

# 一种新的变步长自适应噪声消除算法

张兰勇<sup>1,2</sup>, 王帮民<sup>1</sup>, 刘 胜<sup>1</sup>, 胡玉莹<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 毫米波国家重点实验室, 江苏南京, 210096;  
3. 上海交通大学电子信息与通信工程学院, 上海 200240)

**摘 要:** 本文针对电力线噪声的特点, 提出了一种新的变步长自适应噪声消除算法. 在自适应算法的步长与梯度之间建立了新的关系, 弥补了基于误差的变步长算法在自适应噪声消除方面的不足, 克服了标准 LMS 算法的收敛性对输入信号的敏感性, 并能根据梯度调整步长大小从而实现算法的快速收敛. 通过理论分析设计了新的变步长自适应噪声消除算法, 并进行了仿真和实测数据验证, 证明了算法相对于其他算法的优势.

**关键词:** 噪声消除; 自适应滤波; 变步长算法

**中图分类号:** TN97

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2017)02-0321-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.009

## A Novel Variable Step-Size Adaptive Interference Cancellation Algorithm

ZHANG Lan-yong<sup>1,2</sup>, WANG Bang-min<sup>1</sup>, LIU Sheng<sup>1</sup>, HU Yu-ying<sup>3</sup>

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

3. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Considering the features of carrier power line noise, a novel variable step-size adaptive interference cancellation algorithm is proposed in this paper. A new function relation formula between the varying step-size of adaptive algorithm and gradient is established. this algorithm not only make up for the deficiency of the variable step size algorithm based on the error in the adaptive interference cancellation, but also overcome the limitation of the standard LMS algorithm that its convergence is sensitive to the power of input signal. And the algorithm can adjust step size along with the gradient in order to converge faster. Also, theoretical analysis about the novel variable step-size adaptive interference cancellation algorithm is conducted in this paper, and the performance of the algorithm is verified by simulation and practical results. Simulation and practical results indicate the correctness of theoretical analysis and demonstrates the advantages of this algorithm.

**Key words:** interference cancellation; adaptive filtering; variable step size algorithm

## 1 引言

电力线载波通信能够充分利用我国电力线资源丰富的优势,降低基础建设成本,优化通讯网络布局、投资少、见效快.但电力线中噪声干扰,信号电平衰减剧烈降低了通信的可靠性,限制了电力线通信技术的发展与推广.电力线消噪技术的研究对解决网络中通信信道的稳定性、可靠性具有非常重要的意义.多种噪音消除技术都已经在电力线干扰消除中得以应用,主要可以分为非自适应滤波和自适应滤波两类<sup>[1]</sup>.文献[2]中将两类技术进行对比,结果表明自适应滤波器的效果更好一些.电力线信道噪声来源非常复杂,并具有强烈的时变特性与方位特性.

电力线噪声间相互独立,并且和地点、时间以及电器负载等因素相关.对电力线信道噪声分析表明,在 9KHz - 500KHz 频段内的噪声幅度从十几 dB 到上百 dB 变化,总体上随频率的增加呈下降趋势.

噪声消除是自适应算法一项十分重要的应用.基于自适应算法的滤波器不需要知道输入信号和噪声的先验信息,能够跟踪信号的变化自动对参数进行调节以达到最优性能.自适应滤波技术应用于噪声消除时,其结构图如图 1 所示.参考信号  $d(n)$  为在原始信号  $s(n)$  上叠加噪声  $v_0(n)$  的信号,滤波器输入信号  $x(n)$  为辅助输入噪声  $v_1(n)$ .其中  $v_0(n)$  与  $v_1(n)$  来自相同的噪声源,二者具有相关性,但二者与原始信号  $s(n)$  均

收稿日期:2015-06-01;修回日期:2016-05-13;责任编辑:蓝红杰

基金项目:国家自然科学基金(No. 51579047); 国家科技支撑计划(No. 2013BAG25B01); 毫米波国家重点实验室开放课题(No. K201707); MPRD 专项资助(No. IEP14001); 教育部博士点基金(No. 20132304120015); 中央高校基本科研业务费项目(No. HEUCF160414)

为不相关. 滤波输出信号  $y(n)$  与参考信号  $d(n)$  相减得到误差信号  $e(n)$ , 并以  $e(n)$  为变量调节滤波器权矢量使滤波器的输出  $y(n) = \hat{v}_0(n)$  为对参考信号中噪声  $v_0(n)$  的最佳估计. 因此, 当误差  $e(n)$  达到最小值时, 将对噪声的估计  $\hat{v}_0(n)$  从参考信号  $d(n)$  中减去, 便得到了噪声消除的结果  $\hat{s}(n)$  即对原始信号的最佳估计<sup>[3]</sup>.

