

一种改进的快速 LMS/Newton 算法 及其在声回波对消中的应用

王永德, 王春霞

(四川大学无线电系, 四川成都 610064)

摘 要: 本文提出了一种改进的快速 LMS/Newton 算法. 该算法既不同于完全基于 RLS 算法的 FNTF 算法^[1], 又不同于完全基于 LMS 算法的算法 2^[2]. 算法在格型预测器部分采用快速 RLS 算法, 而在自适应横向滤波器部分采用 LMS 算法, 并加以适当改进. 所提出的算法既不存在 FNTF 的稳定性问题, 又比算法 2^[2] 有更快的收敛速度. 采用语音信号激励, 辨识实际测量的声回授通道的冲激响应的模拟实验证实了上述论断.

关键词: LMS/Newton 算法; 自适应系统辨识; 声回波对消

中图分类号: TN912.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 02-0097-04

An Improved Fast LMS/Newton Algorithm for Application to Acoustic Echo Cancellation

WANG Yong-de, WANG Chun-xia

(Dept. of Radio Electronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In this paper we proposed an improved fast LMS/Newton algorithm for application to acoustic echo cancellation. The new algorithm is different from not only the FNTF algorithm^[1] based the FRLS, but also the algorithm 2^[2] based on the LMS completely. For the proposed one we use the fast RLS algorithm in lattice predictive filtering part with some modification and the LMS in adaptive transversal filtering part. Therefore it has the advantage of both the fast convergence for FNTF and the stability for the algorithm 2^[2]. The simulation experiments using Chinese speech exciting for modeling actual acoustic channel justify the previous issue.

Key words: LMS/Newton algorithm; adaptive system identification; acoustic echo cancellation

1 引言

具有十分长的冲激响应的线性系统辨识一直是自适应信号处理一个赋挑战性的课题. 例如在话音通信终端声回波对消应用中由扬声器——房间——话筒(LRM)构成的声回授通道, 其冲激响应可达数百毫秒, 采用 8kHz 的采样率, 自适应系统的权数可达数千. 应用如此大阶的自适应系统对自适应算法提出了非常苛刻的要求. 已得到一定应用的 NLMS(归一化 LMS)算法, 由于大阶自相关矩阵特征值分散度大带来收敛的困难, 这一困难更因语音激励的强相关性变得更为突出. 从快速收敛要求, 递归最小二乘算法(RLS)是解决这一问题的理想算法, 但从实用化考虑又尚不成熟. 一方面这类算法运算量过大, 与 L^2 成正比(L 为自适应系统阶数), 目前器件水平尚难实现. 再者, 虽然它的一类改进算法如快速卡尔曼算法、FTF 算法等可以把运算量减少至 $7L-10L$, 但已发现它存在有限

精度运算时, 对截尾、溢出误差的敏感性问题, 为解决这一问题人们进行了极大努力.

近年来, 快速牛顿算法的提出为问题的解决带来新的希望^[1~3]. 文[1]首次将这类算法用于具有中等长度($100 < L < 1000$)的车内回声对消, 取得较为满意的结果. 文[2]将牛顿算法的预测部分改为格型结构, 并采用 LMS 算法提出了两种算法, 特别是文中算法 2 物理概念清晰, 便于 DSP 实现是一种有应用前景的好算法.

本文在文[2]的基础上进一步对格型滤波部分加以改进, 改进后的快速牛顿算法在稍微增加一点运算量的前提下不仅在收敛速度上优于文[2]的算法 2, 而且经适当修正改善了完全基于 RLS 算法的快速牛顿算法 FNTF^[1]的稳定性问题, 是一种更为实用的声回波对消自适应算法. 采用实际测量的 LRM 冲激响应和语音信号激励的计算模拟证实了上述论断的正确性.

