

具有双方对讲保护的自适应回波消除新算法

王 杰, 谢胜利

(华南理工大学 电子与通信工程系, 广东 广州 510640)

摘要: 基于电话会议的声学回波中的双方对讲情况, 本文提出了一个无需设置双方对讲检测器, 但仍能在双讲过程中保护自适应滤波器消除性能的 NLMS 类算法. 由于可以由远端信号和近端混合接收信号之间的相关性系数的变化来判断双讲发生或回波路径改变, 所以改进的算法中直接将其代入滤波器权系数的迭代公式中, 从而控制滤波器系数更新的快慢. 仿真结果表明与同类算法相比, 采用更小的计算量, 该算法在双方对讲时能较好地起到保护作用, 而在回波路径改变时也具有快速的跟踪性能.

关键词: 声学回波消除; 双方讲话检测; 最小均方算法

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A

An new algorithm for acoustic echo cancellation with duplex talk protection

WANG Jie, XIE Sheng-li

(Department of Electronic and Communication, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: The paper presents a new NLMS-like algorithm, which can protect the adaptive filter performance during duplex talk in acoustic echo cancellation of teleconference without setting a detector. Because the variety of the correlation of the far-end signal and near-end received signal can judge the duplex talk occurring or echo path changing, the correlation coefficient is directly used in the iteration formula to control the iteration speed of the filter. Simulation results indicates that the new algorithm has the good duplex talk protection performance and also has the fast tracking performance as the echo path changes but with less computational complexity contrast to the congener algorithm.

Key words: acoustic echo cancellation(AEC); duplex talk detection(DTD); least mean square (LMS)algorithm

1 引言(Introduction)

在免提移动电话和会议电话系统中, 由墙壁、地板、天花等背景反射所导致的扬声器和麦克风之间的声学回波是不可避免的, 这会降低语音通信的质量.

自适应技术^[1]广泛地应用于自适应控制, 雷达, 系统辨识和信号处理等领域. 图 1 中我们采用自适应声学回波消除器(acoustic echo cancellation)来消除回波.

图 1 中我们先考虑近端讲话人语音信号 $z(n)$ 不存在的情况(即“单讲”). $x(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)]$ 为时刻 n 的远端信号矢量, 它在与近端房间中扬声器到麦克风之间回波路径的脉冲响应向量 $h(n)$ 卷积后形成近端混合信号 $d(n)$, $d(n)$ 也即麦克风捡拾到的送回远端的回波的期望值, 我们使用一个自适应滤波器 $w(n)$ 来模拟 $h(n)$, L 是自适应滤波器的长度, $x(n)$ 与 $w(n)$

卷积生成信号 $y(n)$ 来与 $d(n)$ 抵消, $e(n)$ 是误差信号. 采用归一化的 LMS 算法(NLMS), 滤波器系数的迭代公式为

$$d(n) = x^T(n)h(n), \quad (1)$$

$$e(n) = d(n) - x^T(n)w(n), \quad (2)$$

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu \frac{e(n)x(n)}{x(n)^T x(n)}. \quad (3)$$

NLMS 算法因其计算量小且简单易于实现的优点已经广泛应用于回波消除器中.

根据文献[2], 在电话交谈过程中, 双方对讲(即“双讲”)的概率为 20%左右, 是相当频繁的. 也就是近端信号 $z(n)$ 和远端信号 $x(n)$ 同时存在的情况, 这时式(1)应改写为

$$d(n) = x^T(n)h(n) + z(n). \quad (4)$$

此时误差信号

$$e(n) = x^T h(n) + z(n) - x^T(n)w(n). \quad (5)$$

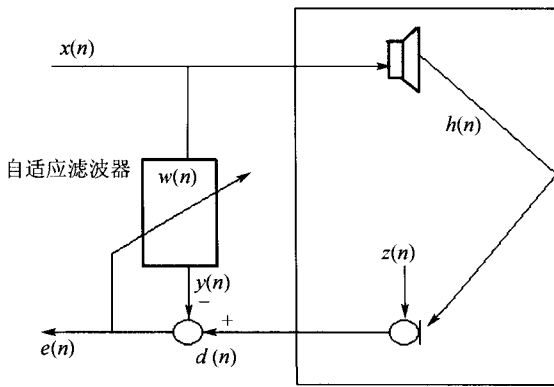


图1 自适应声学回波消除滤波器原理图
Fig. 1 Configuration of an adaptive acoustic echo cancellation system