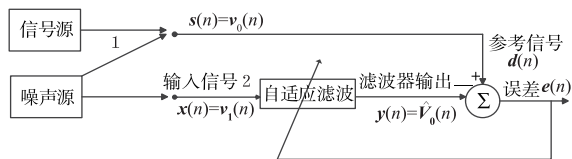


图1 噪声消除器结构图

由于自适应算法基于不同的优化准则便是不同的算法, 因而到现在为止已经提出了各种各样的自适应算法. 1959 年, 维德罗 (Windrow) 和霍夫 (Hoff) 在维纳滤波和卡尔曼滤波的基础上提出了随机梯度算法——最小均方 (LMS) 算法. 该算法解决了在设计滤波器时必须要知道信号的先验信息这一致命缺陷, 可以被看作自适应滤波技术发展史上的一个里程碑. 由于使用环境和处理对象的不同, 所以在应用时会对算法有各种各样的要求, 因而很多种改进算法相继被提出. 文献 [4] 中覃景繁提出了一种基于 Sigmoid 函数的变步长 SVSLMS 算法. 从而使得时变步长在迭代初期较大, 加快收敛的速度, 而当趋近于最优解时减小步长, 提高稳态精度. 虽然 SVSLMS 算法能加快收敛速度, 但当收敛于最优解即误差  $e(n)$  接近于零时, 步长随误差的变化非常大, 这会导致稳态误差增大. 最重要的是, 由于该特点, 使得 SVSLMS 算法并不适用于噪声消除. 为了改进这点不足, 高鹰等人在文献 [5] 中又在此基础上提出了 G-SVSLMS 算法. 利用该算法, 当误差  $e(n)$  接近零时步长因子随误差变化的趋势减缓, 从而克服了 Sigmoid 函数在趋近于收敛时的缺陷. 同时, 为了简化算法计算的复杂性, 文献 [6] 还提出了一种基于箕舌线的 LMS 算法. 通过对自适应算法的研究, 我们可以发现算法的种类非常多, 但并不是每一种算法都适用与噪声消除. 因此, 本文在总结分析前人经验的基础上, 提出了一种新的基于梯度的变步长自适应算法.

本文是针对电力线随机干扰的消除进行研究, 即自适应算法在噪声消除方面的应用. 自适应滤波得到的误差是对不含噪声的原始信号的估计, 即  $e^2(n) = \hat{x}_0^2(n)$ . 此时, 如果像 SVSLMS、G-SVSLMS 算法等利用误差  $e(n)$  去改变步长  $\mu(n)$ , 当算法到达平稳收敛阶段时, 如果原始传输信号增大, 那么信号的功率  $x^2(n)$  便会增大. 由于  $e^2(n) = \hat{x}_0^2(n)$ , 误差  $e^2(n)$  也会增大, 从而导致步长因子随之增大, 造成系统的稳态精度变差, 甚至会导致算法不收敛<sup>[7]</sup>. 因此, 为了解决这一问题, 针对本文特点提出了

一种基于性能曲面梯度的变步长 LMS 算法<sup>[8]</sup>. 该算法对标准 LMS 算法进行了改进, 利用梯度的二范数取代误差去调节步长因子的大小. 并且, 该算法采用反正切函数控制步长的变化趋势, 使得步长在收敛初期较大, 加快了算法的收敛速度; 当算法达到平稳收敛时则缓慢的减小误差, 保证了稳态精度. 同时, 为了利用克服算法收敛性对输入信号大小的敏感性, 利用输入信号的功率对步长做归一化处理, 因此只要保证步长的初值满足收敛条件, 那么算法便不会发散.

## 2 改进的变步长 LMS 算法

该算法的核心思想是控制步长的变化规律使其按照期望的趋势变化. 理想的步长变化趋势为: 在初始调节阶段希望步长较大, 但是算法趋近于收敛时步长要缓慢下降, 同时对步长的最大值要有一个限制, 保证算法的收敛. 根据这个特点, 本文利用  $\text{atan}(g)$  函数建立步长与梯度的关系, 其中, 梯度是利用瞬时信号估计的. 由此可得如下表达式:

$$\begin{aligned} \mu(n) &= \mu_0 \alpha \text{atan}(\beta \|\nabla \varepsilon(n)\|) \\ &= \mu_0 \alpha \text{atan}(\beta \|e(n)x(n)\|) \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $\mu_0$  为步长的初始值,  $\alpha$  用来调节幅值,  $\beta$  控制关系曲线的形状. 改变  $\alpha$  和  $\beta$  值, 函数曲线如图 2 和图 3 所示:

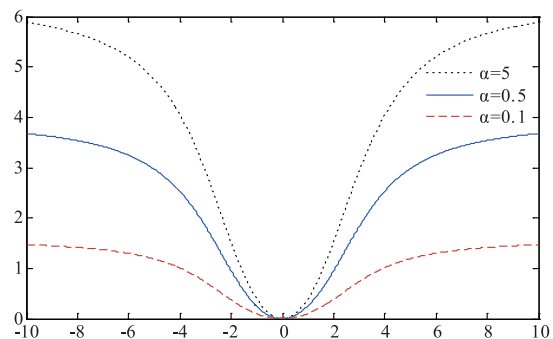


图2 改变值

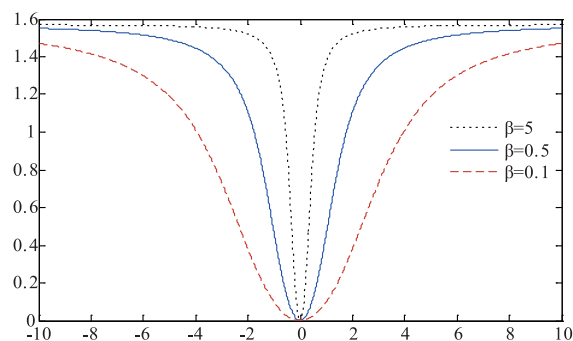


图3 改变值

梯度是瞬时信号估计得到的, 瞬时信号的估计看做是误差  $e(n)$  与输入信号  $x(n)$  的互相关, 它的变化规

律是随  $n$  的增大误差  $e(n)$  与输入信号  $\mathbf{x}(n)$  的相关性是逐渐变小,再根据  $\text{atan}(g)$  函数的曲线可知随着  $n$  的增加步长因子是逐渐减小的,即实现了在理想步长的变化趋势:在初始调节阶段,步长较大,但是算法趋于收敛时,步长要缓慢下降。

式(1)中含有步长因子的初始值  $\mu_0$ ,而算法的收敛性与输入信号的功率关系密切,所以如果经验不足则对步长初值的选择会比较困难,且存在因初值选择不当,输入功率突然增大导致算法发散的情况.为了解决这一问题,在上述函数公式中又加入了“归一化”算法对步长因子进行限制,最终步长因子与梯度的关系式为:

$$\mu(n) = \frac{\mu_0}{\phi + \mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)} \text{atan}(\beta \|e(n)\mathbf{x}(n)\|) \quad (2)$$

其中  $\phi$  是为了避免过小而导致步长值过大而设定的,通常是取值范围  $0 < \phi < 1$ .

综上所述,改进的变步长 LMS 算法为:

$$\textcircled{1} \mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{W}^T(n)\mathbf{X}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{y}(n)$$

$$\textcircled{2} \mu(n) = \frac{\mu_0}{\phi + \mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)} \text{atan}(\beta \|e(n)\mathbf{x}(n)\|)$$

$$\textcircled{3} \mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + 2\mu(n)\mathbf{e}(n)\mathbf{X}(n)$$

### 3 改进算法的性能分析

在与自适应滤波相关的文献中,已经研究对大量的算法进行了研究,在算法应用时,算法的选择主要取决于收敛速度、稳定性、稳态精度、计算要求等因素<sup>[9]</sup>.对于本文提出的改进算法,我们主要分析改进的几个方面.

#### 3.1 收敛条件

为了克服算法收敛性对输入信号功率的敏感性,我们在改进的算法中引入了“归一化”算法.对于  $\mu(n)$

$$= \frac{\mu_0}{\phi + \mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)}$$

来说,取其数学期望:

$$\begin{aligned} E[\mu(n)] &= E\left[\frac{\mu_0}{\phi + \mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)}\right] \\ &\approx \frac{\mu_0}{E[\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)]} \\ &= 2\mu \end{aligned} \quad (3)$$

$\mu$  为传统 LMS 算法中的固定步长,即:

$$\mu = \frac{\mu_0}{E[\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)]} \quad (4)$$

将上式带入算法的收敛条件,可得:

$$0 < \mu_0 < 2 \quad (5)$$

由于  $\text{atan}(\cdot)$  的最大值为  $\frac{\pi}{2}$ ,所以该算法的收敛条件为:

$$0 < \mu_0 < \frac{4}{\pi} \quad (6)$$

因此,当步长因子满足式(6)时,算法收敛性对输入信号敏感这一弱点便可以克服了.

#### 3.2 梯度矢量变化曲线

因为 LMS 算法的性能曲面为  $n+1$  维碗状曲面( $n$  为滤波器的抽头数),该曲面在  $n$  维的投影便是等值曲线<sup>[3]</sup>.然后利用矩阵运算,可以对等值曲线所在的坐标系进行平移和旋转变换,即将坐标系原点移动到最优解处,然后坐标轴的方向变换到主轴方向<sup>[10]</sup>.

坐标系平移,即:  $\mathbf{V}_k = \mathbf{W}_k - \mathbf{W}^*$

坐标系旋转至主轴,即:  $\mathbf{V}'_k = \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_k$

由于:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}'_k &= (\mathbf{I} - 2\mu\boldsymbol{\lambda}_i)^k \mathbf{V}'_0 \\ &= \begin{pmatrix} (1-2\mu\lambda_0)^k & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & (1-2\mu\lambda_1)^k & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & (1-2\mu\lambda_{n-1})^k \end{pmatrix} \mathbf{V}'_0 \end{aligned} \quad (7)$$

且  $0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{\max}}, i=0,1,\dots,n-1$ ,所以

$$0 < 1 - 2\mu\lambda_k < 1 \quad (8)$$

所以,在  $\mathbf{V}'_k$  迭代的过程中呈指数趋势减小.