收稿日期: 1998-11-13; 修订日期: 1999-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(No. 69672039)资助课题

2 快速 LMS/Newton 算法改进

2.1 快速 LMS/Newton 算法

LMS/Newton 算法是综合了 LMS 算法的简单易行和牛顿算法快收敛的产物。LMS/Newton 算法是将原来在性能表面基于负梯度的搜索方向通过旋转为直接指向均方误差极小点的搜索。当输入过程自相关阵特征值分散度变大,性能表面等高线远离“正圆”时,LMS 类算法收敛困难,而牛顿算法的优越性即突显出来^[4]。LMS/Newton 算法可表述为

$$\begin{aligned} y_k &= \mathbf{W}_k^T \mathbf{X}_k \\ e_k &= d_k - y_k \\ \mathbf{W}_{k+1} &= \mathbf{W}_k + 2\mu e_k \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{X}_k \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{W}_k^T = [w_{0k} \ w_{1k} \ \dots \ w_{Lk}]^T$ 和 $\mathbf{X}_k^T = [x_k \ x_{k-1} \ x_{k-2} \ \dots \ x_{k-L}]^T$ 分别为权向量和输入信号向量, T 表转置。 \mathbf{R}_{xx}^{-1} 为输入信号自相关阵 $= E[\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^T]$ 逆阵的估计值, d_k 为期待

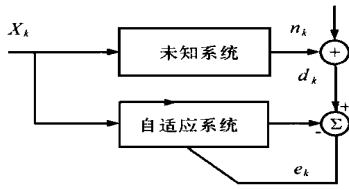


图1 自适应系统辨识

响应。在如图1所示自适应系统辨识配置时, d_k 即为未知系统输出和系统噪声 n_k 之和。实际上, 算法也可以直接从最小二乘准则导出, 或者说通常的 RLS 算法只是牛顿算法的一个特殊成员。历史上由于 LMS/Newton 算法在 LMS 算法的基础上还得到实时估计 \mathbf{R}_{xx}^{-1} (运算量为 $O(L^3)$), 因而被认为是一种仅具有理想意义、无实用价值的算法。尽管也可用一些递推方式估计 \mathbf{R}_{xx}^{-1} , 但运算量仅减少为 $O(L^2)^{[4]}$ 。

注意到在声回波对消应用中, 激励信号 x_k 为语音信号, 该信号可以采用一个低阶的 AR 模型来拟合, 典型的阶数 M 为 8~13。由低阶 AR 过程构成的大阶自相关阵的逆具有一些可贵的性质^[3,6]。特别是, 当矩阵维数 $L > 2M+1$ 时, 它是一个 $2M+1$ 的带条阵。因而估计 \mathbf{R}_{xx}^{-1} 的计算量可以大幅度减少。这就是快速牛顿算法的基本出发点。

1991 年文献[3]首先提出快速牛顿横向滤波算法。这种算法是基于 LS 准则导出的。即使它的运算量比典型的 FTF 算法等已大为减少, 但它们存在快速 RLS 算法对有限字长运算及模型突变的敏感性问题^[1]。文献[2]完全基于 LMS 算法导出两种新的自适应算法, 特别是算法 2 为一种实用的声回波对消算法。算法不是按传统方式在每次迭代中先估计 \mathbf{R}_{xx}^{-1} , 而是直接估计 $\mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{X}_k$ 。注意到 \mathbf{R}_{xx}^{-1} 的带条阵性质, 令

$$\mathbf{U}_k = \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{X}_k = [u_k \ u_{k-1} \ \dots \ u_{k-L}]^T \quad (2)$$

则 $\{u_k\}$ 是 x_k 经前、后向预测滤波的结果。从功率谱观点, u_k 的功率谱实际上是 x_k 的功率谱的逆, 即前、后向预测滤波, 我们称为逆谱滤波^[6], 可以采用图 2(a)、(b) 的两种等价方式加以实现。实际应用时可以采用其中任何一种结构, 先自适应估计预测滤波器系数 a_k , 第二级滤波系数不需自适应迭代, 由第一级反向复制即可。将式(2)代入式(1)得到快速牛顿算法为

$$y_k = \mathbf{W}_k^T \mathbf{X}_k \quad (3a)$$

$$e_k = d_k - y_k - M \quad (3b)$$

$$u_k = x_k * a_k * a_{M-k} \quad (3c)$$

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + 2\mu e_k \mathbf{U}_k \quad (3d)$$

