变速率更新自适应算法在回声抵消中的应用

董 航[1] 孙 洪[1]

摘 要 通过对回声抵消的实际应用环境进行分析, 本文提出一种动态改变滤波器权系数更新速率的算法. 该算法在权系数的更新速率与误差信号之间建立一种非线性函数关系, 具有在环境突变阶段, 滤波器系数的更新速率自动变快, 而在稳态阶段更新速率很慢的特点, 可以极大地降低自适应滤波器算法的运算量. 理论分析和计算机仿真结果表明该算法具有良好的收敛性能和跟踪性能, 稳态误差的水平与传统算法保持一致.

关键词 自适应滤波器, 回声抵消, 变速率, 运算量
中图分类号 TN 911.72

Multi-rate Updated Adaptive Algorithm Applied to Acoustic Echo Cancellation

DONG Hang[1] SUN Hong[1]

Abstract By analysing the actual room acoustic environment, this paper presents a novel algorithm for acoustic echo cancellation, which can dynamically change the coefficients update-rate of the adaptive filter. This algorithm builds up a nonlinear function relationship between update-rate and the error signal. The update-rate of the coefficients increases automatically when the environment varies, while it would be smaller in a stable state, which can lead to significant reduction in the computational burden. Theoretical analysis and computer simulations indicate that the convergence and tracking properties of this algorithm are as good as the traditional algorithms.

Key words Adaptive filter, acoustic echo cancellation, multi-update-rate, computational complexity

在电话会议和网络语音通信中, 经常遇到的一个问题就是声学回声的干扰. 具体的表现形式是: 在本地, 远端呼叫者的语音被扬声器以声波的形式播放出来, 声波通过在房间内的传播和反射后被本地的麦克风接收, 通过这个回路, 声音被传送回呼叫端, 呼叫者就听到了自己的回声. 回声抵消方法是利用自适应滤波器来估计声音的传输函数, 并使用这个估计值在反馈中抵消掉回声信号.

传统的最小均方算法 (Least mean squares, LMS) 和递归最小均方算法 (Recursive least squares, RLS) 等自适应方法, 不论在时域还是频域, 都是逐点或逐帧更新滤波器的权系数矢量, 即在每输入一个或一帧样本后更新一次权矢量[1−2]. 这样的方式拥有较快的收敛速度, 能够快速地跟踪环境变化, 但是需要较大的运算量, 无法满足实时输出数据的要求[3−4].

在很多情况下, 我们面对的是具有缓变特性的环境. 例如在处理语音信号时, 由于人的发音系统生理结构的变化速

收稿日期 2007-05-17 收修改稿日期 2007-11-19
Received May 17, 2007; in revised form November 19, 2007
国家自然科学基金 (60372057) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60372057)
1. 武汉大学电子信息学院信号处理实验室 武汉 430079
1. Signal Processing Laboratory, School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.01184

度是有一定限度的, 在一段时间内 (10 ∼ 30 ms), 人的声带和声道形状是相对稳定的, 可以认为其特征是不变或者缓变的[5]. 在回声抑制时, 如果声音源没有变动, 并且周围声音传播的环境也没有改变, 那么可以说声音传播的路径是相对平稳的, 即传输函数在短时间内保持不变. 一般的自适应滤波器对系统的可调参数进行逐点或逐帧更新估计[6], 本文采用一种新的滤波器参数更新方法, 利用信号和环境为缓变的特性, 根据失调误差大小来相应地调整状态参数更新的速率, 可以大量减少自适应系统的运算量.

1　自适应回声抵消器

自适应滤波器一般由两部分组成[6−7]: 1) 滤波子系统, 根据它所处理的功能有不同的结构形式, 如系统辨识、自适应均衡和自适应回波抵消等; 2) 自适应算法部分, 用来调整滤波子系统的参数, 以达到在所描述准则下的误差最小化, 可以根据不同的准则得到不同的算法. 而收敛、跟踪速度, 稳态失调误差和计算复杂度是自适应算法的 4 个重要指标[6]. 如何缩短收敛时间, 加快跟踪速度, 降低稳态误差以及减小计算量是与算法以及滤波器结构有关的问题, 特别是前两者, 一直是人们研究的热点[8]. 相反, 对于算法计算量的关注却相对不足.

1.1　回声抵消器结构

回声抵消器由参数可调的数字滤波器和自适应算法两部分组成[5], 如图 1 所示.