在这种情况下,即使 $w(n)$ 已经达到最优维纳解,由于 $e(n)$ 很大, $w(n)$ 仍在不断修正,势必偏离回波路径的真实冲激响应,引起回波消除性能的极大下降^[3],因此双方对讲情况下的权值更新应当暂停,直到双方对讲阶段结束为止^[4].

一般的双方对讲方法设置一个合理的大多数双方对讲检测器基于语音检测器^[5,6],即检测远端和近端是否存在语音,进而判断是否处于双方对讲阶段.如文献[6]采用频谱失真度来比较近端信号和远端信号,以判断是否存在双方对讲情况.这些依据滤波器误差判别双方对讲的共同缺点是很难区分双方对讲情况和回波路径发生变化的情况.一般来讲,当回波路径冲激响应是缓慢时变时,该缺点才不明显.

Cheng 等人在文献[7]中基于远端信号和近端接收信号间的相关性 (ρ_{xd}) 设置一个适当的门限值,由式(4)可以看出,当存在近端的讲话人信号时,远端信号和近端接收信号之间的相关性会降低. Cheng 定义

$$\rho_{xd} = \frac{E(x(n)d(n))}{E(|x(n)|)E(|d(n)|)}. \quad (6)$$

当 ρ_{xd} 小于设置的门限时,表明有近端讲话人的信号存在,处于双方对讲阶段,自适应滤波器应该停止更新,否则就按照下式更新

$$h(n+1) = h(n) + \frac{ux(n)e(n)}{P_{xx} + \beta P_{ee} + \delta}. \quad (7)$$

其中 P_{xx} 和 P_{ee} 分别为远端信号和误差信号的能量, δ 为一微小常量.

双方对讲检测器的出错会有以下两种情况:一种是误判,即把非双方对讲情况判为双方对讲,从算法上看,由于暂时停止滤波器的权值更新,会使收敛

速度降低一些;另一种是漏判,即没有正确判断出正处于双方对讲的阶段,从后果看,易引起权值背离最佳值.如何准确地检测出双方对讲地起始时刻也就成为回波消除中的一项关键技术,这要求双方对讲检测器中的门限值必须设置准确.如果门限值设置偏高,则将会减少滤波器更新的几率,从而影响 AEC 算法的收敛速度,即误判;如果门限设置偏低,可能会使滤波器在双讲期间仍然保持更新,这将导致滤波器权系数的发散,即漏判.所以选择一个合适的门限值并不是那么容易,而且,设置双方对讲检测器也会相应增加硬件的花销,这是一般的双讲保护算法所存在的问题.

2 提出的算法(Proposed algorithm)

基于以上对设置双方对讲检测器及远端信号 $x(n)$ 和近端接收信号 $d(n)$ 间的相关性 ρ_{xd} 的讨论,作者们希望提出一个改进的具有双讲保护的算法,不再需要设置门限,减少比较判断的步骤,也避免设置门限带来的问题,而是能直接用 ρ_{xd} 来控制 NLMS 算法中的权系数的迭代速度,即当 ρ_{xd} 比较大时,应该是单讲情况,迭代速度也应该比较快;反之,当 ρ_{xd} 比较小时,则认为处于双讲阶段,则迭代速度应该尽量慢,甚至于慢到可认为停止迭代.

基于以上的想法,我们提出下面的改进的算法.