由前文在推导 LMS 算法处已知:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\min} + \mathbf{V}'^T \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{V}' \quad (9)$$

所以有:

$$\nabla \boldsymbol{\varepsilon} = 2\boldsymbol{\Lambda} \mathbf{V}' = 2[\lambda_0 v'_0, \lambda_1 v'_1, \dots, \lambda_{n-1} v'_{n-1}] \quad (10)$$

由此,我们可以得出关于梯度矢量的结论,即:梯度矢量会随着迭代次数的增加而逐渐减小至零,且在初始值处有较大的值,变化趋势如图 4 所示.由于梯度矢量的这一特点,将其应用于步长的调整是十分合适的,弥补了基于误差的变步长算法在自适应噪声消除方面的不足.

通过论述该改进算法的提出过程以及数学推导,我们可以总结出该算法的几点主要特征:

(1) 与传统的 LMS 算法相比,该算法的步长具有时变特性,能够在保证稳态精度的基础上加快收敛速度;

(2) 与归一化 LMS 算法相比,该算法在借鉴归一化算法的同时又利用了  $\text{atan}(\cdot)$  函数对步长变化的趋势做了限制;

(3) 与 SVSLMS、G-SVSLMS、基于箕舌线的算法等相比,该算法能够有效的抑制算法收敛性对输入信号功率的敏感程度,保证算法的稳定性.

### 4 算法的性能仿真

为了验证本文提出的改进算法在收敛速度、稳定

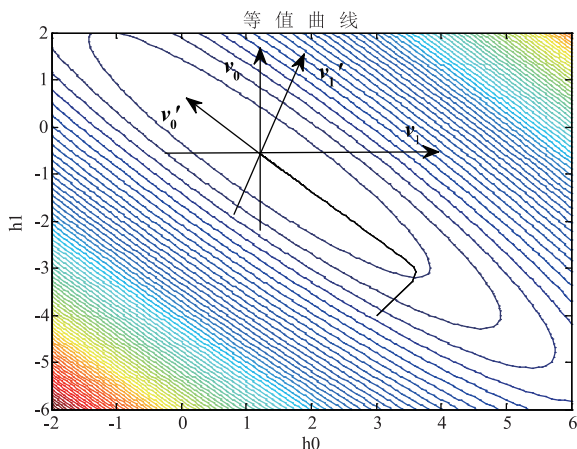


图4 梯度矢量的变化

性以及稳态精度方面的性能以及在噪声消除上的应用效果,利用 MATLAB 对改进算法进行模拟仿真实验<sup>[11]</sup>. 并且将改进算法在噪声消除上的应用效果与其他几种自适应滤波算法的实现效果进行对比.

首先对算法的性能进行验证. 选用 8 阶的 FIR 横向滤波器,滤波器的输入  $x(n)$  利用由  $r = \text{sign}(\text{rand}(N, 1) - 0.5)$  指令产生的一组  $-1$  和  $1$  随机组合. 利用  $\text{ref} = \text{conv}(r, \mathbf{Hn})$  计算滤波器输入  $x(n)$  与冲激响应  $\mathbf{Hn} = [0.8783, -0.5806, 0.6537, -0.3223, 0.6577, -0.0582, 0.2895, -0.2710]$  的卷积作为原始的参考信号,这样得到的输入信号  $x(n)$  和原始的参考信号之间具有相关性. 然后又利用指令  $\text{ref} = \text{awgn}(\text{output}, \text{snr}, \text{'measured'})$  在原始的参考输入信号中加入了高斯白噪声信号,其中信噪比  $\text{snr} = 20$ . 利用这种方式,虽然输入信号和原始参考信号相关,但白噪声与输入信号无关,因此最终滤波误差并不为零,可用来观察算法的稳态精度.

(1) 收敛性 我们是在算法中引入了“归一化”算法的特点,因而算法的收敛与否变得与输入信号的功率关系不再那么敏感. 由推导可知,本文改进算法的收敛条件为  $0 < \mu_0 < \frac{4}{\pi}$ , 仿真结果如图 5 所示:

图中参数  $B$  即相当于步长的初始值. 由图我们可以看出,当参数  $B = 1.2$  时,算法仍能较好的收敛. 当  $B = 1.27$  时,虽然算法的收敛性变差,但仍是收敛的. 但是,当参数增大到  $B = 1.28$  时,算法开始发散. 由于  $\frac{4}{\pi} = 1.2732$ , 所以仿真结果与算法的理论收敛性条件相符.

