

一种提高稳态误差及收敛速度的回声消除算法

江 冰, 叶 玲, 朱成健, 曾 为

(河海大学计算机及信息工程学院, 江苏常州 213022)

摘要: 以研究回声消除为背景, 在分析比较了三种 LMS 自适应滤波器算法的基础上, 提出了改进的 LMS 自适应滤波器算法。并利用 Matlab 进行仿真分析, 通过绘制误差曲线、学习曲线, 证明了改进后的算法在稳态误差以及收敛速度方面都优于之前的算法。该算法能较好地应用到 IP 电话中的回声消除的自适应滤波问题。

关键字: 自适应滤波器; 归一化 LMS 算法; 延迟 LMS 算法; 回声消除

中图分类号: TP912

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-03-0295-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.03.021

An echo cancellation algorithm for improving steady state error and convergence speed

JIANG Bing, YE Ling, ZHU Cheng-jian, ZENG Wei

(College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the analysis of three LMS algorithms and the study of echo cancellation, an improved LMS algorithm is proposed. By plotting error curve and learning curve through MATLAB simulation, it is proved that the new algorithm is superior to the traditional LMS algorithm both in steady state error and convergence speed. So this is a better algorithm for adaptive filtering of echo cancellation in the IP telephone system.

Key words: adaptive filter; normalization LMS algorithm; delay LMS algorithm; echo cancellation

1 引言

VoIP(Voice over Internet Protocol)是将互联网作为语音传输的媒介, 从而实现语音通信的一种全新的通信技术。但是在 PBE(Private Branch Exchange)或局用交换机侧, 有少量电能未被充分转换而且沿原路返回, 形成回声。当回声返回时间超过 10ms 时, 人耳可听到明显的回声。由于因特网的语音传输是采用分组交换技术实现的一种全新的电信业务, 传送的语音信号要经过编码、压缩、打包等一系列处理, 这不仅造成回声路径的延迟较大, 而且延迟抖动也较大。因此, IP 电话网关作为因特网的语音接入设备, 必须具有回声消除能力。

自适应滤波技术在许多领域得到了广泛的应用。在自适应滤波理论体系中, 最小均方(LMS, Least-Mean Square)算法是一种搜索算法, 它通过对目标函数进行适当的调整, 简化了对梯度向量的计算。因 LMS 算法具有低计算复杂度、在平稳环境

中的收敛性好、均值无偏地收敛到 Wiener 解和利用有限精度实现算法时的稳定性等特性, 使 LMS 算法成为自适应算法中应用最广泛的算法。

本文从稳态误差及收敛速度的角度考虑, 提出了一种改进的回声消除 LMS 算法, 将归一化的自适应权值控制机理与延时量的引入相结合, 不但加快了收敛速度, 并降低了误差。

2 三种 LMS 算法原理分析

2.1 标准 LMS 算法原理

标准 LMS 算法是线性自适应滤波算法。一般来说包括两个基本过程: 滤波过程(filtering process)和自适应过程 (adaptive process)。这两个过程一起工作组成一个反馈环, 如图 1 所示, 围绕横向滤波器构造 LMS 算法, 完成滤波过程; “自适应控制算法”部分对横向滤波器抽头权值进行自适应控制过程^[1]。

自适应滤波器控制机理是用误差序列 $e(n)$ 按照某种准则和算法对其系数 $w(n)$ 进行调节, 最终使自适应滤波的目标(代价)函数最小化, 达到最佳滤波状态。LMS 算法的基本思想是用平方误差来代替均方误差^[2]。

收稿日期: 2008-05-23; 修回日期: 2008-08-01

作者简介: 江冰(1960-), 女, 江苏常州人, 教授, 硕士生导师, 研究方向为通信及信息系统学科。

通讯作者: 叶玲, E-mail: yeling_zero@163.com

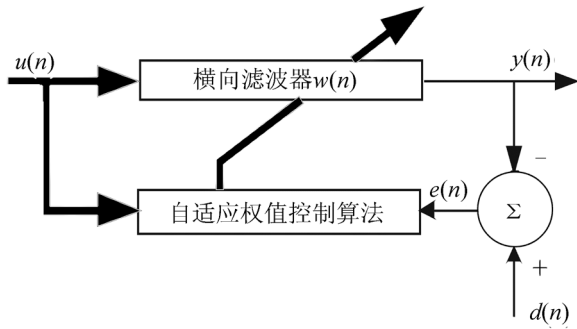


图 1 自适应横向滤波器框图
Fig.1 The block diagram of adaptive transverse filter

标准 LMS 算法的运算步骤如下：

(1) 初始化设置 $u(n)(n=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 为任意值(一般均为零)，然后对每一次采样作以下各步的循环运算：