首先我们用下面的相关系数^[8]来定义 ρ_{xd} ,与文献[7]中的有所不同.

$$\rho_{xd} = \left| \frac{\text{cov}(x(n), d(n))}{\sqrt{D(|x(n)|)}\sqrt{D(|d(n)|)}} \right|. \quad (8)$$

因为 $\text{cov}(x(n), d(n)) = E(x(n)d(n)) - (E(x(n))) \cdot (E(d(n)))$, 实际应用中 $x(n)$ 和 $d(n)$ 可认为是零均值信号,所以(8)式可改写为

$$\rho_{xd} = \left| \frac{E(x(n), d(n))}{\sqrt{D(|x(n)|)}\sqrt{D(|d(n)|)}} \right|. \quad (9)$$

不再设置门限来进行比较,直接用下面的迭代公式来控制滤波器的更新

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu \frac{e(n)x(n)}{x(n)^T x(n) + \beta \left(\frac{1 - \rho_{xd}}{\rho_{xd}} \right) + \delta}. \quad (10)$$

式(10)中 β 为常数,可根据具体情况调节.

从式(10)可以看出,极限情况下,当近端讲话人信号很大时,可认为 $\rho_{xd} \approx 0$,从而 $\frac{1 - \rho_{xd}}{\rho_{xd}} \rightarrow \infty$,则步长 0,可认为此时滤波器停止收敛;当不存在近端讲话人信号时, ρ_{xd} 的理论最大值 $\rightarrow 1$, $\frac{1 - \rho_{xd}}{\rho_{xd}} \rightarrow 0$,则

此时式(10)退回到常规的 NLMS 算法,滤波器正常收敛.

上面提出的改进的算法也能比较好地区分双方对讲和回波路径突然改变的情况.尽管在这两种情况下误差信号会突然变大,导致 ρ_{xd} 变小,但在回波路径改变的情况下 ρ_{xd} 只是在变化的初期比较小,而这种情况下的远端信号和近端接收信号间的相关性比较大,所以滤波器能很快重新收敛;但是在双讲过程中,由于近端信号 $z(n)$ 的存在,远端信号和近端接收信号间的相关系数 ρ_{xd} 一直会比较小,导致式(10)中分母很大,从而步长被抑制为很小,等价地起到了双方对讲检测器的效果.

为验证算法的有效性,下面进行了计算机仿真实验.

3 仿真实验(Simulations)

仿真实验分两个部分,第 1 部分验证双讲保护性能,第 2 部分验证回波路径改变时的跟踪性能.仿真中回波路径模型采用实测的一个小型会议室的 512 点的脉冲响应,所用远端和近端讲话人信号为两段真人男声.

3.1 双讲保护性能(Duplex talk protection performance)

图 2 将本文的算法与 cheng 的算法在双方对讲保护性能上进行了比较,误差信号 $e_1(n)$ 对应 Cheng 等人的算法, $e_2(n)$ 为本文提出的算法的结果,(8)式中的 β 取 Cheng 等的文章中的最优值 64,式(11)中的 β 取为 24,关于 β 的选取原则后面将进行讨论.0~10000 点时只有远端信号,这时误差信号接近为零,表示滤波器收敛快速而平稳,10000~13800 点及 16200~17900 点是为双方对讲阶段,近端的混合信号中加入了近端的讲话人信号,但因为此时远端信号和近端混合信号之间的相关性很低,即 ρ_{xd} 较小,从而式(10)中的分母较大,从而步长被抑制,滤波器几乎停止更新或以很小的步长更新.这也达到了双方对讲检测器的效果.主观听取图 2 中 Cheng 的算法和本文提出的改进算法的误差信号(其期望值应为近端讲话人信号)已听不到远端的回波信号.从波形上看,二者也是性能相当.本文提出的算法中虽然同样也要计算远端信号和近端混合信号之间的相关性 ρ_{xd} ,但不需再设置判断的门限来与之比较,而是直接将 ρ_{xd} 代入滤波器权系数更新的公式中,将回波路径改变或双讲过程的发生直接影响滤波器系数的更新快慢,而且不需计算误差能量.这样计算上减少了与门限的比较以及计算回波

能量的步骤,本文提出的算法在双方对讲保护性能上并不逊于 Cheng 等所提出的算法.