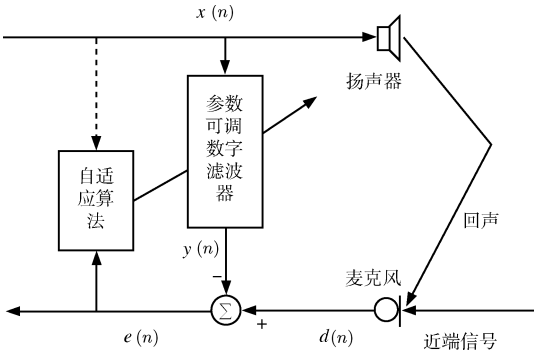

图 1　回声抵消器原理图

Fig. 1　Frame of acoustic echo cancellation

输入的远端信号 $x(n)$ 由扬声器播出, 在房间内扩散后生成回声信号, 并被麦克风接收, 加上近端的语音信号和背景噪声, 一起表示为 $d(n)$. 因此, 实际上回声抵消系统是一种能够自动调整本身参数的特殊维纳滤波器, 其试图调整它的响应系数来匹配扬声器和麦克风之间的声音传输函数, 从而得到回声估计信号 $y(n)$, 再将估计信号从 $d(n)$ 中减去, 从而实现回声抵消[9].

1.2　参数的更新

输入信号和输出信号之间的关系为

$$y(n)=\sum_{k=0}^{L} w_k(n)x(n-k) \tag{1}$$

自适应滤波器的 $L+1$ 个权系数构成一个权系数矢量, 称为权矢量, 用 $\boldsymbol{w}(n)$ 表示, 即

$$\boldsymbol{w}\left(n\right)=\left[w_0\left(n\right)\ \ w_1\left(n\right)\ \ \cdots\ \ w_L\left(n\right)\right]^{\mathrm{T}}$$

这样式 (1) 可表示为

$$y\left(n\right)=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\left(n\right)\boldsymbol{w}\left(n\right)=\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\left(n\right)\boldsymbol{x}\left(n\right) \tag{2}$$

参考响应与输出响应之差称为误差信号, 用 $e(n)$ 表示, 即

$$e\left(n\right)=d\left(n\right)-y\left(n\right)=d\left(n\right)-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\left(n\right)\boldsymbol{w}\left(n\right) \tag{3}$$

自适应滤波器按照误差信号均方值最小的准则, 即

$$\xi\left(n\right)=\mathrm{E}\left[e^{2}\left(n\right)\right]=\min$$

来自动调整权矢量. 可以推导出, 在输入信号和参考响应都是平稳随机信号的情况下, 均方误差 ξ 是权矢量 $\boldsymbol{w}$ 的各分量的二次函数. 这就是说, 若将上式展开, 则 $\boldsymbol{w}$ 各分量只有一次项和二次项存在. ξ 的函数图形是 $L+2$ 维空间中一个中间下凹的超抛物面, 有唯一的最低点 $\xi_{\min}$, 该曲面称为均方误差性能曲面, 简称性能曲面[10]. 自适应过程是自动调整权系数, 使均方误差达到最小值 $\xi_{\min}$ 的过程. 这相当于沿性能曲面往下搜索最低点, 最常用的搜索方法是梯度法.

均方误差性能曲面的梯度用 ∇ 表示, 定义为

$$\nabla=\frac{\partial\xi}{\partial\boldsymbol{w}}=\left[\frac{\partial\xi}{\partial w_0}\ \ \frac{\partial\xi}{\partial w_1}\ \ \cdots\ \ \frac{\partial\xi}{\partial w_L}\right]^{\mathrm{T}}$$

最陡下降法就是沿着性能曲面最陡方向向下搜索曲面的最低点[10], 计算公式为

$$\boldsymbol{w}\left(n+1\right)=\boldsymbol{w}\left(n\right)+\mu\left(-\nabla\left(n\right)\right) \tag{4}$$

其中, μ 是控制搜索步长的参数称为自适应增益常数, 或收敛参数; 曲面上各点的梯度不同, 因此, 梯度加有时间指标 n.