(2) 计算滤波器输出：

$$y(n) = w^H(n)u(n) \tag{1}$$

(3) 计算估计误差：

$$e(n) = d(n) - y(n) \tag{2}$$

(4) 更新 N 个滤波器权重系数：

$$w(n) = w(n-1) + \mu u(n)e(n) \quad (n=1, 2, \dots, N) \tag{3}$$

其中 μ 为步长因子，是控制稳定性和收敛速度的参数。

(5) 循环返回到(2)。

2.2 NLMS 自适应滤波器的原理

在标准的 LMS 算法的基础上，可以用变步长的方法来缩短自适应收敛过程，NLMS(Normalized LMS)算法就是其中的一个主要方法。NLMS 滤波器是最小化抗干扰原理的一种表现形式，这个原理可以表述如下：从一次迭代到下一次中，自适应滤波器的权向量应当以最小方式改变，而且受到更新的滤波器输出所施加的约束^[3]。就结构而言，NLMS 滤波器与标准 LMS 滤波器一样，如图 1 所示。不同之处在于权值控制器的机理。相应的把式(3)更改为：

$$w(n) = w(n-1) + \frac{\mu}{\gamma + u^H(n)u(n)} u(n)e(n) \quad (n=1, 2, \dots, N) \tag{4}$$

其中 $0 < \mu < 2$ 为控制失调的固定收敛因子， γ 参数用于避免 $u^H(n)u(n)$ 过小导致步长值太大。

NLMS 滤波器与标准 LMS 算法相比有以下这些优点：一方面，NLMS 滤波器减轻了梯度噪声的放大问题，当抽头输入向量 $u(n)$ 较大时，将会发生这个问题；另一方面，无论是不相关还是相关数据，NLMS 滤波器的收敛速度都可能快于传统 LMS 滤波器。当然，NLMS 算法的计算量较之 LMS 算法稍有增加。

2.3 延时 LMS 自适应滤波器的原理

在自适应算法的实现结构中，有一类面向 VLSI 的脉动结构，由于其具有的高度并行性和流水线特性而备受关注^[4]。将 LMS 算法直接映射到脉动结构时，在权值更新和误差计算中存在着严重的计算瓶颈，延时 LMS 自适应滤波器算法就可以克服这种瓶颈效应，该算法解决了算法到结构的计算瓶颈问题，在一些实际应用中，只有在几个采样间隔之后才有可供使用的有用信号，从而才有误差信号可供使用，因此延时 LMS 算法就体现出必要性。

相应于标准 LMS 算法，延时 LMS 算法原理如下，将式(1)、(2)、(3)改为：

$$y(n-m) = w^H(n-m)u(n-m) \tag{5}$$

$$e(n-m) = d(n-m) - y(n-m) \tag{6}$$

$$w(n) = w(n-1) + \mu u(n-m)e(n-m) \tag{7}$$

其中 m 为延时量， n 时刻的权值更新用的是延时 m 时刻的误差信号和相应的失调量。随着 m 值的增大 μ 限逐渐减小。由于 LMS 算法可以看作当 $m=0$ 时的特殊情况，因此，在相同条件下，LMS 算法的 μ 限比延时 LMS 算法大。

延时 LMS 算法适用于流水线体系结构的自适应滤波器，但当滤波器阶数较长时，算法的收敛性能会变差，这是由于其本身所具有的延时影响了它的收敛性能。因此，延时 LMS 算法是以牺牲算法的收敛性能为代价的。

3 回声消除 LMS 改进算法原理

NLMS 算法在降低误码率的同时有效地加快了收敛速度，而延时 LMS 算法在注重实际应用的前提下收敛性降低，所以把这两种算法结合起来进行改进，即在归一化算法的基础上再进行延迟。其原理框图如图 2 所示。基本原理如下：

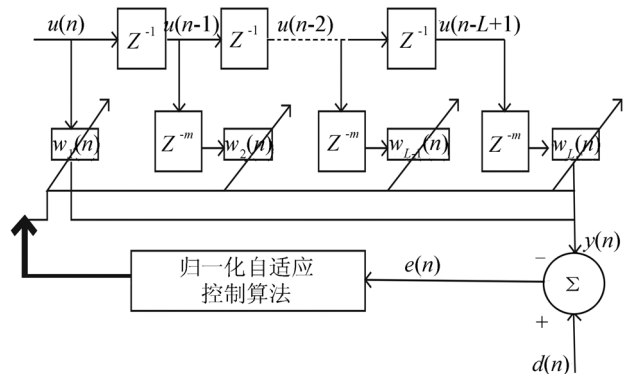


图 2 改进的 LMS 算法的原理框图
Fig.2 The block diagram of improved adaptive transverse filter