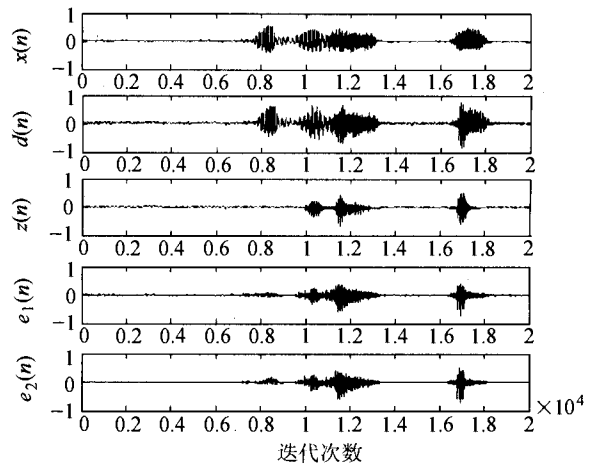


图 2 算法的双方对讲的保护性能
Fig. 2 Double talk protection performance

3.2 回波路径改变时的跟踪性能(Echo path tracking performance)

在电话会议中,由于房间开、关门或者麦克风的移动会导致回波路径上脉冲响应的变化,一个好的算法应该对这种情况也能具有比较好的跟踪效果.

图 3(a)是一般的 NLMS 算法的跟踪情况,图 3(b)则对应本文提出的算法的跟踪性能.这里我们采用均方误差(Mean Square Error, MSE)作为算法性能的评判标准:

$$MSE = 10\lg(E(e^2(n))).$$

可以看到最初的收敛速度二者差不多;在 20000 点的时候改变回波路径,这时后者的收敛速度快于前者,而且稳态时的均方误差约比前者低 10 dB.

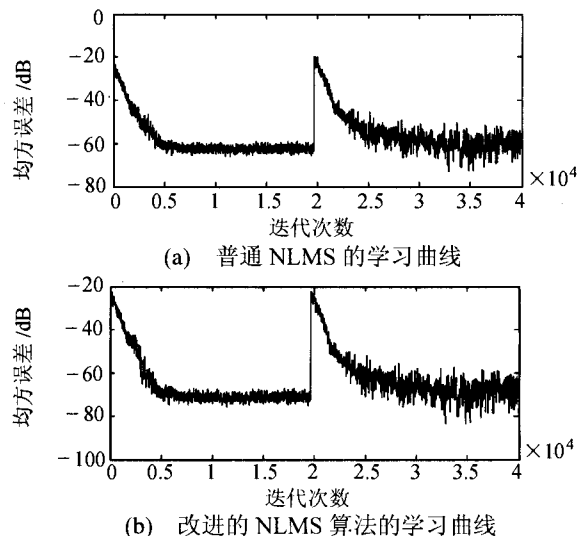


图 3 回波路径改变时算法的跟踪性能
Fig. 3 Echo path tracking performance

3.3 参数的选择(Parameter selection)

仿真试验中 $\mu = 0.55$, 由式(11) 以及实验结果都可分析得到, 为保证双方对讲发生时的保护性能, β 不能太小, 但 β 越大, 收敛速度也越慢. 图4是针对本文提出的算法 β 取不同值时的双方对讲保护中的误差信号.

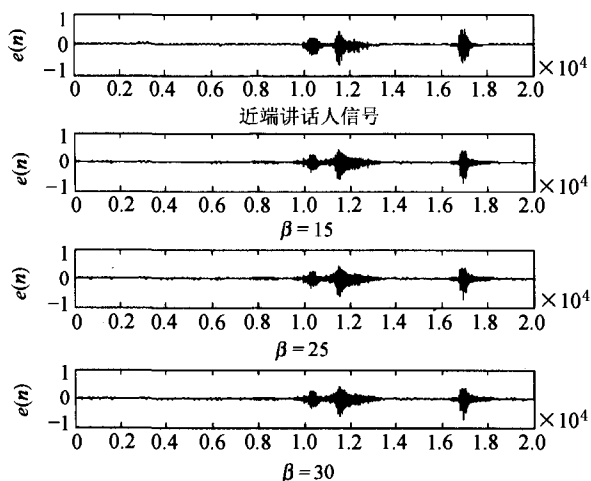


图4 β 取不同值时的误差信号
Fig. 4 Echo signal for different β

图4 从上而下分别对应近端讲话人信号, 以及 $\beta = 15, 25, 30$ 时的误差信号, β 越大, 双方对讲的效果越好, 但误差信号之间的差异也越小, 我们定义下面的衡量标准来进一步定量地说明. 设 $M(\beta) =$

