自适应算法中,可以大致分为两类.

一类是对步长因子 $\mu(n)$ 随误差 $e(n)$ 变化的函数关系作各种变形,比较具有代表性的是由覃景繁等人提出的基于 Sigmoid 函数的变步长算法(Sigmoid Variable Step Least Mean Square, SVSLMS)^[5],其步长因子 $\mu(n)$ 与误差 $e(n)$ 之间的函数关系为

$$\mu(n) = \beta \left(\frac{1}{1 + \exp(-\alpha |e(n)|)} - 0.5 \right) \quad (1)$$

式(1)中, α 是控制函数形状的常量, β 是控制函数取值范围的常量.

图 1 是 SVSLMS 算法、文献[6]算法以及本文改进算法的步长因子与误差的关系曲线. 图 1(a)、(b)和(c)中 SVSLMS 算法的参数 β 分别取 1, 1, 0.2, α 分别取 6, 2.2, 6; 文献[6]算法的参数 β 分别取 0.5, 0.5, 0.1, α 分别取 6, 3, 6; 本文改进算法的参数与文献[6]的参数保持一致. 参数 h 统一取 2.

如图 1 所示,该步长迭代公式能保障步长 $\mu(n)$ 随着误差 $e(n)$ 的减小而减小. 但是在算法即将收敛阶段,步长变化较快,这样可能会引起振荡,由此会产生较大的稳态误差.

文献[6]采用 2 个 Sigmoid 函数的乘积,相比 Sigmoid 函数,误差相同时,该算法能够获取更小的步长因子,使步长因子在算法即将收敛阶段缓慢变化,从而降低稳态误差. 本文将这种算法记为文献[6]算法,其步长因子 $\mu(n)$ 与误差 $e(n)$ 之间的函数关系如式(2)所示.

$$\mu(n) = \beta \left(1 - \frac{h+1}{h + \exp(-\alpha |e(n)|) + \exp(\alpha |e(n)|)} \right) \quad (2)$$

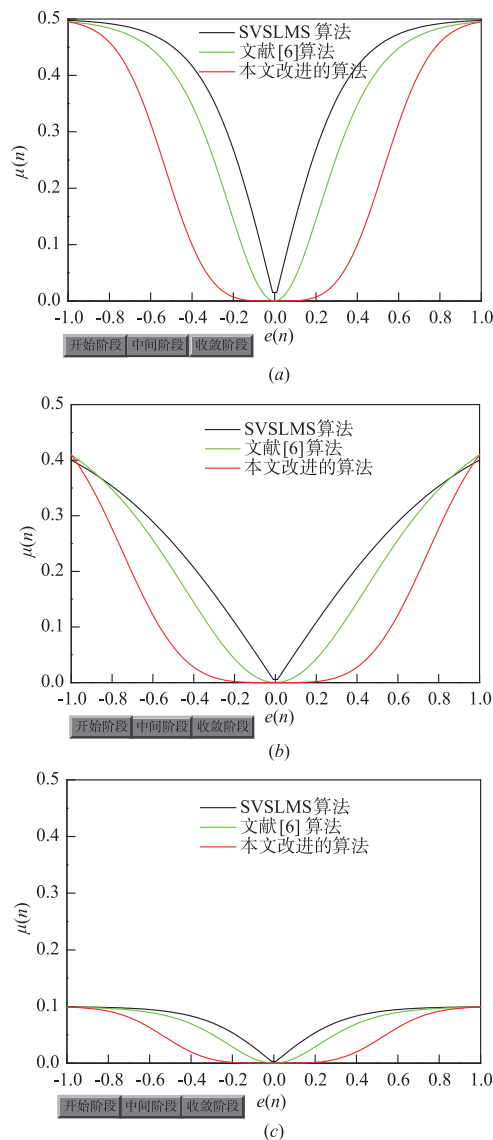


图1 误差与步长因子的关系曲线

式(2)中, h 是控制步长变化速度的常量.

但在噪声比较大的环境中,步长因子在算法收敛阶段仍然保持很大,较大的步长因子在围绕最佳权系数值时会产生较大的波动^[7]. 因此,当系统工作于低信噪比环境中,应用该算法仍然会产生比较大的稳态误差.