仿真参数配置如下:

$$B = \frac{\mu_0}{\phi + \mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)} = 1.2$$

$$\beta = 10; \phi = 0.24; \mu_0 = 0.89.$$

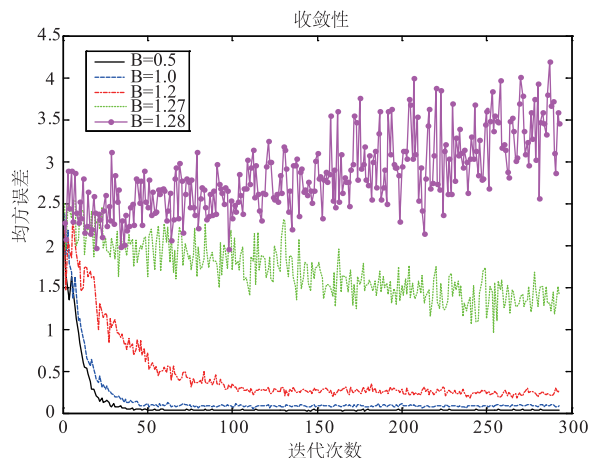


图5 算法的收敛性

(2) 算法性能对比 该算法步长可变,而且其步长是按照  $\text{atan}(g)$  函数的规律在收敛初期时较大,趋于收敛时步长缓慢减小,所以理论上来说在保证快速收敛的同时也能够保证稳态精度. 但由于步长为时变的,其性能指标难以通过推导得到,所以通过 MATLAB 仿真可以验证该算法的效果. 本文对 7 种自适应算法进行了仿真,如图 6 所示. 其中,  $\text{atan}(e^2)$  指的是时变步长按照  $\text{actan}()$  函数规律随着误差变化;  $\text{atan}(\text{梯度})$  是本题提出的改进算法的初步结果,最左边的曲线代表的为本文提出改进步长的算法.

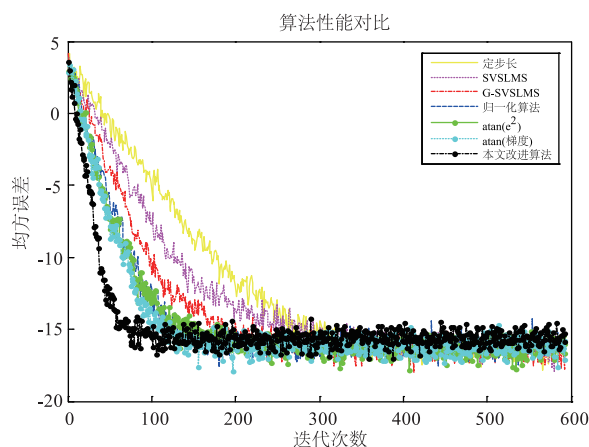


图6 算法性能对比

由图 6 我们可以得出结论,本文的改进算法在保证同等稳态精度的情况下,收敛速度要快很多.

## 5 电力线随机干扰消除仿真与实测验证

由于本算法是针对电力线随机干扰的消除而提出的,因此要验证算法应用于噪声消除时的效果. 选用 8 阶的 FIR 滤波器,自适应滤波器输入端的噪声信号为用随机数来表示  $r = \text{randn}(N, 1)$ , 原始的正弦信号为  $s = \sin(2 * \pi * 10 * t)'$ , 所以参考信号端的输入信号为  $\text{ref}$

