

基于改进仿射投影算法的数字助听器自适应回声消除

秦海娟¹ 张玲华^{1,2}

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京, 210003; 2. 江苏省通信与网络技术工程研究中心, 南京, 210003)

摘要: 提出了一种改进的仿射投影算法。该算法建立了步长因子与误差能量之间一种新的非线性函数关系, 根据误差能量的变化自动调整步长因子, 以达到加快滤波器收敛速度、降低稳态失调的目的; 在对误差能量的估计中提出了遗忘因子选择规则, 提高了误差能量估计的准确性。对提出的算法进行的数学分析, 为其快速收敛性提供了理论依据。实验仿真表明, 与传统的自适应算法以及固定步长的仿射投影算法相比, 提出的改进仿射算法在收敛速度、稳态失调等方面有明显改善。

关键词: 回声消除; 变步长; 仿射投影算法; 自适应滤波; 助听器

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Acoustic Feedback Cancellation Based on Improved Affine Projection Algorithm for Hearing Aids

Qin Haijuan¹, Zhang Linghua^{1,2}

(1. College of Telecommunication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210003, China; 2. Jiangsu Provincial Engineering Research Center of Telecommunications and Network Technology, Nanjing, 210003, China)

Abstract: An improved affine projection algorithm for hearing aids is proposed to increase the convergence speed and reduce the misalignment. The algorithm establishes a new nonlinear function between the step-size and the estimation error. The step-size of the proposed algorithm is adjusted automatically according to the change of the estimation error, which leads to high convergence speed and low misalignment. In order to improve the accuracy of estimating the power of error, a rule for selecting forgetting factor is proposed. Mathematical analysis provides theoretical basis for its outstanding capacity of converging to the objective system. The simulation results show that the proposed algorithm achieves faster convergence speed and lower final misalignment compared with traditional adaptive methods and fixed step-size affine projection algorithm.

Key words: echo cancellation; variable step-size; affine projection algorithm; adaptive filtering; hearing aids

引 言

回声反馈一直影响着数字助听器性能的提高, 它限制了数字助听器的前向增益, 使得听力损伤患者

得不到足够响度的放大语音, 最终无法理解语音, 严重的回声反馈还会产生啸叫。此外回声信号还会削弱有源噪声控制滤波器的收敛速度, 使其工作在不稳定状态^[1]。目前进行回声消除的主流方法是自适应滤波器法, 常用的自适应算法有: 最小均方(Least mean square, LMS)算法、变步长(Variable step size LMS, VLMS)算法^[2]和标准最小均方差(Normalized LMS, NLMS)算法^[3-4]。文献[5]针对回声路径的稀疏性提出了等比例标准最小均方差(Proportionate normalized least mean square, PNLMS)算法及各种改进 PNLMS 算法^[6]。

语音是非平稳、强相关的信号, NLMS 及其改进算法 PNLMS 在处理此类信号时, 反馈抑制的性能和稳定性较差。

为克服输入信号相关性的影响, 文献[7]提出了仿射投影算法(Affine projection algorithm, APA)。APA 是 NLMS 算法的多维推广, 重复使用输入信号, 在输入数据具有强相关性的情况下提高算法的收敛速度。同 LMS 算法一样, APA 需要选择合适的步长来取得收敛速度与稳态误差之间的折中^[8], 当步长较大时, 收敛速度将加快, 但同时稳态误差也会较大; 当步长较小时, 稳态误差减小, 收敛速度则会较慢。因此, 可采用变步长解决以上问题, 在算法未收敛时采用较大的步长, 当算法收敛时采用较小的步长^[9-10]。

本文对变步长仿射投影算法进行了讨论, 建立了步长因子与误差能量之间的一种新的非线性函数关系。在所提出的算法中, 步长因子受到误差能量的控制: 在算法的初始阶段, 误差能量大, 步长也大; 当算法收敛时, 误差能量减小, 步长也随之减小。此外, 在算法实现过程中, 为了对误差能量进行准确的估算, 本文提出了一种简单的遗忘因子选择规则, 该规则根据估计误差能量的大小选择合适的遗忘因子。仿真结果表明, 与传统的自适应算法以及固定步长的仿射投影算法相比, 本文提出的算法收敛速度大幅加快, 稳态失调也显著降低。