$y(n-m)$ 、 $e(n-m)$ 的表达式与式(5)、(6)相同。

$$y(n-m)=w^H(n-m)u(n-m)$$

$$e(n-m)=d(n-m)-y(n-m)$$

将式(7)改为：

$$w(n)=w(n-1)+\frac{\mu}{\gamma+u^H(n-m)u(n-m)}u(n-m)e(n-m) \quad (8)$$

其中 m 为延时量， n 时刻的权值更新用的是延时 m 时刻的误差信号和相应的失调量。 μ 为控制失调的固定收敛因子， γ 参数用于避免 $u^H(n)u(n)$ 过小导致步长值太大。 $0 \leq \gamma \leq 1, 0 < \mu < \frac{2}{(\alpha M + 2D - 2)\rho^2}$ ，

其中 $M=n+v-1$ ，一般 $v=3$ ， $\alpha=\lambda_{ms}^2/\lambda_{av}^2$ ， $\lambda_{ms}^2=\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i^2\right)/n$ ， $\lambda_{av}^2=\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)/n=\rho^2$ ^[5]，这种改进的算法降低了算法的误码率，但是计算量相应会有所增加。

4 回声消除 LMS 改进算法仿真

使用 Matlab 对标准 LMS 自适应滤波器算法、NLMS 自适应滤波器算法、延时 LMS 自适应滤波器算法以及改进的 LMS 自适应滤波器算法的基本原理进行仿真比较。

4.1 改进算法 Matlab 编程

设置 2000 个采样点，构造一个阶次为 2，截止频率为 0.25Hz 的巴特沃思滤波器，加入随机噪声信号，根据输入和噪声得到期望信号，把前 60 个点作为采样训练点，其中对前 20 个采样点采用大步长 $\mu=0.32$ ，对后 40 个采用点采用小步长 $\mu=0.15$ 。再根据各自的权值运算机理进行权值的更新运算，循环得到相应的输出信号 $y(n)$ 和误差信号 $e(n)$ ^[6]。具体改进算法仿真程序流程图如图 3 所示。

4.2 改进算法仿真结果及分析

稳态误差、收敛速度和计算复杂度是衡量一个自适应滤波算法性能优劣的 3 个主要参数^[1]。图 4 为 NLMS 算法与改进后的算法的误差比较图，显示了输出信号、期望信号以及两种算法下的误差比较。从统计的角度，分析了这两种算法的误差比较。图 4(c)是误差的比较，图 4(c)中上一条是未改进的 NLMS 算法的误差曲线，下一条是经过改进后的算法的误差曲线，可以看到改进后的算法误差很快的变小，然后在后面的过程中基本维持。能很清楚地看出改进后的算法具有比标准的 LMS 算法更小的稳态误差，抗噪声性能有明显地改善。图 5 为归一化算法与改进的算法的学习曲线比较图，从图 5 看出，改进后的算法不但具有更快的收敛速度，更能