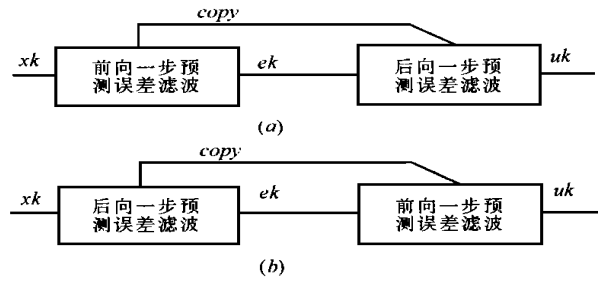


图2 逆谱滤波的实现

对于声回波对消应用 x_k 为语音信号, 预测滤波器阶数 $M \ll L$, 因而与 LMS 算法相比, 自适应求解 a_k 以及完成(3c)式的卷积运算的运算量是微不足道的。文献[2]算法 2 在预测部分采用格型结构, 先后向预测, 再前向预测得到 $\{u_k\}$ 。而且在格型预测滤波部分及自适应横向滤波部分均采用 LMS 算法。计算机模拟证实, 这种算法虽然在收敛速度上次于基于 RLS 算法的 FNTF 算法^[3], 但一个突出的优点是稳定性, 特别是对输入过程模型突变的适应能力非常好。

2.2 改进的快速 LMS/Newton 算法

本文提出的算法, 既不同于上述完全基于 RLS 算法的 FNTF 算法, 也不同于完全基于 LMS 算法的文献[2]的算法。而是在格型滤波预测滤波部分采用 RLS 类快速算法^[5], 而在横向滤波部分采用 LMS 类算法。提出这种算法的基本思想是, 快速牛顿算法的两个部分, 即预测滤波和横向滤波两步处理中, 预测滤波是决定整个算法收敛速度的关键。特别是对输入过程为时变强相关信号时, \mathbf{R}_{xx}^{-1} 或 $\mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{X}_k$ 收敛的快慢决定了整个算法的性能。文献[2]中图 8~图 10 的模拟结果证实这个问题。因而在预测部分采用 FRLS 算法, 但本文也不同于文献[2]的 FNTF 算法, 本算法在预测部分采用了格型结构。由于格型结构本身具有比较好的稳健性, 因而应该不存在文献[2]方案对模型突变、激励信号突变等所存在的稳定性问题。改进后的快速牛顿算法如下, 并与文献[2]的算法 2 对比, 主要是得到 u_k 算法的不同。

FRLS Lattice Algorithm

Initialization:

$$e_m^f(0) = e_m^b(0) = 0; \quad y_m(0) = 1; \quad k_m^f(0) = k_m^b(0) = 0$$

$$P_m^b(0) = P_m^f(0) = c$$

for $n = 1$ to Num

$$e_0^f(n) = e_0^b(n) = x(n)$$

$$P_0^b(n) = P_0^f(n) = P_0^f(n-1) + x^2(n)$$

$$y_0(0) = 0$$

for $m = 1$ to M

$$de_m(n) = de_m(n-1) + e_{m-1}^b(n-1) e_{m-1}^f(n) / y_{m-1}(n-1)$$

$$k_m^b(n) = de_m(n) / P_{m-1}^b(n-1); \quad k_m^f(n) = de_m(n) / P_{m-1}^f(n)$$

$$e_m^f(n) = e_{m-1}^f(n) - k_m^b(n) e_{m-1}^b(n-1)$$

$$e_m^b(n) = e_{m-1}^b(n-1) - k_m^f(n) e_{m-1}^f(n)$$

$$P_m^f(n) = P_{m-1}^f(n) - k_m^b(n) d e_m(n)$$

$$P_m^b(n) = P_{m-1}^b(n-1) - k_m^f(n) d e_m(n)$$

$$Y_m(n-1) = Y_{m-1}(n-1) - (e_{m-1}^b(n-1))^2 / P_{m-1}^b(n-1)$$

$$Q(n) = BQ(n-1) + (1-B)[(e_M^f(n))^2 + (e_M^b(n))^2 + \varepsilon]$$

$$u(k) \text{ update}$$
for $j = N-1$ to $2 \text{ step} - 1$

$$u(n-j) = u(n-j+1)$$

$$se_{0j}^f(n) = se_{0j}^b(n) = e_M^b(n)$$
for $m = 1$ to $M-1$

$$se_m^f(n) = se_{m-1}^f(n) - k_m^b(n) se_{m-1}^b(n-1)$$

$$se_m^b(n) = se_{m-1}^b(n-1) - k_m^f(n) se_{m-1}^f(n)$$

$$u(n) = Q(n)^{-1} [se_{M-1}^b(n) - k_M(n) se_{M-1}^b(n-1)]$$
Adaptive transversal filtering
$$y(n) = W^T(n)X(n)$$

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

$$W(n+1) = W(n) + 2\mu e(n-M)u(n)$$

2.3 稳定性分析

模拟实验证明, 直接将 FRLS 算法用于预测滤波与 FNTF 算法一样, 同样存在稳定性问题。仔细观测发现, 这一不稳定并不表现在预测滤波部分, 而是出现在横向滤波部分。从频域角度分析两种算法的稳定性问题。当 x_k 为 AR 模型时, 由 x_k 得到 u_k , 无论是先向前滤波再向后滤波, 或者反之, 均可看成是对 x_k 的逆谱滤波^[6]。即 u_k 的功率谱将是 x_k 的功率谱的倒数。

设 x_k 的功率谱为 $G_x(\omega)$, 则前向预测误差滤波器传函的模为 $|H_f(\omega)| = |1/G_x(\omega)|^{1/2}$ 。后向预测误差滤波器传函为 $H_b(\omega) = H_f^*(\omega)$ 。整个处理系统传函为

$$H(\omega) = H_f(\omega)H_b(\omega) = H_b(\omega)H_f(\omega) = |H_f(\omega)|^2 = |H_b(\omega)|^2 = 1/G_x(\omega), \text{ 可得输出信号 } u_k \text{ 的功率谱为}$$

$$G_u(\omega) = G_x(\omega) |H(\omega)|^2 = 1/G_x(\omega) \quad (4)$$

因而, 当模型由低通谱 AR1 向高通谱的 AR3 突变时, 系统特性来不及从高通转变为低通, 因而 u_k 的能量会突增, 引起自适应横向滤波器不稳定。如果不对 u_k 做归一化处理, 文献[3]算法 2 一样会不稳定, 反过来类似文献[2]将改进算法 u_k 做归一化处理同样可以增强稳定。具体实现时, 递推估计预测误差功率 $Q(n)$, 再对 $u(k)$ 做归一化处理。

3 模拟实验研究

为了考查改进后的牛顿算法, 对它进行三项对比研究, 一是收敛速度改进的研究, 二是对输入信号模型突变算法稳定性研究, 三是针对实际的语音信号激励和真实 LRM 声回授冲激响应的回声对消研究。

3.1 收敛速度研究

在计算机模拟实验中, 我们采用了文献[2]建议的三种激励信号模型, 即

$$\begin{aligned} \text{AR1: } P_1 &= 0.5 \quad P_2, P_3 = 0.85e^{\pm j\pi/3} \quad P_4, P_5 = 0.7e^{\pm j2\pi/3} \\ \text{AR2: } P_1 &= 0.5 \quad P_2, P_3 = 0.9e^{\pm j\pi/6} \quad P_4, P_5 = 0.85e^{\pm j\pi/2} \\ \text{AR3: } P_1 &= 0.5 \quad P_2, P_3 = -0.9e^{\pm j\pi/6} \quad P_4, P_5 = -0.85e^{\pm j\pi/2} \end{aligned}$$