文献[7]经过 Sigmoid 函数的平移翻转变化来满足变步长算法的步长调整原则(本文将此算法记为文献[7]算法),其误差 $e(n)$ 与步长因子 $\mu(n)$ 的函数关系为

$$\mu(n) = \beta(n) \frac{2}{1 + \exp(-\alpha(n) (|e(n)|^3))} - 1 \quad (3)$$

式(3)中, $\alpha(n)$ 、 $\beta(n)$ 为自适应步长参数,是误差 $e(n)$ 的函数,可随着 $e(n)$ 的变化自适应调整,目的是解决固定参数的选取对滤波性能的影响.

该算法能够使参数在自适应调整的过程中得到一

个较合理的取值,从而保证算法具有较小的稳态误差,但是参数在自适应调整的过程中,算法的收敛速度必然会有所减慢.所以该算法是以牺牲收敛速度来提高稳态精度的.另外,引入自适应步长参数 $\alpha(n)$ 、 $\beta(n)$ 会导致计算量的增加,且过多随误差变化的因子不利于硬件实现.

文献[8]和文献[9]通过双曲正切函数 \tanh 来改变 $e(n)$ 与 $\mu(n)$ 的函数关系(本文将此算法记为文献[9]算法),其中文献[9]中 $e(n)$ 与 $\mu(n)$ 的函数关系为

$$\begin{aligned} \mu(n) &= \beta(n) \tanh(\alpha |e(n)| |e(n-1)|) \\ \beta(n) &= p\beta(n-1) = \dots = p^n \beta(0) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中, α 为一固定参量, $\beta(n)$ 为步长函数幅度因子, p 为衰减系数.通过衰减系数 p 的变化来控制步长幅度因子,通过步长幅度因子的初值来控制收敛速度.

该算法通过步长幅度因子的衰减规律也可作为 $e(n)$ 与 $\mu(n)$ 的函数关系提供一个合理的参数,但是过多变化的因子以及步长幅度因子初值的选取是否合理都会为算法初始阶段的收敛速度带来不稳定的影响,且计算量也会增加.

另一类变步长自适应算法是使步长因子 $\mu(n)$ 随 $e(n)$ 的自相关估计变化而改变.文献[10]运用此方法并将其称为 MVSS(Modified Variable Step Size)算法,其 $\mu(n)$ 与 $e(n)$ 的函数关系为

$$\begin{aligned} \mu(n+1) &= \alpha\mu(n) + \gamma p^2(n) \\ p(n) &= \beta p(n-1) + (1-\beta)e(n)e(n-1) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中, $\alpha(0 < \alpha < 1)$ 和 $\beta(0 < \beta < 1)$ 为权系数参数; $\gamma > 0$; $p(n)$ 是 $e(n)$ 与 $e(n-1)$ 的自相关时间均值估计,用来控制步长的更新.

该算法没有解决 $e(n)e(n-1)$ 所带来收敛速度慢的问题,且在用 $p(n)$ 调节步长更新的过程中,不能保障 $\mu(n)$ 随 $e(n)$ 变化的曲线趋于平稳的原则,最终将会影响算法的稳态精度.

本文旨在处理 OCT 的输出信号,提高 OCT 的测量精度和稳定性.当电网发生短路故障时,二次保护电路必须快速的切断短路电流,若有延时,强大的短路电流将会给电网带来很大的危害,这一点是通过 OCT 信号处理单元中算法的收敛速度来保障的.其次,OCT 测量的二次电流必须准确的反映一次电流,否则二次保护电路会发生拒动或误动,而这一点是通过算法的稳态精度来保证的^[11].所以应用在 OCT 中的算法既要保证较快的收敛速度也要保证较小的稳态误差.因此,本文提出的步长 $\mu(n)$ 与误差 $e(n)$ 的函数关系为

$$\begin{aligned} \mu(n) &= \\ &\beta \left(1 - \frac{h+1}{h + \exp(-\alpha |e(n-1)e(n)|) + \exp(\alpha |e(n)e(n-1)|)} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

从图 1 可以看出,本文改进的算法在收敛阶段较文献[6]算法下降更加平缓,且由式(6)可以看出改进的算法是用 $e(n)$ 与 $e(n-1)$ 的自相关时间均值来控制步长更新,因此从理论上来说,本文改进算法的误差与步长的关系曲线在抗噪声能力方面更具优势.