2　一种新的权系数更新方法

在日常生活中, 可以观察到回声抵消的应用环境具有缓变的特性, 即声音的传输函数在短时间内保持不变, 此时可以降低对算法的跟踪收敛性能的要求. 我们用相似系数 $\varsigma_{t_it_j}$ 来检验不同时刻的权系数 $\boldsymbol{w}_t$ 之间的相似程度[11]

$$\varsigma_{t_it_j}=\frac{\sum\limits_{k=1}^{N} w_{t_i}\left(k\right)w_{t_i}\left(k\right)}{\sqrt{\sum\limits_{k=1}^{N} w_{t_i}^{2}\left(k\right)\sum\limits_{k=1}^{N} w_{t_j}^{2}\left(k\right)}} \tag{5}$$

对实际回声抵消系统的权系数进行验证, 得到的结果如表 1 所示:

表 1　短时内权系数相似程度

Table 1　Relativity of coefficient in short time

采样时刻	$t_1=30\,000$ 点	$t_2=30\,100$ 点	$t_3=30\,400$ 点
相似度	$\varsigma_{t_1t_1}=1$	$\varsigma_{t_1t_2}=0.99998$	$\varsigma_{t_1t_1}=0.999977$

声音信号的采样率为 8 000, 即相邻采样点的时间间隔为 0.125 ms, 自适应滤波器的阶数为 1 000. 由表 1 可以看出, 从时刻 t_1 到 t_3, 权系数基本保持不变, 说明系统是短时平稳的.

因此, 本文提出一种权系数更新速率 m 和失调误差 $e(n)$ 的函数关系

$$m = floor\left(\beta\left(\frac{1}{1+\exp\left(\alpha\left|e\left(n\right)\right|^{k}\right)}\right)\right) \tag{6}$$

其中 α 是控制函数形状的参数, β 是控制函数取值范围的参数. 当 $m=0$ 时, 采用逐点或逐帧更新权系数; $m=1$ 时, 每隔一点或一帧更新一次权系数; $m=2,3,\cdots$ 时, 依此类推.

当系统趋于稳态, 即失调误差降低到一定程度时, 放慢权系数的更新速率来降低运算量是一个很好的折衷方案. 在自适应算法中, 运算量大部分是消耗在对权系数的更新上[4], 由此看出, 当采用隔点更新时, 运算量可以减少一半. 与此类似, 其他多倍速更新方式可以成比例降低运算量. 从性能曲面的公式推导中可以看出, 改变权矢量 $\boldsymbol{w}(n)$ 的更新速率只是减缓了算法沿性能曲面向下搜索的速度, 最终还是会收敛到超抛物面的最低点[12].

图 2 为 $k=1,2,3,4,8$, $\alpha=50$, $\beta=20$ 时, 更新速率 m 和误差 $e(n)$ 的关系曲线. 可以看出, $k=3$ 时, 在算法初始收敛和跟踪阶段, $e(n)$ 较大, 此时有较快的更新速率, 当算法进入收敛稳态时, $e(n)$ 很小, 则更新间隔变大, 误差 $e(n)$ 接近零时更新速率仍具有缓慢变化的特性. $k=1,2$ 时, 误差 $e(n)$ 在接近零处变化时 (此时算法已达或将要达到稳态), $m(n)$ 变化太大, 不具有缓慢变化的特性, 使得算法在自适应稳态阶段仍保持较快的更新率. $k=4$ 和 $k=8$ 时, 曲线的底部形态虽更加平缓, 但这表明误差 $e(n)$ 还未接近零处变化时, $m(n)$ 就已经很大, 这样会造成收敛速度变慢.

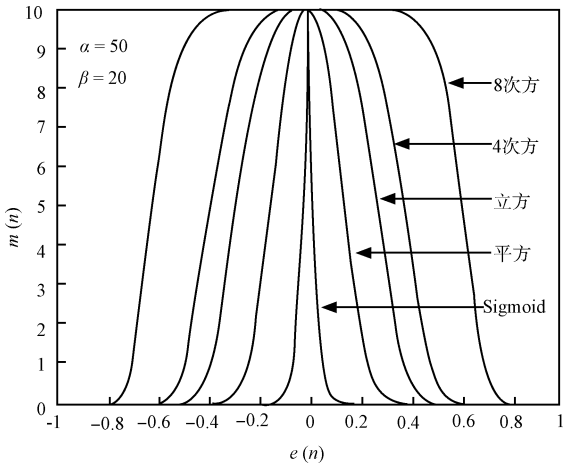

图 2 各种 k 值下的曲线图

Fig. 2 Relationship between $e(n)$ and m using various k

3 结果与讨论

我们生成均值为零, 方差为 1 的高斯白噪声信号 $x(n)$; 通过一个 3 阶的 FIR 滤波器得到仿真回声信号 $d(n)$, 本文在图 3, 图 4 (见下页) 中比较了 $k=1$, $k=1.5$ 和 $k=1.8$ 所对应的算法性能, 理论分析和仿真实验结果表明 $k=1.3\sim1.7$ 范围内所对应算法的性能更为理想,