$=r + s$ , 并且设置权矢量的初值为零矢量。

在仿真时, 设置步长表达式中参数  $B = 0.01$ , 样本数设置为 1000 个。最终, 仿真结果如图 7 和图 8 所示。

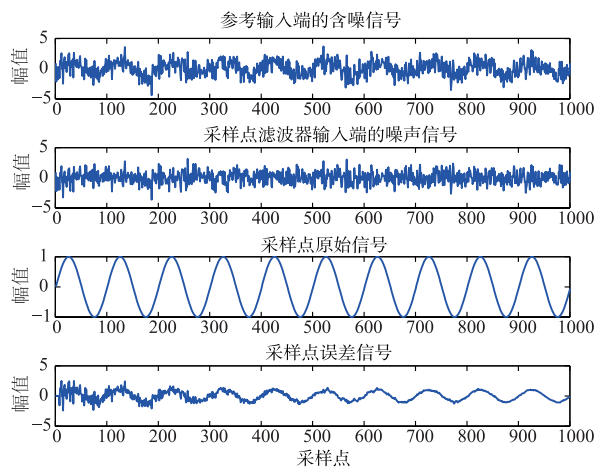


图7 滤波器的输入和输出信号

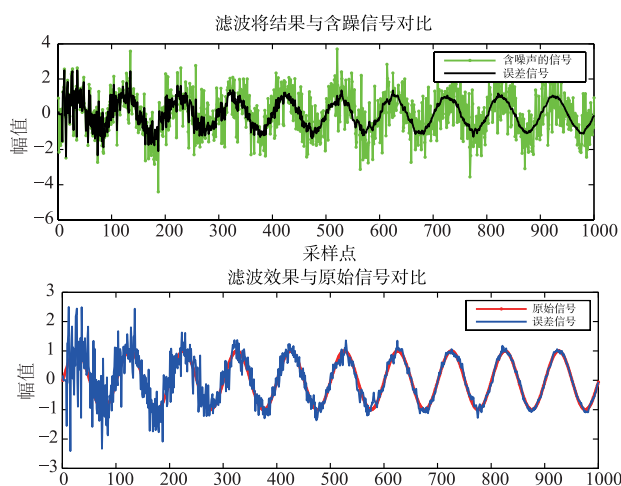


图8 改进算法的滤波效果——时域

通过滤波器最终输出与含噪声的正弦信号、原始正弦信号的对比, 我们可以看出滤波的效果非常好, 原始正弦信号中的噪声几乎将原始信号淹没, 但利用自适应滤波仍然能够很好的还原原始信号。将上述的离散信号进行快速傅里叶变换 FFT 得到它们在频域的曲线, 如图 9 所示。

如图 9 所示, 对比滤波器输出信号与含噪信号和承载信号的频谱可以明显地发现在保留承载信号的基础上, 整个频谱内的噪声都得到了明显地抑制。

由于该算法与标准 LMS 算法最主要的不同点在步长上面, 因此利用 MATLAB 仿真观察该算法的步长变化。如图 10 所示。

由图 10 可以看出, 步长在迭代过程中不断地变化调整, 从而加快收敛速度的同时提高稳态精度。

为了对比几种算法的不同, 尤其是为了检验本文专门为了噪声消除而提出的算法的效果, 所以将几种不同的算法在相同的条件下进行仿真。仿真结果如图 11 所示:

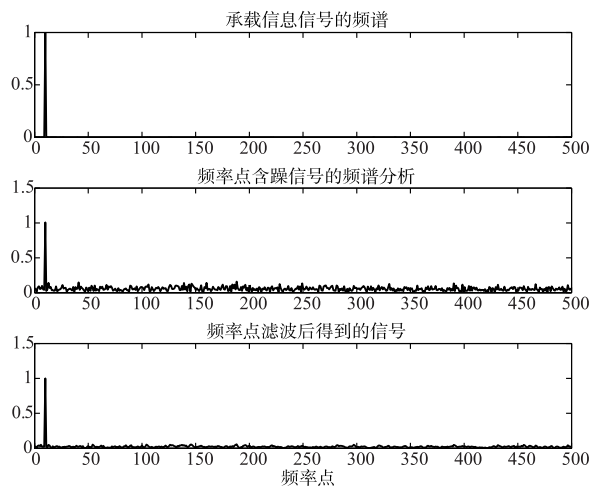


图9 改进算法的滤波效果——频域

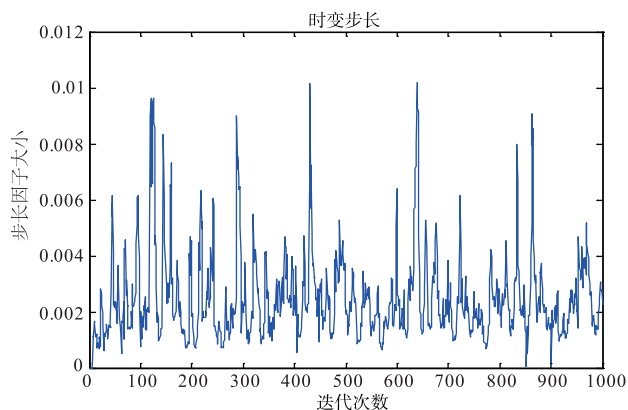


图10 步长的变化

仿真结果非常明显, 四张图进行对比, 不论是收敛速度和稳态误差都有差别, 总结几种算法之间性能对比的数据如表 1 所示。其中每个算法的参数都是在各自参数允许范围内经过大量验证获得的, 各算法参数已调至各自的最佳状态。本文的改进算法与前三种算法相比, 在收敛速度方面, 迭代次数 90 次时便基本已经收敛了, 相比于前三种算法, 稳态误差方面也较好。对比数据充分说明该改进算法在有较好的快速性的同时也很好的兼顾了算法的稳定性。因此可以得出本文改进算法在应用于噪声消除时具有很快的收敛速度, 同时该算法在稳态精度方面也能够保证效果。因而, 仿真结果验证了本文算法在噪声消除方面的应用能够取得良好的效果。

表 1 算法性能对比

算法	收敛速度/步	稳态误差
标准 LMS 算法	300	0.022
SVSLMS 算法	300	0.030
G-SVSLMS 算法	190	0.023
改进的变步长算法	90	0.024