但是,从图 1 中也可以看出,在开始至中间阶段,本文改进算法的收敛因子下降很快,这必会造成算法开始阶段收敛速度相对较慢的问题,为了解决这个问题,本文引出分段变步长的概念,即在算法开始阶段取一个固定的大步长来加快收敛速度(本文选择 0.25),在迭代 100 次(迭代次数至少为 1000 次)之后,再用本文提出的步长与误差的函数关系来调节步长.为了减小初始阶段固定步长引起的失调,对权系数更新方程做归一化处理.式(7)即为归一化处理之后的权系数更新方程

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu e(n)x(n)}{\gamma + x^T(n)x(n)} \quad (7)$$

式(7)中, $x(n)$ 表示输入信号序列, $x^T(n)$ 表示输入信号的转置; $\gamma(0 < \gamma < 1)$ 为一常量参数,用来避免在 $x^T(n)x(n)$ 很小时出现很大的步长.

由此,可得到本文改进的双 Sigmoid 函数变步长 LMS 自适应算法的具体步骤,如算法 1 所示.

算法 1 中, $w(n)$ 表示 LMS 算法的权系数; $y(n)$ 表示输出信号, $d(n)$ 表示期望信号; $e(n)$ 表示误差信号; R 表示输入信号的相关矩阵; $\text{tr}[R]$ 表示输入信号相关矩阵 R 的迹.

算法 1 本文改进的算法具体步骤

参量	$M =$ 滤波器抽头数
	μ 步长因子: $0 < \mu \leq \frac{1}{\text{tr}[R]}$
初始条件	$w(0) = 0$ 或由先验知识确定
运算	(1) 得到 $x(n), d(n)$
	(2) 滤波: $y(n) = w^T(n)x(n)$
	(3) 误差估计: $e(n) = d(n) - y(n)$
	(4) 步长迭代:
	if $n < 100$ $\mu = 0.25$;
	else
	$\mu(n) = \beta \left(1 - \frac{h+2}{h + \exp(-\alpha e(n-1)e(n)) + \exp(\alpha e(n)e(n-1))} \right)$
	and
	(5) 更新权系数:
	$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu e(n)x(n)}{\gamma + x^T(n)x(n)}$

通过比较图 1(a)、(b)和(c)我们可以发现,参数 β 对函数的取值范围影响很大,过大的 β 值会导致步长因子下降很快,而变化过快的步长因子会使得算法产生振荡;参数 α 对函数的形状变化影响很大,也即影响函

数模型曲线的平缓程度,进而影响整个算法的滤波性能^[12].所以,如果参数选取恰当,则滤波效果理想,反之则会使系统收敛速度减慢或使稳态误差增大.针对固定参数的取值问题,本文设计的基于 ActiveX 技术的变步长自适应滤波系统可快速的使每种算法的参数达到最优的取值,从而得到最佳的滤波效果.

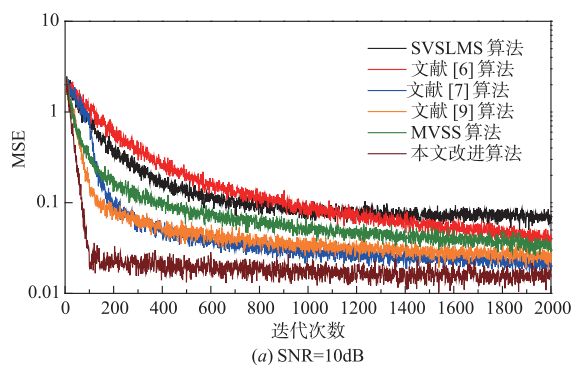
2.2 改进算法性能分析

当系统加入测量噪声 $N(n)$ 时,由噪声梯度估计引起的瞬时偏差为 $\Delta \mathbf{w}(n)$,且 $\Delta \mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n) - \mathbf{w}_0$ (其中, $\mathbf{w}(n)$ 为实际权矢量, \mathbf{w}_0 为最佳权矢量),则在第 n 时刻输出的误差 $e(n)$ 为