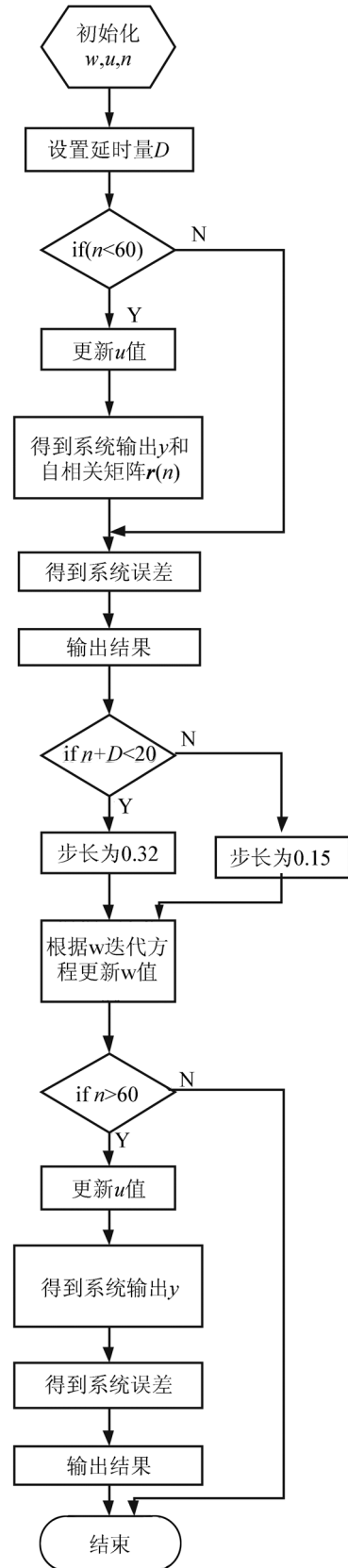


图 3 改进算法仿真程序流程图
Fig.3 The flow chart of improved algorithm emulator

很好地进行收敛。当然这种改进过的算法因为在计算过程中引入了延迟量，计算复杂度的比较主要是不同权值 $w(n)$ 的比较，由式(4)和式(8)相比可得，

NLMS 算法与改进算法复杂度体现在矩阵 $u(n)*e(n)$ 和 $u(n-m)*e(n-m)$ 的比较上, 显然改进后的算法复杂度是增加的, 但是同时由于收敛速度的加快, 使得算法整体上趋于优化。因而在降低误差提高收敛速度方面的改善使得计算量的增加是值得的。

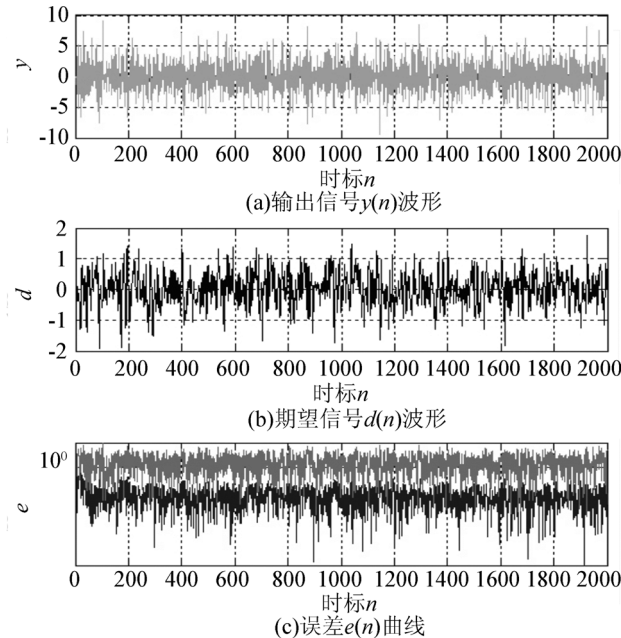


图 4 归一化 LMS 算法与改进的 LMS 算法的滤波器性能图
Fig. 4 The filter performance charts of normalization algorithm and improved algorithm

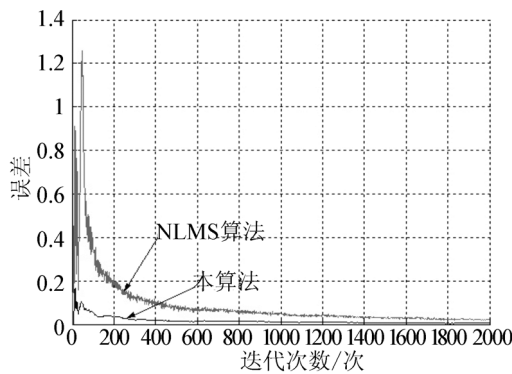


图 5 归一化 LMS 算法与改进的 LMS 算法的学习曲线
Fig.5 The learning curves of normalization algorithm and improved algorithm

图 6 是延时 LMS 算法与标准 LMS 算法的误差比较图, 输入信号、期望信号和前面的都一致, 这里只显示出这两种算法的误差信号, 上面的一条是延时 LMS 算法的误差曲线, 下面的一条是改进后的算法的误差曲线, 同样也能看出, 在一定范围内, 迭代次数小于 2000 时, 改进后的算法的误差要比单独的延时 LMS 算法的要小, 这是稳态误差方面的改进。图 7 是这两种算法的学习曲线的比较图, 从图 7 可以看出, 改进后的算法在刚开始的少数波动之后, 迅速地收敛了, 因此收敛性有很

大的提高。改进后的算法与原本的延迟算法相比, 由于权值因子的复杂性增加, 比较式(7)和式(8), 改进的算法权值 $w(n)$ 多进行了 $n*n$ 次运算, 因而运算量是有增加的。但是整体而言, 改进后的算法趋于优化, 这种运算量的增加同样是值得的。