1 助听器回声消除系统模型及仿射投影算法

1.1 助听器回声消除系统模型

数字助听器回声消除系统模型如图 1 所示。图中 $G(z)$ 为助听器的前向增益, 用来放大输入信号; $W^*(z)$ 为麦克风接收到的真实回声路径; $W(z)$ 为自适应算法估计的回声路径; $s(n)$ 为需要放大处理的原始语音和环境噪声之和, 令原始语音为 $x(n)$, 环境噪声为 $v(n)$, 即有 $s(n) = x(n) + v(n)$; $f(n)$ 为回声信号; $d(n)$ 为麦克风输入信号; $y(n)$ 为估计的回声反馈信号; $e(n)$ 为 $d(n)$ 减去估计的回声反馈信号后的差值。

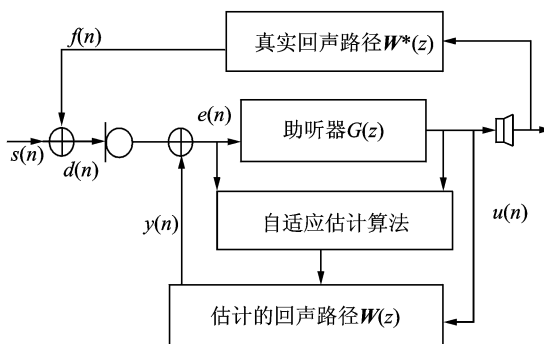


图 1 数字助听器回声消除系统模型

Fig. 1 Hearing aids system model of acoustic feedback cancellation

一般地,采用 M 阶有限冲击响应滤波器来估计真实回声路径,在 n 时刻,自适应滤波器的系数向量为

$$\mathbf{W}(n) = [\omega_0(n), \omega_1(n), \dots, \omega_{M-1}(n)]^T$$

记 n 时刻滤波器的输入信息量为

$$\mathbf{u}(n) = [u(n), u(n-1), \dots, u(n-M+1)]^T$$

由于 $x(n)$ 为需要放大的原始语音信号,因此在回声消除中可以先不予考虑。期望信号 $d(n)$ 满足

$$d(n) = v(n) + f(n) = \mathbf{u}^T(n)\mathbf{W}^*(n) + v(n) \quad (1)$$

估计误差信号 $e(n)$ 为

$$e(n) = v(n) + f(n) - \mathbf{u}^T(n)\mathbf{W}(n) \quad (2)$$

1.2 仿射投影算法

APA 通过重复利用输入数据来提高算法的收敛速度。定义 APA 数据重用次数为其阶数 L , 构造 L 阶 APA 算法如下。

将 n 时刻前 L 个输入向量记为矩阵形式

$$\mathbf{A}(n) = [\mathbf{u}(n), \mathbf{u}(n-1), \dots, \mathbf{u}(n-L+1)] \quad (3)$$

分别记 n 时刻前 L 个噪声、滤波器输出与期望信号构成的向量为 $\mathbf{V}(n), \mathbf{Y}(n), \mathbf{D}(n)$, 得

$$\mathbf{V}(n) = [v(n), v(n-1), \dots, v(n-L+1)]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{Y}(n) = \mathbf{A}^T(n)\mathbf{W}(n) = [y_0(n), y_1(n), \dots, y_{L-1}(n)]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{D}(n) = [d(n), d(n-1), \dots, d(n-L+1)]^T \quad (6)$$

分别定义 n 时刻的先验误差、后验误差为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\xi}(n) &= \mathbf{D}(n) - \mathbf{A}^T(n)\mathbf{W}(n) = \mathbf{D}(n) - \mathbf{Y}(n) = \\ & [e_0(n), e_1(n), \dots, e_{L-1}(n)]^T \end{aligned} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\gamma}(n) = \mathbf{D}(n) - \mathbf{A}^T(n)\mathbf{W}(n+1) \quad (8)$$