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - \mathbf{w}_0^T x(n) - \Delta \mathbf{w}^T(n) x(n) \\ &= e_0(n) - \Delta \mathbf{w}^T(n) x(n) \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中, $e_0(n)$ 表示最优输出误差,且

$$\begin{aligned} e_0(n) &= d(n) - \mathbf{w}_0^T x(n) \\ &= \mathbf{w}_0^T x(n) + N(n) - \mathbf{w}_0^T x(n) \\ &= N(n) \end{aligned} \quad (9)$$



故 $e_0(n)$ 即是 $N(n)$, 因此可得到

$$\begin{aligned} e(n)e(n-1) &= N(n)N(n-1) - N(n)\Delta \mathbf{w}^T(n-1)x(n-1) \\ &\quad - \Delta \mathbf{w}^T(n)x(n)N(n-1) \\ &\quad + \Delta \mathbf{w}^T(n)x(n)x^T(n-1)\Delta \mathbf{w}(n-1) \end{aligned} \quad (10)$$

由于 $N(n)$ 是均值为零的噪声, $N(n)$ 与 $x(n)$ 无关, 并且噪声 $N(n)$ 自身不相关^[13], 故由式(10)可得

$$E[e(n)e(n-1)] = E[\Delta \mathbf{w}^T(n)x(n)x^T(n-1)\Delta \mathbf{w}(n-1)] \quad (11)$$

本文是通过 $e(n)e(n-1)$ 自相关时间均值来控制步长更新的, 从式(11)可以看出, 采用这种方法能够很好的减小噪声 $N(n)$ 对步长的影响, 为算法的测量精度提供了保障.

3 算法性能仿真分析

将信噪比 SNR 分别设置 10dB 和 0dB 两种情况. 采样点数为 2000, 分别做 200 次独立仿真, 然后求其统计平均, 得到的学习曲线 (MSE) 如图 2 所示.

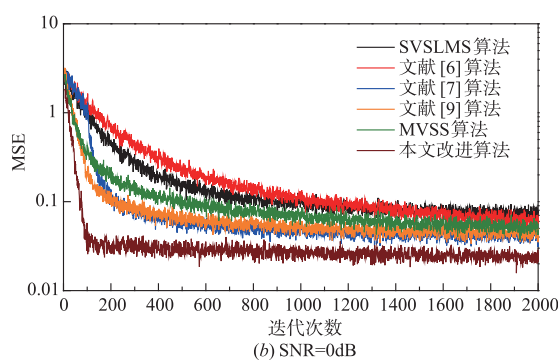


图2 信噪比不同情况下六种算法的学习曲线

图 2 中, 在信噪比为 10dB 的情况下, SVSLMS 算法、文献[6]算法以及 MVSS 算法收敛速度较慢、稳态误差较大, 不满足 OCT 的运行环境. 文献[7]和文献[9]算法在迭代 2000 次之后的稳态误差可能会低于本文改进的算法, 但本文改进的算法的收敛速度明显高于文献[7]和文献[9]算法; 当增加信号噪声的强度, 由图 2(b) 可以看出, 文献[7]和文献[9]算法的性能明显低于本文的改进算法. 又由于 OCT 的测量信号必须快速、准确的反映一次侧电流信号, 以避免可能发生的短路电流对电网造成的危害. 所以, 本文改进算法更能满足 OCT 在变电站环境下运行稳定的要求.

4 算法应用测试试验

4.1 试验方案设计

图 3 为本文设计的滤波系统处理 OCT 输出信号的试验方案.

图 3 中, OCT 的光学传感头将被测电流信号转换为光信号, 再经过光电探测器转变为电信号^[14]. 我们运

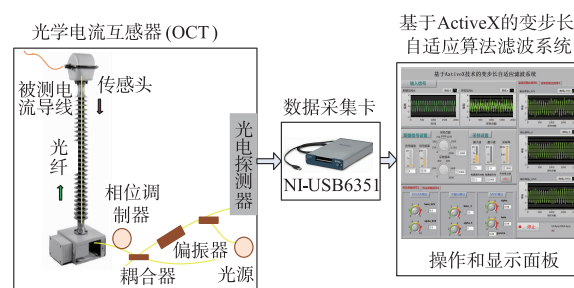


图3 算法应用试验方案图

用数据采集卡采集到光电探测器的输出信号, 然后运用基于 ActiveX 技术的变步长自适应滤波系统对数据进行处理. 该系统设计的基本思想是: 利用 ActiveX 将 LabView 和 MATLAB 有机结合. 其中, LabView 负责设计用户图形界面, 数据采集和结果显示, MATLAB 则在后台处理算法, 并将处理后的数据输入到 LabView 环境中^[15]. 在图 3 的操作和显示面板中, 我们可以对算法的参数进行调节, 从而得到较为理想的参数, 以使每种算

法快速的达到最佳的滤波性能,提高算法的实用性.