由图 4 可见, 在相同 α, β 的情况下, 4 种收敛曲线的变化趋势是不一样的. 当 $k=1$ 时, 虽然算法的收敛速度非常快, 但权系数的更新速率基本没有变化, 大部分时间里都是保持每点或每帧更新, 没有起到节省计算量的作用; $k=1.3$ 时, 收敛速度很快, 在系统达到稳态后的运算量也很小, 但是在收敛阶段的运算量并没有很明显的下降; $k=1.5$ 时, 收敛曲线相对比较平滑, 在保持较快收敛速度的同时, 系统收敛阶段的运算量也保持较小; $k=1.8$ 时, 虽然在系统收敛和稳态阶段的运算量都很小, 但是也造成了较慢的收敛速度.

根据大量实际语音得到的实验结果表明, 对于不同的声音源, 最佳 k 值的选取是一个动态范围, 和无语音段在信号中所占的比重有关. 静音时间长则值要相应增加, 反之亦然.

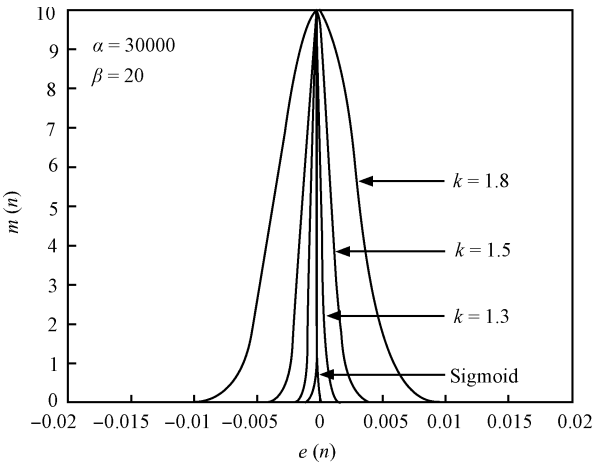

图 3 各种 k 值下的曲线图

Fig. 3 Relationship between $e(n)$ and m using various k

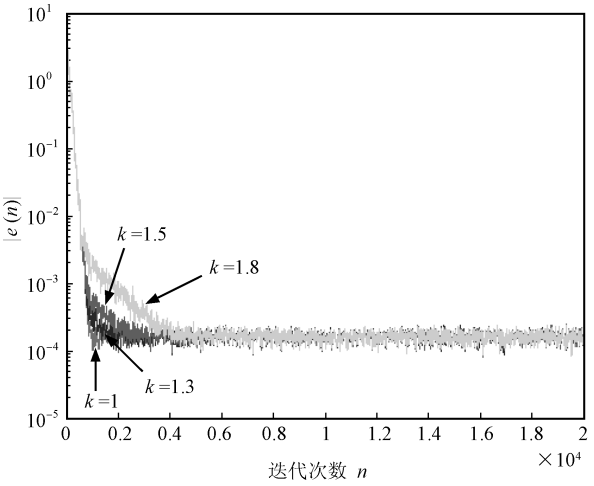

图 4 不同 k 值下的收敛速度

Fig. 4 Convergence of various k

图 5 为采用变速率更新方法对实际回声处理得到的结果, 选取的参数为 $k=1.5$. 可以看出, 新算法的收敛速度和稳态误差水平与传统算法基本一致, 而前者的权系数更新速率却远小于后者. 因此, 新算法在保持性能的同时降低了系统的计算量, 更符合实时输出信号的要求.

如何根据输入信号的不同, 对 k 值进行自适应调整, 这

是下一阶段将要进一步研究的内容.