最后将该改进算法应用于实际的电力线噪声消除中来验证该算法的有效性。最终验证结果如图 12 所示。

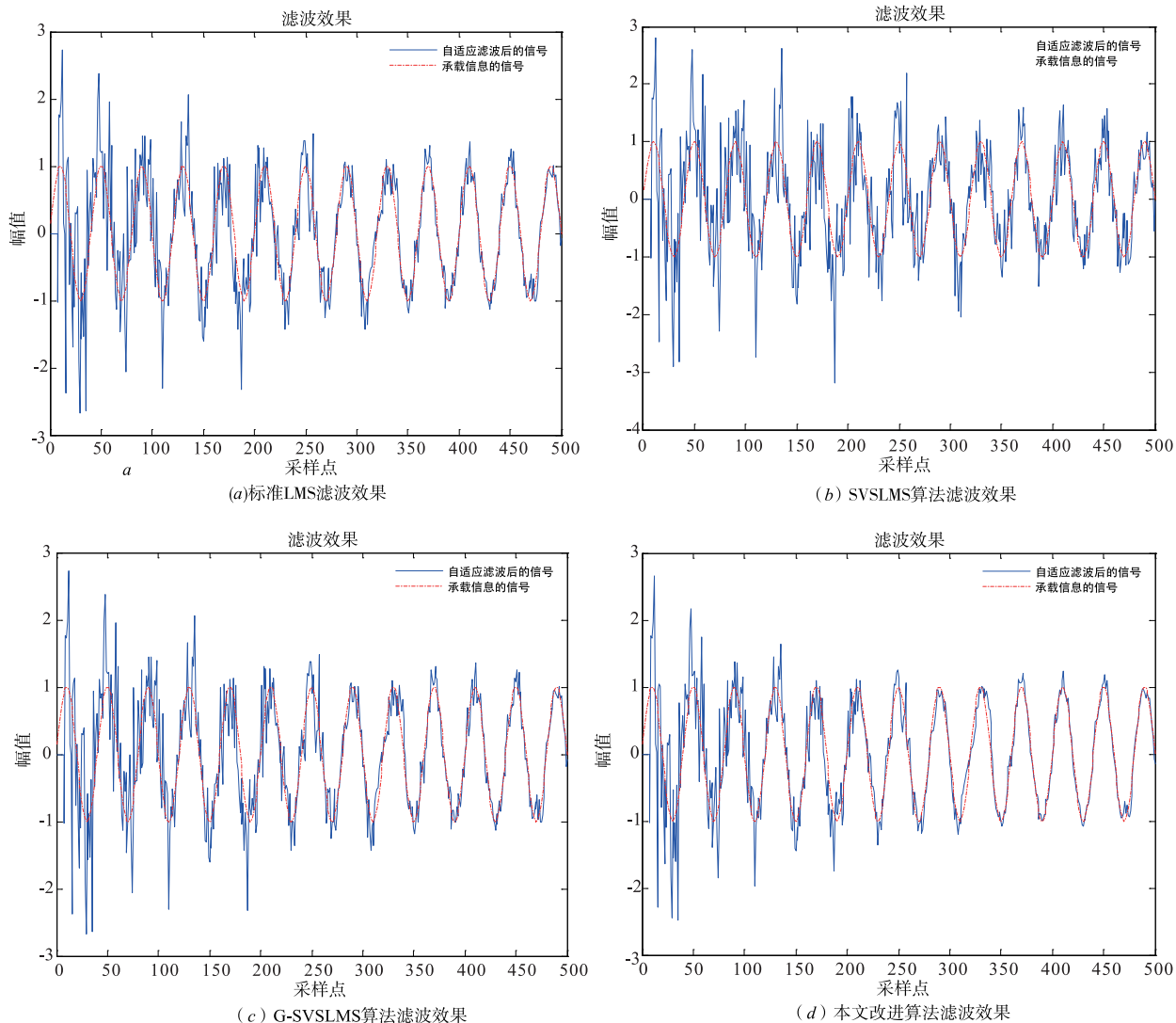


图11 算法效果对比

应用改进的变步长算法的参数配置见表2.对比滤波器输出与含噪信号的频谱可以发现,改进的LMS算法在很宽的频率范围内成功滤除或衰减了噪声信号,尤其在600KHz-1.4MHz频率范围内噪声衰减甚至能达到25dB以上,充分证明了本文设计的改进LMS自适应滤波算法在工程应用中的有效性.

表2 算法的参数配置

算法	仿真参数配置
标准LMS算法	$\mu = 0.01$
SVSLSM算法	$\beta = 0.01, \alpha = 1800$
G-SVSLSM算法	$\beta = 0.01, \alpha = 1800$
改进的变步长算法	$B = 0.01, \beta = 10$

## 6 结束语

目前,对于电力线干扰消除这一问题,存在众多的解决方案,分析对比后发现采用自适应滤波技术来设

计噪声消除器能够达到更好的效果.虽然已经提出了非常多的自适应滤波算法,但是并不是每一种都适用于噪声消除.因此,本文通过对多种自适应算法的分析以及仿真进行性能对比,总结各自的优缺点,在此基础上提出了一种新的变步长算法.同时,利用仿真对算法的性能进行了验证,并对其在噪声消除方面的应用效果进行了仿真实验.结果证明该算法在解决噪声消除问题时,在保证稳态精度的同时能够达到更快的收敛速度,相对于文中提到的几种算法而言更适用于噪声消除.此外所设计的改进LMS自适应滤波算法,结构简单,实现方便,经过对实际电力线的测试与滤波效果验证表明该方法能够在很大程度上改善电力线干扰消除问题,具有极强的工程应用价值.算法的适用性很好,能够很容易推广到其他自适应噪声抵消技术的应用领域,应用前景广阔.