APA 算法的核心是在强迫后验误差为零的前提下,使得迭代过程中相邻的两次滤波器系数向量欧式距离最小。

目标函数

$$\min\left\{\frac{1}{2} \|\mathbf{W}(n+1) - \mathbf{W}(n)\|^2\right\} \quad (9)$$

约束条件

$$\boldsymbol{\gamma}(n) = 0 \quad (10)$$

应用拉普拉斯乘子法可得式(9,10)的解为

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + \mathbf{A}(n)[\mathbf{A}^T(n)\mathbf{A}(n)]^{-1}\boldsymbol{\xi}(n) \quad (11)$$

1.3 变步长仿射投影算法

为了解决稳态失调与收敛速度之间的矛盾,变步长仿射投影算法被提出。传统的变步长仿射投影算法^[8],依据均方偏差下降最快的原则,步长更新如下

$$\mu(n) = \mu_{\max} \frac{\|\tilde{\hat{p}}(n)\|^2}{\|\hat{p}(n)\|^2 + C} \quad (12)$$

$$\tilde{\hat{p}}(n) = a\tilde{\hat{p}}(n-1) + (1-a)\mathbf{u}^T(\mathbf{u}\mathbf{u}^T)^{-1}\boldsymbol{\xi}(n) \quad (13)$$

式中: $\tilde{\hat{p}}(n)$ 为中间变量, a, C 为常数。

因为各种环境噪声的存在,强迫后验误差为零将使得算法对不相关的干扰信号进行补偿,最终导致稳态失调的增加^[10]。文献[11]通过改进算法的约束条件,使更新后的滤波器系数更加接近未知系统的参数,即将约束条件改为

$$E\{\|\mathbf{D}(n) - \mathbf{A}^T(n)\mathbf{W}(n+1)\|^2\} = E\{\|\mathbf{V}(n)\|^2\} = \sigma_v^2 \quad (14)$$

步长更新为

$$\mu(n) = 1 - \frac{\sigma_v}{\sigma_e(n)} \quad (15)$$

式中: σ_v^2 为噪声方差; $\sigma_e^2(n)$ 是先验误差 $\xi(n)$ 的能量。

2 一种新的变步长仿射投影算法

文献[11]提出的变步长仿射投影算法仅考虑了没有近端语音的情况, 不符合数字助听器实际的需求。文献[12]提出了变步长自适应滤波算法的步长调整准则: (1) 在初始收敛阶段或未知系统参数发生变化时, 步长应比较大, 以便有较快的收敛速度和对时变系统的跟踪速度; (2) 在算法收敛后, 应保持很小的调整步长以达到很小的稳态误差。

本文对于文献[11]提出的变步长算法进行改进并结合文献[12]的调整准则, 提出了新的变步长仿射投影算法如下

$$\mu(n) = 1 - \frac{\sigma_v^2}{\sigma_e^2(n) + \sigma_v^2} \quad (16)$$

$$\mu(n) = \begin{cases} \mu_{\min} & \mu(n) < \mu_{\min} \\ \mu(n) & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + \mu(n)\mathbf{A}(n)[\mathbf{A}^T(n)\mathbf{A}(n)]^{-1}\xi(n) \quad (18)$$

式中: μ_{\min} 为最小步长; $\sigma_e^2(n)$ 为先验误差 $\xi(n)$ 的能量, 即 $\sigma_e^2(n) = E\{\|\xi(n)\|^2\}$; σ_v^2 为噪声方差, 即 $\sigma_v^2 = E\{\|\mathbf{V}(n)\|^2\}$ 。

由图 2 可知, 初始收敛阶段 $\sigma_e^2(n)$ 较大, 对应 $\mu(n)$ 较大, 算法收敛速度也相对较快; 当算法收敛后, $\sigma_e^2(n)$ 变得很小, 此时 $\mu(n)$ 也在变小。