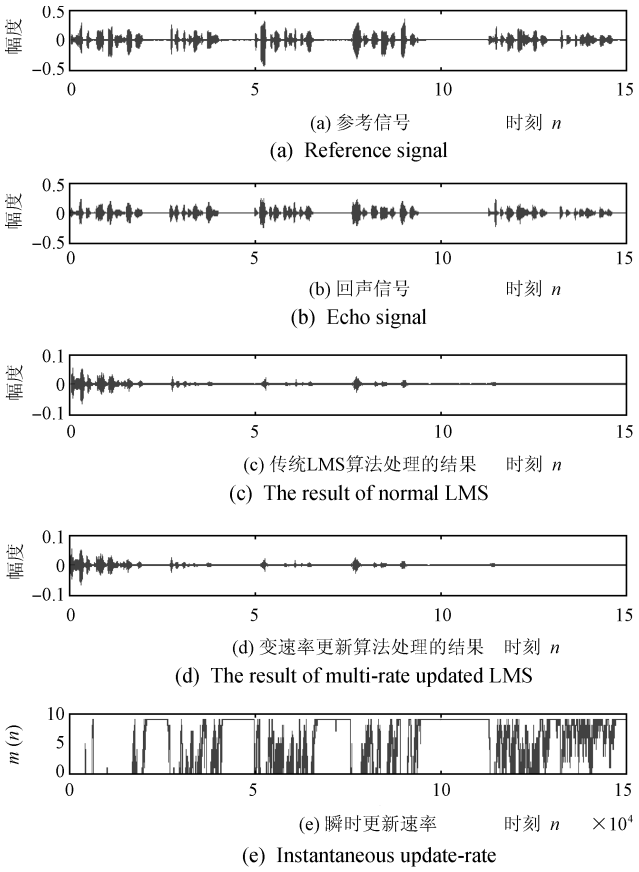

图 5　对真实回声处理的结果

Fig. 5　The results of real echo processing

4　结论

本文通过建立权系数更新速率与误差信号之间的非线性函数关系, 提出了一种新的变速率算法. 经计算机仿真实验分析, 确立 $k = 1.3 \sim 1.7$ 范围内所对应的算法的性能较为理想. 该算法具有初始阶段和未知系统时变阶段更新速率自动变快而稳态时更新速率很小的特点, 降低了运算量. 理论分析和计算机仿真结果表明该算法具有良好的收敛性能, 较低的运算量, 稳态误差的水平与传统算法保持一致, 具有良好的鲁棒性.

References

1 Stokes J W, Platt J C. Robust RLS with round Robin regularization including application to stereo acoustic echo cancelation. In: Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Toulouse, France: IEEE, 2006. 736−739

2 Chan S C, Zhou Y. Improved generalized-proportionate step-size LMS algorithms and performance analysis. In: Proceedings of International Symposium on Circuits and Systems Proceedings. Kos, Greece: IEEE, 2006. 2325−2328

3 Shan T J, Kailath T. Adaptive algorithm with an automatic gain control feature. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1988, **35**(1): 122−127

4 Gilloire A, Petillon T, Theodoridis S. Acoustic echo cancelation using fast RLS adaptive filters with reduced complexity. In: Proceedings of International Symposium on Circuits and System Proceedings. San Diego, CA: IEEE, 1992. 2065−2068

5 Yang Xing-Jun, Chi Hui-Sheng. *Digital Processing of Speech Signal*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1995
(杨行峻, 迟惠生. 语音信号数字处理. 北京: 电子工业出版社, 1995)

6 Haykin S. *Adaptive Filter Theory*. New York: Prentice-Hall, 1986. 10−105

7 Widrow B. *Adaptive Filters, in Aspects of Network and System Theory*. New York: Hoit, Rinehart and Winson, 1970. 59−143

8 Nekuii M, Atarodi M. A fast converging algorithm for network echo cancelation. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, **11**(4): 427−430

9 Ohta S, Kajikawa Y, Nomura Y. Acoustic echo cancelation using sub-adaptive filter. In: Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE, 2007. 85−88

10 Yao Tian-Ren, Sun Hong. *Advanced Digital Signal Processing*. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1999
(姚天任, 孙洪. 现代数字信号处理. 武汉: 华中科技大学出版社, 1999)

11 Tan Li-Li, Wei Gang. Blind signal separation of convolution mixture signals via minimum mutual information (MMI) method. *Journal of China Institute of Communications*, 1999, **20**(10): 49−55
(谭丽丽, 韦岗. 卷积混叠信号的最小互信息量盲分离算法. 通信学报, 1999, **20**(10): 49−55)

12 Sukhumalwong S, Benjangkaprasert C. Adaptive echo cancelation using variable step-size algorithm lattice filters. In: Proceedings of IEEE Region 10 Conference. Hong Kong, China: IEEE, 2006. 1−4

董　航　武汉大学电子信息学院博士研究生. 主要研究方向为语音信号处理. 本文通信作者. E-mail: donghang115@yahoo.com.cn
(**DONG Hang**　Ph. D. candidate at the School of Electronic Information, Wuhan University. His main research interest is speech signal processing. Corresponding author of this paper.)

孙　洪　武汉大学教授. 主要研究方向为语音和图像信号处理.
E-mail: hongsun@whu.edu.cn
(**SUN Hong**　Professor at the School of Electronic Information, Wuhan University. Her research interest covers speech and image signal processing.)