$\sum_n |z(n) - e_\beta(n)|$, 它表示 β 取不同值时误差信号 $e_\beta(n)$ 与其期望信号之间的差异. 这里 $e_\beta(n)$ 即对应 β 取不同值时的 $e(n)$, 图5给出 $\beta = 15, 20, 25, 30, 35, 40$ 时 $M(\beta)$ 并用平滑曲线连接起来:

可以看到随着 β 的增大, 误差信号 $e(n)$ 和其期望信号 $z(n)$ 之间的差异越来越小, 当 $\beta > 25$, 几乎没有什么差异了.

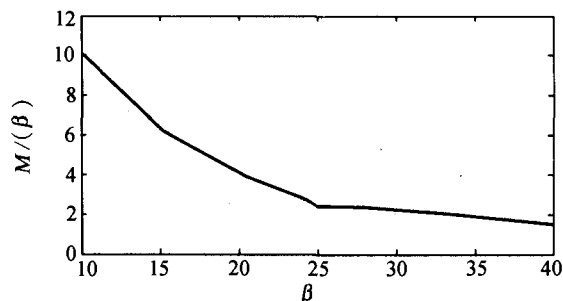


图5 β 取不同值时的误差信号 $e(n)$ 与期望信号 $z(n)$ 间的差异

Fig. 5 Difference between the error signal $e(n)$ and its expected signal $z(n)$ for different β

图6是 β 取不同值时的回波路径改变时算法的跟踪性能图. 可以看出, 随着 β 的增大, 收敛速度有所下降, 但在 $\beta < 30$ 前还能保证较好的收敛速度和稳态误差. 综合图6, 在本文的仿真中经多组实验比较, 取 $\beta = 25$ 是比较合适的.