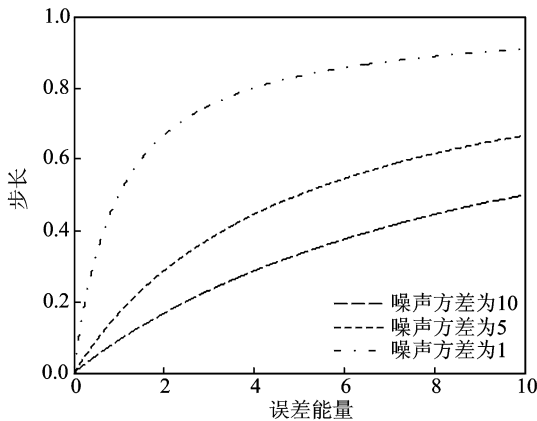


图 2 $\mu(n)$ 和 $\sigma_e^2(n)$ 的函数曲线图

Fig. 2 Functional relationship curves between $\mu(n)$ and $\sigma_e^2(n)$

在式(16)所示的变步长仿射投影算法更新公式中, 需要用到 $\sigma_e^2(n) = E\{\|\xi(n)\|^2\}$, 对此, 采用文献[13]的指数窗方法对 $\sigma_e^2(n)$ 进行估计

$$\hat{\sigma}_e^2(n) = (1 - \lambda)\hat{\sigma}_e^2(n-1) + \lambda\xi^T(n)\xi(n) \quad (19)$$

式中: $\hat{\sigma}_e^2(n)$ 表示 n 时刻 $\sigma_e^2(n)$ 的估计值, $\lambda (0 < \lambda \leq 1)$ 为遗忘因子。在算法初始阶段, $\sigma_e^2(n)$ 收敛的速度较快, 为减小过去数据对当前数据的影响, 采用较大的遗忘因子; 当算法达到稳态时, $\sigma_e^2(n)$ 变化的速度较

慢,采用较小的遗忘因子。为此,以噪声能量作为准则提出一种简单有效的遗忘因子选择规则:(1)当估计误差能量 $\sigma_e^2(n) > 10\sigma_v^2$ 时,采用较大的遗忘因子 λ_1 ; (2)当估计误差能量 $\sigma_e^2(n) \leq 10\sigma_v^2$ 时,采用较小的遗忘因子 λ_2 。

式(16)中 $\sigma_v^2 = E[V^2(n)]$ 为噪声的功率,在数字助听器回声消除系统中,由于自然语音信号中含有较多的停顿, σ_v^2 的估计值 $\hat{\sigma}_v^2$ 可以在语音停顿期间获得^[6]。

由于噪声能量始终小于误差能量^[14],因此对于式(16)始终有 $0 < \mu(n) < 1$,满足仿射投影算法中步长参数介于 $0 \sim 1$ 之间的要求,由此可以保证式(16)得到的变步长仿射投影算法的收敛性^[8]。

3 仿真实验

为了检验本文所提出的算法性能,对几种常用的算法进行仿真,比较收敛速度和稳态失调。算法失调用于度量自适应滤波器与目标系统的逼近程度^[14],定义为

$$M = 10 \times \lg\left(\frac{\|\mathbf{f} - \hat{\mathbf{w}}\|^2}{\|\mathbf{f}\|^2}\right) \quad (20)$$

式中: \mathbf{f} 和 $\hat{\mathbf{w}}$ 分别为真实反馈路径滤波器系数和估计得到的反馈路径滤波器系数,若估计到的反馈路径越逼近真实反馈路径,算法失调将会越小。仿真实验中,反馈路径表示为

$$h(n) = \begin{cases} 0 & 0 \leq n \leq 10 \\ b(n)e^{-0.05n} & 11 \leq n \leq 100 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $b(n)$ 为均值为 0、方差为 0.5 的高斯白噪声。选择这种反馈路径是因为它与助听器扬声器经耳道和耳罩泄露到麦克风的真实测量反馈路径^[15]相似。

第 1 组仿真实验,输入信号为方差为 1 的高斯随机信号;干扰信号为高斯白噪声,信噪比为 20 dB。迭代次数 $N = 5000$;滤波器阶数为 $M = 100$;仿射投影滤波器阶数 $L = 2$ 。在计算误差能量时,本文将只采用一种遗忘因子的算法称为 VSS-APA1(Variable step-size APA1),将采用两种遗忘因子的算法称为 VSS-APA2。