4.2 测试结果分析

将被测电流信号的基波幅值设为 1A, 频率为

50Hz. 将采样频率设为 1000Hz, 采集点数为 2000 点. 六种算法滤波后的输出信号如图 4 所示.

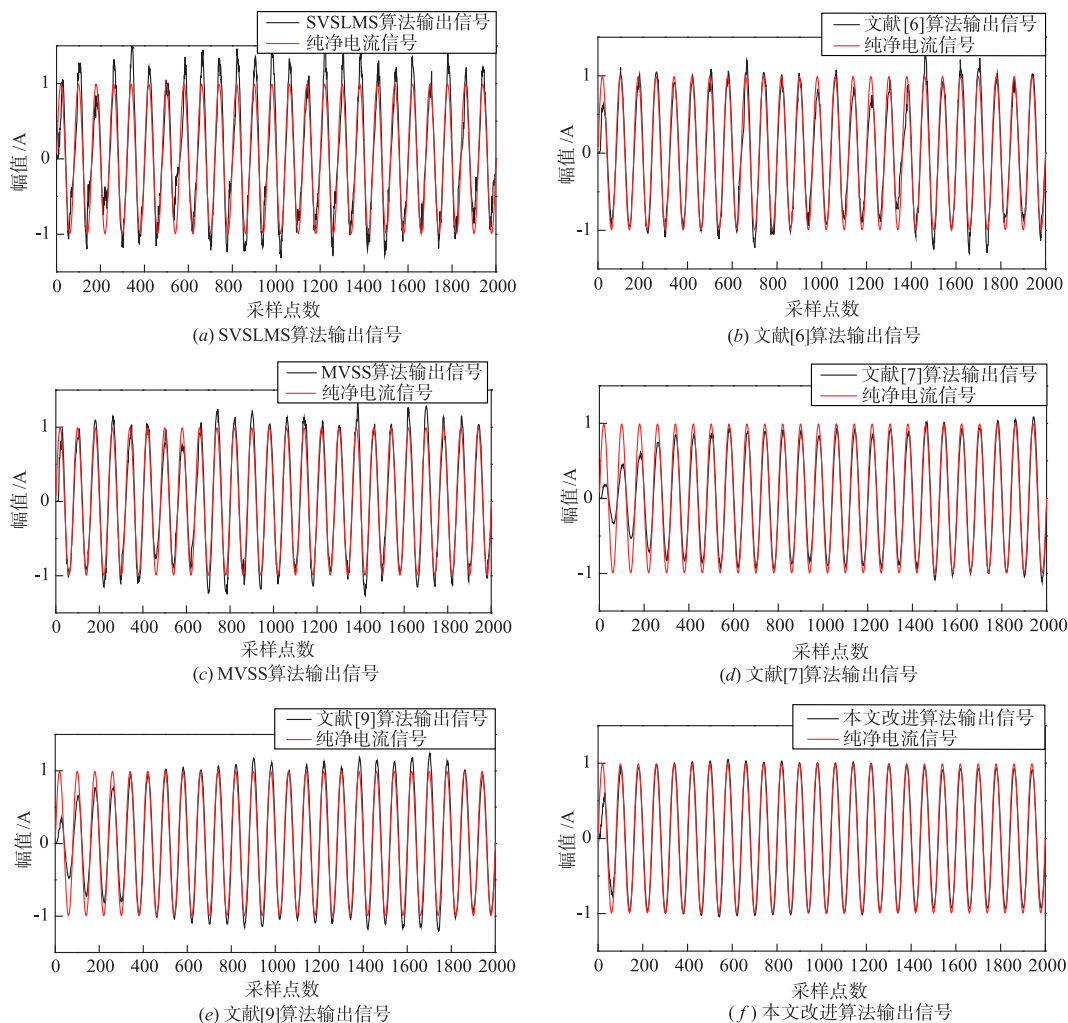


图4 六种算法滤波后输出信号波形图

通过程序计算我们求得采样信号的信噪比 $SNR1 = -2.3028$, 噪声强度非常大, 被测电流信号几乎完全湮没在噪声中. 由图 4(a) 我们可以看出 SVSLMS 算法滤波后的输出信号出现了很大的失调, 稳态误差很高; 文献[6]和 MVSS 算法通过不同的方法进行了改善, 但由图 4(b) 和 (c) 可以看出, 在低信噪比环境下这两种算法的稳态误差仍然很高; 由图 4(d) 和 (e) 可以看出文献[7]算法和文献[9]算法是牺牲收敛速度为代价来换取较高的稳态精度. 由图 4(f) 可以看出, 本文改进算法的收敛速度和稳态误差都得到了很大的改善, 更能准确的还原被测电流信号, 由此可以证明本文改进的算法与现有的几种变步长自适应算法相比, 将会获得更高的测量精度.

改变被测电流信号基波的幅值, 分别取 1A、2A、……、10A, 纪录六种算法输出信号的信噪比以及峰峰