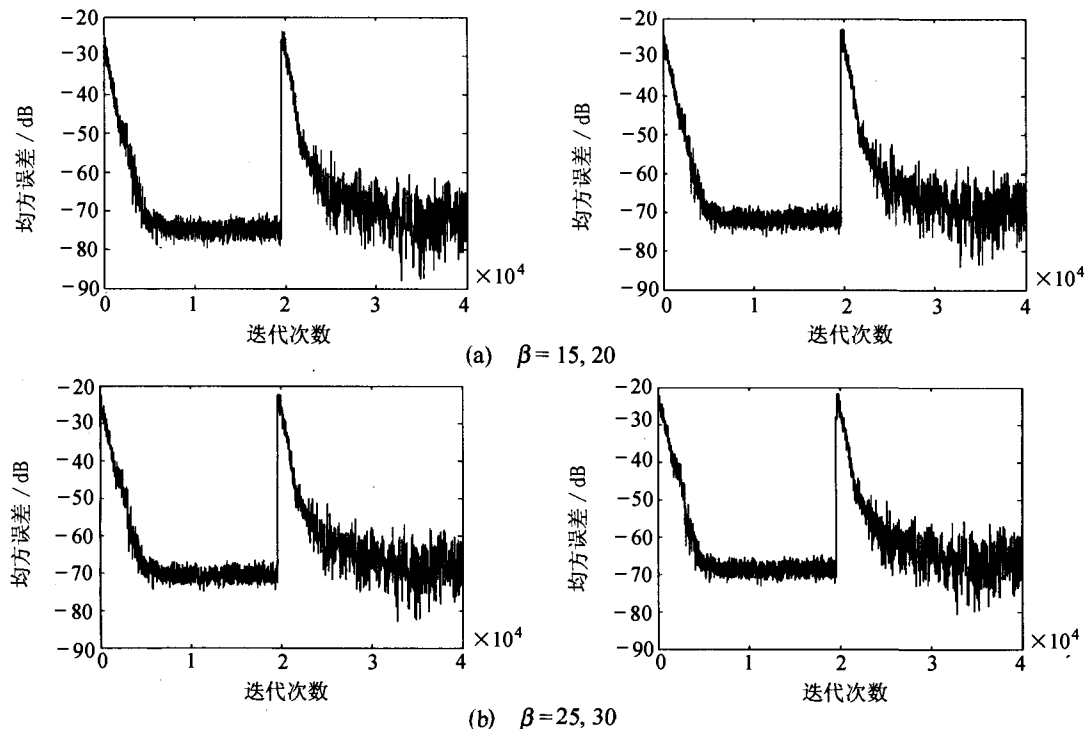


图6 β 取不同值时的回波路径改变时算法的跟踪性能
Fig. 6 Echo path tracking performance for different β

4 结论(Conclusion)

双方对讲检测是电话会议的声学回波消除中需要考虑的一个重要部分.但设置一个合适的双方对讲检测器并不是那么容易,容易发生错判和漏判.本文提出了一个无需设置双方对讲检测器,但仍能在双讲过程中保护自适应滤波器消除性能的 NLMS 类算法.由于可以由远端信号和近端混合接收信号之间的相关性系数的变化来判断双讲发生或回波路径改变,所以提出的算法中直接将其代入滤波器权系数的迭代公式中,从而控制滤波器系数更新的快慢.仿真结果表明在与同类算法相较在运算量减少的前提下,该算法仍能较好地起到双方对讲保护作用,而在回波路径改变时也具有快速的跟踪性能.

参考文献(References):

- [1] HAYKIN S. *Adaptive Filtering Theory* [M]// Third edition. New York, American: Prentice Hall, 1996.
- [2] SONDHI M M, BERKLEY D A. Silence echoes on the telephone network [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1980, 68(8): 948 - 963.
- [3] KENSAKU F, JURO O. Sub-RLS algorithm with an extremely simple update equation [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Acoustics, Speed and Signal Processing*. Seattle: IEEE Press, 1997: 2325 - 2328.
- [4] CAPMAN F, BOUDY J, LOCKWOOD P. Controlled Convergence of

QR Least-Square adaptive algorithms-application to speech echo cancellation [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Acoustics, Speed and Signal Processing*. Seattle: IEEE Press, 1997: 2297 - 2300.

- [5] PHILIP C, DELORES M. An adaptive multiple echo canceller for slowly time-varying echo paths [J]. *IEEE Trans on Communications*, 1990, 38(10): 1693 - 1689.
- [6] CAPMAN F, BOUDY J, LOCKWOOD P. Acoustic Echo Cancellation Using A Fast QR-RLS Algorithm and Multirate Schemes [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Acoustics, Speed and Signal Processing*. New York, American: IEEE Press, 1995: 969 - 972.
- [7] CHENG Xiaobin, AU Jiwi, LI Xiaolong, et al. Double talk protection of acoustic echo cancellation based on weighted-sum NLMS algorithm [C]// *2002 6th International Conference on Signal Processing*. New York, American: IEEE Press, 2002, 1297 - 300.
- [8] GAENSLER T, BENESTY J. Multichannel acoustic echo cancellation: what's new? [C]// *Proceedings 7th IEEE International Workshop on Acoustic Echo and Noise Control*. New York, American: IEEE Press, 2001.

作者简介:

王杰 (1979—),女,通信与信息系统博士研究生.主要研究方向为多通路回波消除, E-mail: pupwang@sohu.com;

谢胜利 (1958—),男,博士,教授,博士生导师, IEEE 高级会员,出版学术专著(国家“九五”重点图书)一部,发表学术论文 70 多篇,6 次获得省部级科技奖励,当前主要研究领域为非线性系统智能控制、自适应多路回波消除、盲信号处理以及图像处理等, E-mail: adshlxie@scut.edu.cn.