实验首先比较了定步长分算法与本文所提出的变步长算法的性能。定步长分别取: $\mu = 0.3, \mu = 0.4, \mu = 0.7$ 和 $\mu = 1$ 。VSS-APA1 的 λ 取 0.01; VSS-APA2 的 λ_1, λ_2 分别取 0.1, 0.01。

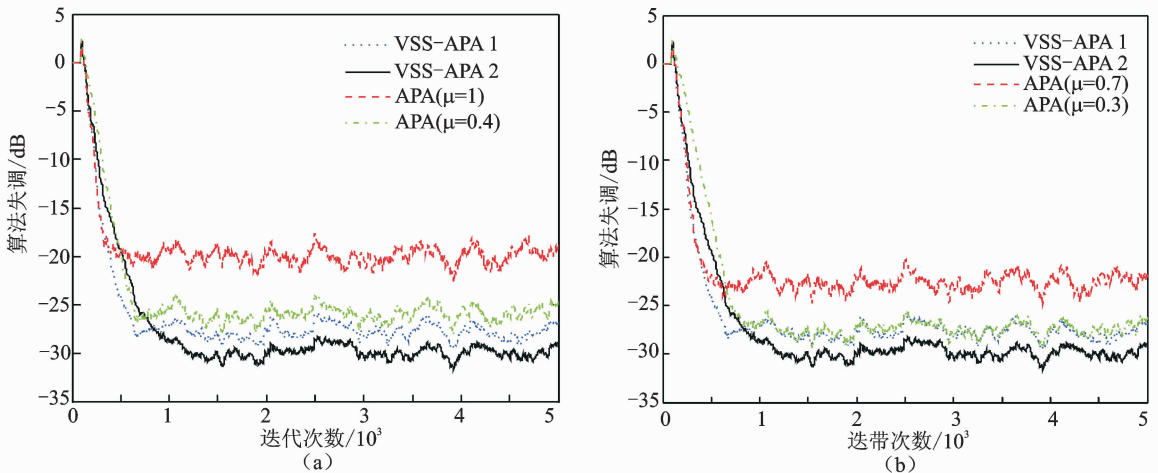


图 3 相关自适应算性能比较

Fig. 3 Misalignment curves for fixed APA and VSS-APA1, VSS-APA2 with random input and white noise

从图 3 可以看出, VSS-APA1 在初始阶段向稳态过渡时的收敛速度大大下降,这是由于 VSS-APA1

对误差能量估计的不准确造成的, 而 VSS-APA2 的收敛速度不受影响, 从而表明了 VSS-APA2 优于 VSS-APA1。从图 3 还可以看出, VSS-APA2 算法相比传统的定步长 APA 算法, 在收敛速度与稳态误差之间取得了很好的折中。

本文将 VSS-APA2 与 VSS-NLMS, VSS-SPNLMS 等几种传统的自适应算法进行了比较。文献 [15] 提出的 VSS-NLMS 算法依据误差信号和噪声信号的能量估计来控制步长, 和本文提出的算法思想相一致, 参数设置中 λ 代表遗忘因子。VSS-SPNLMS 种类比较多, 本文选取了文献 [6] 提出的 VSS-SPNLMS 算法进行比较。算法参数设置如表 1 所示, 其中, ϵ 为正归化参数, λ 为遗忘因子。

表 1 参数设置

Table 1 Parameters for VSS-NLMS, VSS-SPNLMS and VSS-APA

算法	参数设置
VSS-NLMS	$\lambda=0.01$
VSS-SPNLMS	$\epsilon=0.001 \lambda=0.01$
VSS-APA2	$L=2, \lambda_1=0.1, \lambda_2=0.01$

图 4 比较了各算法的性能。从图 4 可以看出, VSS-APA2 算法相比于 VSS-SPNLMS 和 VSS-NLMS, 收敛速度有了大幅度的提高, 稳态失调量也远小于上述两种算法。