量化幅值的变化, 所得结果如图 5 所示.

由图 5(a) 可知, 本文改进算法的信噪比提高量最大, 由此证明本文提出的算法抗噪声干扰能力最强, 可提高 OCT 在低信噪比环境下的稳定性. 从图 5(b) 可知, 本文改进算法所获得的峰峰值最接近被测电流的峰峰值, 证明本文提出的改进算法获得的稳态精度最高, 可提高 OCT 在低信噪比环境下的测量准确度.

5 结束语

本文对影响 OCT 测量精度和长期稳定性主要因素之一的算法进行了研究, 在分析现阶段比较典型的几种变步长自适应算法的基础上, 提出了一种改进的双 Sigmoid 函数变步长自适应算法, 并将本文提出的算法与六种变步长自适应算法进行了仿真对比分析, 从仿真结果上看, 本文提出的改进算法的收敛速度更快, 稳

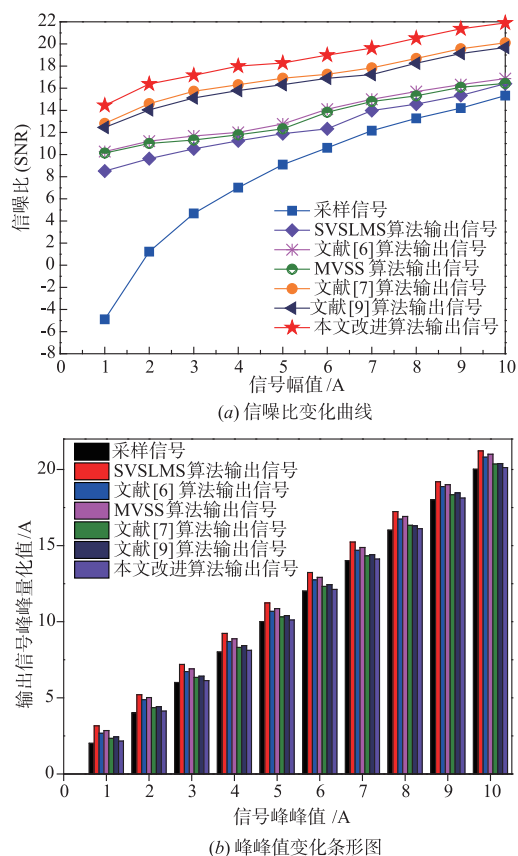


图5 六种算法滤波后输出信号的信噪比以及峰峰值变化曲线

态精度更高,更加适合处理 OCT 的输出信号.最后,运用 ActiveX 技术将本文提出的算法在 OCT 中进行了应用测试,测试结果表明本文提出的改进算法能够提高 OCT 在低信噪比环境下的测量准确度和长期稳定性.