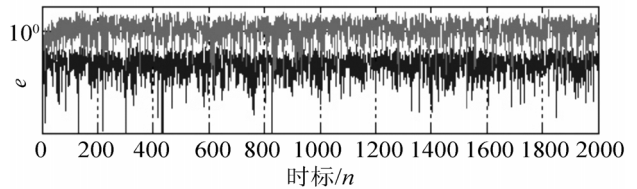


图 6 改进的 LMS 算法与延时 LMS 算法的滤波器性能比较图
Fig.6 The filter performance charts of delay algorithm and improved algorithm

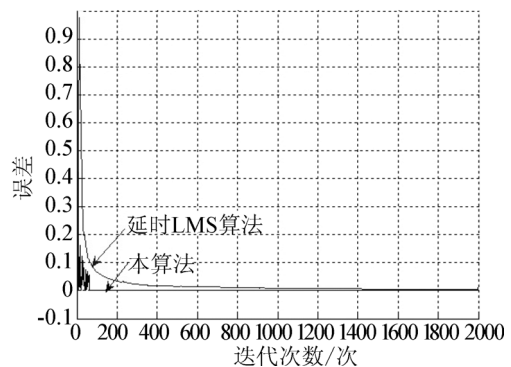


图 7 改进的 LMS 算法与延时 LMS 算法的学习曲线
Fig.7 The learning curves of delay algorithm and improved algorithm

由上述迭代区间为[0,2000]内误差和学习曲线的比较结果可得, 改进算法在收敛速度和稳态误差方面性能都有所提升, 当然这种改进的算法因为结合了归一化的权值控制机理以及延时量的加入, 运算量相比原本的两种算法都是增加的。虽然延时量的增加会影响到收敛速度, 但是由图 7 可以看出, 改进后的算法的收敛速度并没有受到影响, 这是因为归一化的权值控制机理的引入加快了收敛, 从而保证了收敛速度的整体提高。因此这是一种以牺牲运算量来获得更低的误差以及更快的收敛速度的算法。自适应滤波器最重要的特性就是能有效地在未知环境中跟踪时变的输入信号, 使输出信号达到最优, 对实时性要求很强的通信系统, 因为话路传输条件的变化, 系统本身一开始并不能完全确定下来, 而收敛速度的提高有助于加快系统稳定。自适应滤波器是回声消除系统中的关键技术, 收敛速度加快时, 回声余量会减小。

5 结束语

LMS 算法由于其简单性和易于工程实现, 得到了广泛的应用^[7]。但是收敛速度慢是固定步长 LMS

算法的固有缺点。本文分析了 LMS 算法的两种改进算法归一化 LMS 算法和延时 LMS 算法的原理,这两种算法都更好降低了误差值,归一化的 LMS 算法收敛速度比标准的 LMS 收敛快,延时 LMS 因为延时量的增加更好地改善了输出信号,降低误差,却会因延时量影响到收敛速度。结合这两种算法,把归一化的权值控制机理和延时相结合,提出一种改进的算法,以增加运算量为前提,能够更好地降低误差,并保证更快的收敛速度。在要求高质量以及实时性要求高的通话系统中,这种改进算法有助于降低 IP 系统中的噪声,减少回声,提高 IP 系统的通话质量。

参 考 文 献

- [1] 西蒙·赫金. 自适应滤波器原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. Simon Haykin. Adaptive filter theory fourth edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. 2003.
- [2] 何振亚. 自适应信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2002. HE Zhenya. Adapting signal processing[M]. Beijing: Science Press. 2002.
- [3] 马伟富. 自适应 LMS 算法的研究及应用[D]. 四川大学, 2005. MA Weifu. The research and application of adaptive LMS algorithm[D]. Sichun University, 2005.
- [4] Duttweiler D L. Proportionate normalized least mean squares adaptation in echo cancellers[J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2000, 8(5): 508-518.
- [5] LONG G Z, LING F Y, Proakis J G. The LMS algorithm with delayed coefficient adaptation[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1989, 37(9): 1397-1405.
- [6] 张翔. 王德石. 李景熹. 变步长 LMS 自适应滤波器算法仿真研究. 微计算机信息[J]. 2007, 23(7-1): 252-253. ZHANG Xiang, WANG Deshi, LI Jingxi. The simulation of variable step-size LMS adaptive algorithm[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(7-1): 252-253.
- [7] Douglas S C, ZHU Q, Smith K F. A pipelined LMS adaptive FIR filter architecture without adaptation delay[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(3): 775-779.