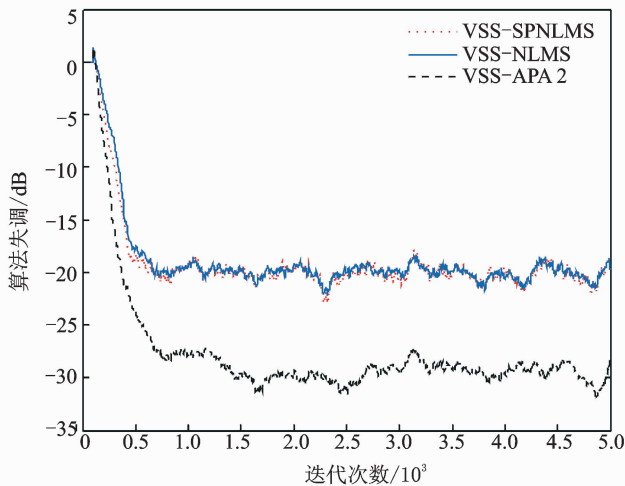


图 4 相关自适应算法学习曲线比较

Fig. 4 Misalignment curves for VSS-NLMS, VSS-SPNLMS and VSS-APA2

对于数字助听器, 语音信号是其主要的输入信号, 而语音信号的非平稳性及强相关性, 可能会使算法的性能下降, 因此, 第 2 组仿真实验采用真实语音信号作为输入, 干扰信号采用与语音信号无关的高斯白噪声, 信噪比为 20 dB, 其余参数设置保持不变。实验将 VSS-APA2 与第 1 组实验中 VSS-NLMS, VSS-SPNLMS 进行了比较, 仿真结果如图 5 所示。

第 3 组仿真实验, 干扰信号为有色噪声。有色噪声由白噪声经过一阶滤波器 $1/(1-0.95z^{-1})$ 产生, 信噪比为 20 dB, 其余参数设置与第 2 组实验一致。仿真结果如图 6 所示。

综合图(5,6)可得, 在输入为强相关、非平稳的语音信号时, 无论是有色噪声还是白噪声干扰, 各个算法的性能均有不同程度的下降, 但是, VSS-APA2 的收敛速度依旧快于 VSS-NLMS 和 VSS-SPNLMS, 稳态失调也低于这两种算法。

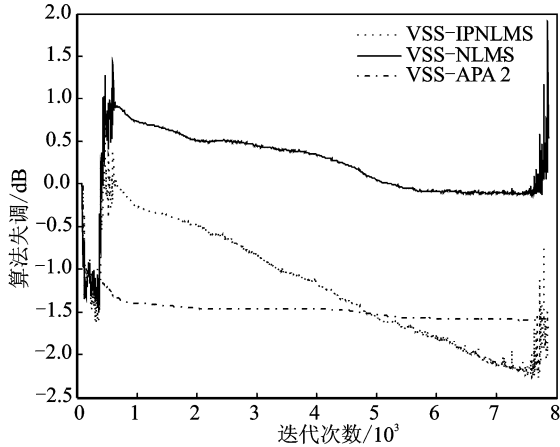


图 5 相关自适应算法学习曲线比较

Fig. 5 Misalignment curves for VSS-SPNLMS, VSS-NLMS and VSS-APA2

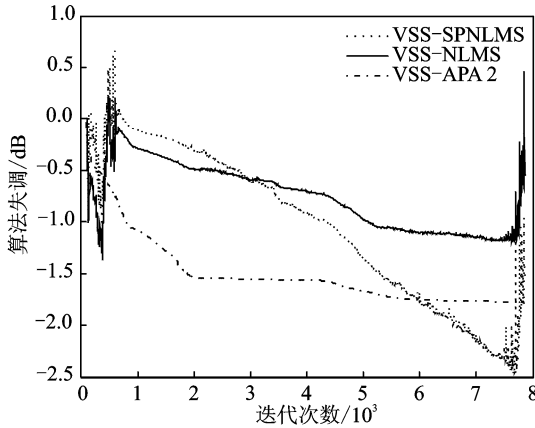


图 6 相关自适应算法学习曲线比较

Fig. 6 Misalignment curves for VSS-SPNLMS, VSS-NLMS and VSS-APA2

4 结束语

改进的仿射投影算法建立了步长因子与误差能量之间一种新的非线性函数关系,依据误差能量实时调整步长因子,有效解决了收敛速度和稳态失调这一对矛盾。当输入为强相关性的语音信号时,仿真实验说明,文中提出的变步长算法相对 VSS-NLMS 算法和 VSS-SPNLMS 算法具有较快的收敛速度和较小的稳定失调。