参考文献

- [1] 李岩松,欧阳进,刘君,等.基于 Allan 方差的磁光玻璃型光学电流互感器噪声分析[J].电力系统自动化,2015,39(12):126-129,137.
LI Yan-song, OUYANG Jin, LIU Jun, et al. Analysis on noise of magneto-optical glass type optical current transformer based on Allan variance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 126-129, 137. (in Chinese)
- [2] HE Hong-peng, LIU Jun. Reserch on the improvement of OCT used in power system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2601(385):995-998.
- [3] 王佳颖,郭志忠,张国庆,等.光学电流互感器长期运行稳定性的试验研究[J].电网技术,2012,36(6):37-41.
WANG Jia-ying, GUO Zhi-zhong, ZHANG Guo-qing, et al. Experimental investigation on optical current transducer's long-term operation stability[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 37-41. (in Chinese)
- [4] ABBAS Hussain, HUANG Hai. Weight size determined variable step size LMS method for identifying under damped systems[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3006(511):238-241.
- [5] LIU Li, WANG Qiong, BAI Hong-ping. An improved variable step size LMS algorithm based on sigmoid function[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3365(602): 3593-3596.
- [6] 陈泳,田金鹏,刘燕平.一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法[J].电子测量技术,2015,38(4):27-31.
CHEN Yong, TIAN Jin-peng, LIU Yan-ping. New variable step size LMS adaptive filtering algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(4): 27-31. (in Chinese)
- [7] 张红梅,韩万刚.一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法研究及其应用[J].仪器仪表学报,2015,36(8):1822-1829.
ZHANG Hong-mei, HAN Wan-gang. A new variable step LMS algorithm and its application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1822-1829. (in Chinese)
- [8] TIAN Fu-qing, LUO Rong. A novel variable step size LMS algorithm based on modified hyperbolic tangent and its simulation[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1700(490):1423-1430.
- [9] 靳翼,邵怀宗.一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法及其仿真[J].信号处理,2010,26(9):1385-1388.
JI Yi, SHAO Huai-zong. A novel variable step size LMS adaptive filter algorithm and its simulation[J]. Signal Processing, 2010, 26(9): 1385-1388. (in Chinese)
- [10] 唐建锋,张登玉,罗湘南.一种基于多尺度小波的自适应滤波新算法[J].通信技术,2008,41(12):405-407.
TANG Jian-feng, ZHANG Deng-yu, LUO Xiang-nan. A new adaptive filtering algorithm based on multi-scale wavelet transform[J]. Communications Technology, 2008, 41(12): 405-407. (in Chinese)
- [11] 王慧武,丛超.一种基于 Duffing 系统的信号检测与参数估计新方法[J].电子学报,2016,44(6):1450-1457.
WANG Hui-wu, CONG Chao. A new signal detection and estimation method by using duffing system[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(6): 1450-1457. (in Chinese)
- [12] 吕广强,刘婊,段海军. APF 中一种改进的变步长 LMS 自适应谐波检测算法[J].电力系统保护与控制,2016,44(7):96-101.
LV Guang-qiang, LIU Yu, DUAN Hai-jun. An improved variable step-size LMS adaptive harmonic detection algorithm for active power filters[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 96-101. (in Chinese)

- [13] 张兰勇,王帮民,刘胜,等. 一种新的变步长自适应噪声消除算法[J]. 电子学报,2017,45(2):321-327.
ZHANG Lan-yong, WANG Bang-min, LIU Sheng, et al. A novel variable step-size adaptive interference cancellation algorithm[J]. Acta Electronica Sinica,2017,45(2):321-327. (in Chinese)
- [14] 刘荣胜,彭敏放,肖祥慧. 基于谱聚类集成的变压器在线故障检测[J]. 电子学报,2017,45(10):2491-2497.
LIU Rong-sheng, PENG Min-fang, XIAO Xiang-hui. The transformer on-line fault diagnosis based on spectral clustering ensemble [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(10):2491-2497. (in Chinese)
- [15] WANG Rui, ZHANG Zhi-jie, ZHAO Chen-yang, et al. Mixed programming with labVIEW & Matlab and its application in explosion field test[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation,2016,7(1):13-17.

作者简介



刘宪爽 男. 1990年7月出生,山东菏泽人. 现为南昌航空大学测试与光电工程学院硕士研究生. 主要研究方向是光学电流互感器的信号处理及影响其性能的关键因素分析.
E-mail:619273998@qq.com



吴华明 男. 1975年10月出生,江西南昌人. 博士,硕士研究生导师. 2010年毕业于华中科技大学光电信息工程专业,一直从事以微纳光电器件设计及加工、光纤传感及材料分析计算相关的研究工作.
E-mail:Cookey106@126.com