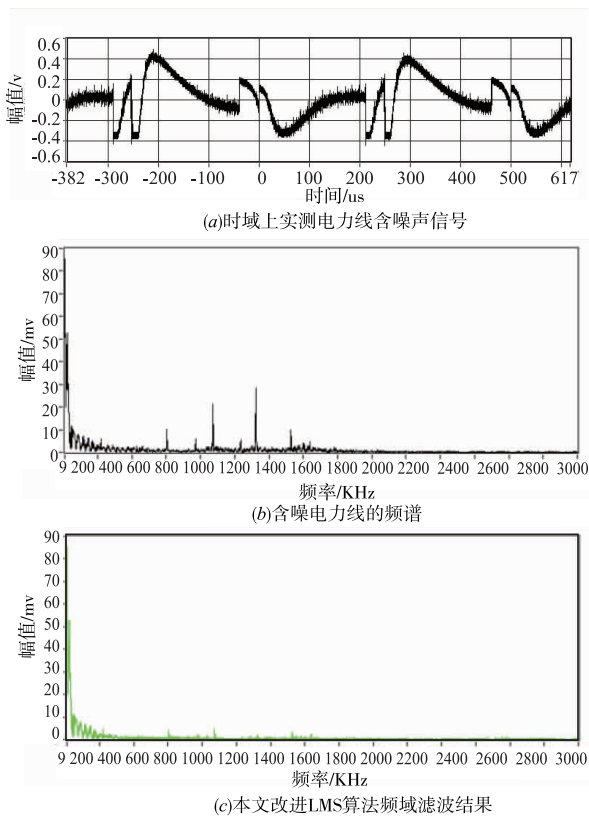


图12 实测电力线算法滤波效果

## 参考文献

- [1] Mishra S, Das D, Kumar R, et al. A power-line interference canceler based on sliding dft phase locking scheme for ECG signals[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(1): 132 - 142.
- [2] Hamilton P S. A comparison of adaptive and nonadaptive filters for reduction of power line interference in the ECG [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1996, 43(1): 105 - 109.
- [3] Haykin S S. Adaptive Filter Theory [M]. Pearson Education India, 2007.
- [4] 覃景繁, 韦岗. 基于 S 型函数的变步长 LMS 自适应滤波算法[J]. 无线电工程, 1996, (4): 44 - 47.
- [5] 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)
- [6] Wenlu Li, Fangmin He. Performance analysis and optimal design of the adaptive interference cancellation system [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(6): 1068 - 1075.

- [7] 邓江波, 侯新国, 吴正国. 基于箕舌线的变步长 LMS 自适应算法[J]. 数据采集与处理, 2004, 19(3): 282 - 285.
- DENG Jiangbo, HOU Xinguo, WU Zhengguo. Variable step adaptive filtering LMS algorithm based on tongue like curve [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2004, 19(3): 282 - 285. (in Chinese)
- [8] YANG Yang, JING Xiaorong, ZHANG Zufan, CHEN Qianbin. Adaptive interference cancellation for coherent and uncorrelated interference signals coexistence [A]. 2013 22nd Wireless and Optical Communication Conference [C]. Chongqing, China, 2013. 1 - 5.
- [9] Cheer J, Daley S. A method of adaptation between steepest-descent and Newton's algorithm for multichannel active control of tonal noise and vibration [J]. International Congress on Sound & Vibration, 2014, 19(3): 1824 - 1831.
- [10] Widrow B, Stearns S D, 王永德, et al. 自适应信号处理 [M]. 机械工业出版社, 2008.
- [11] Paulo S R D. Adaptive filtering algorithms and practical implementation [M]. Springer, 2004.
- [12] 张兰勇, 刘胜, 李冰. 一种改进的自适应干扰对消技术研究及在电磁辐射测量中的应用 [J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1394 - 1398.
- ZHANG Lanyong, LIU Sheng, LI Bing. The study of an improved adaptive interference cancellation technology and its application in the electromagnetic radiation measurement [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1394 - 1398. (in Chinese)
- [13] Dragos D, Ilinca G, Rodica S. Fetal ECG enhancement; adaptive power line interference cancellation based on Hilbert Huang Transform [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2015, 19(5): 77 - 84.

## 作者简介



张兰勇 男, 1983 年生于河北保定. 哈尔滨工程大学硕士生导师. 研究方向为高频信号处理, 自适应滤波技术.  
E-mail: zlyalf@sina.com



王帮民 男, 1990 年生于河南南阳. 博士研究生, 研究方向电磁信号处理, 自适应滤波技术.