参考文献:

- [1] Spriet A, Moonen M, Wouters J. Evaluation of feedback reduction techniques in hearing aids based on physical performance measures [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, 128(3): 1245-1261.
- [2] 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.
- [3] 张琦, 王霞, 王磊, 等. 自适应回波抵消中变步长 NLMS 算法[J]. *数据采集与处理*, 2013, 28(1): 64-68.
Zhang Qi, Wang Xia, Wang Lei, et al. Variable step-size NLMS algorithms in echo cancellation[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2013, 28(1): 64-68.

tion and Processing, 2013, 28(1): 64-68.

- [4] 谢鹏, 刘加. 采用变步长算法的无双端检测回声消除系统[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(006): 736-740.
Xie Peng, Liu Jia. Adaptive acoustic echo cancellation system without double-talk detection using VSS-NLMS algorithm[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010, 25(006): 736-740.
- [5] Duttweiler D L. Proportionate normalized least-mean-squares adaptation in echo cancelers[J]. Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on, 2000, 8(5): 508-518.
- [6] 刘立刚, 张世永. 一种变步长 Proportionate NLMS 自适应滤波算法及其在网络回声消除中的应用[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 973-978.
Liu Ligang, Zhang Shiyong. A variable step-size proportionate NLMS adaptive filtering algorithm and its application in network echo cancellation[J]. Acta Electronic Sinica, 2010, 38(4): 973-978.
- [7] Ozeki K, Umeda T. An adaptive filtering algorithm using an orthogonal projection to an affine subspace and its properties [J]. Electronics and Communications in Japan, 1984, 67(1): 19-27.
- [8] Shin H C, Sayed A H, Song W J. Variable step-size NLMS and affine projection algorithms[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 132-135.
- [9] Benesty J, Rey H, Rey Vega L, et al. A nonparametric VSS-NLMS algorithm[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2006, 13(10): 581-584.
- [10] 文昊翔, 陈隆道, 蔡忠法. 改进仿射投影算法及其在电子回声消除中的应用[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1229-1234.
Wen Haoxiang, Chen Longdao, Cai Zhongfa. An improved affine projection algorithm and its application in network echo cancellation[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6): 1229-1234.
- [11] 朱义勇, 姚富强, 朱勇刚, 等. 一种新颖的变步长仿射投影算法[J]. 系统仿真学报, 2009(4): 984-987.
Zhu Yiyong, Yao Fuqiang, Zhu Yonggang, et al. New VSS affine projection algorithm and its application in system identification[J]. Journal of System Simulation, 2009(4): 984-987.
- [12] 罗小东, 贾振红, 王强. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法[J]. 电子学报, 2006, 34(6): 1123-1126.
Luo Xiaodong, Jia Zhenhong, Wang Qiang. A new variable step size LMS adaptive filtering algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1123-1126
- [13] 刘郁林, 景晓军, 谭刚兵. 自适应滤波算法与实现[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2004: 12-15.
Liu Yuling, Jing Xiaojun, Tan Gangbing. Adaptive filtering: Algorithms and practical implementation [M]. 2nd Ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 12-15.
- [14] Haykin S. Adaptive filter theory[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 285-287.
- [15] 梁瑞宇, 赵力, 王青云, 等. 数字助听器的并行梯度投影回声抵消[J]. 应用科学学报, 2012, 30(3): 256-262.
Liang Ruiyu, Zhao Li, Wang Qingyun, et al. Acoustic feedback cancellation based on parallel gradient projection in hearing aids [J]. Journal of Applied Sciences, 2012, 30(3): 256-262.
- [16] Iqbal M A, Grant S L. Novel variable step size NLMS algorithms for echo cancellation[C]// Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE International Conference on. Las Vegas, Nevada: IEEE, 2008: 241-244.

作者简介: 秦海娟(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 语音信号处理, E-mail: qinhaijuan119@163.com; 张玲华(1964-), 女, 教授, 研究方向: 语音处理与现代语音通信, E-mail: zhanglh@njupt.edu.cn.