它们均为五阶 AR 模型, 其中 AR1 特征值分散度为 1000, 而 AR2 和 AR3 特征值分散度为 10000。选用 AR2 为激励信号, 分别用上述两种算法对 30 阶的未知系统进行辨识, 独立进行 20 次运算, 并加以适当平滑处理, 结果如图 3 所示。可见在相同超量均方误差情况下, 改进的牛顿算法收敛速度优于文献[2]算法 2。

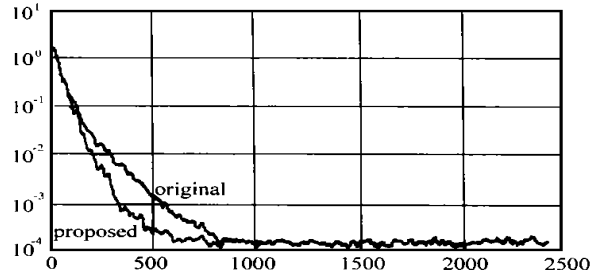


图 3 两种算法收敛速度的比较

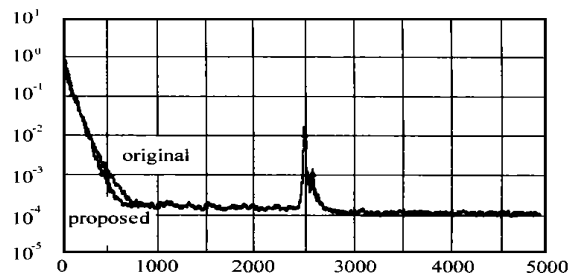


图 4 两种算法稳定性的比较

3.2 稳定性问题

为了考查改进的牛顿算法的稳定性, 类似文献[3], 将输入激励信号在 2500 个点时从低通谱 AR2 突变至高通谱 AR3, 实验表明, 若简单地应用 LS 格型算法则必然出现 FNTF 类的不稳定问题。因而需要将 u_k 做功率归一化处理。图 4 的实验结果证实了这一论断。实际中算法 2 按文献[2]优选 B 为 0.95, 而改进算法中 B 为 0.995。由图可见, 激励信号突变对两种算法的影响完全是一样的。

3.3 实际声回波对消研究

激励信号采用一段真实录制的汉语语音信号, 采样率为 11kHz, 时间为 20 秒。LRM 冲激响应为真实房间测定的冲激响应, 用前 1024 个系数构成 LRM 模型, 比较准则采用 ERLE(回声衰减增益), 定义为

$$ERLE = 10 \log \frac{E[(d_k - n_k)^2]}{E[(e_k - n_k)^2]}$$

式中 $E[\cdot]$ 表示数学期望, 实际测量时用 k 时刻前后 1000 个样点做时间平均来代替。由图 5 曲线明显看出, 改进的快速牛顿算法明显优于文献[2]算法 2, 特别是在声回波能量较大的尖峰处。

4 结论

利用语音信号可由低阶全极点模型来拟合的特点, 提出一种改进的快速牛顿算法, 在格型预测滤波部分采用 LS 算

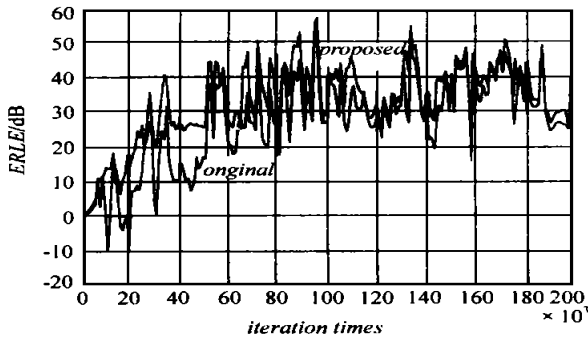


图 5 回声衰减增益的比较

法,而在自适应横向滤波部分采用 LMS 算法,得到了比全部采用 LMS 算法更好的声回波抑制性能。从逆谱滤波的观点对稳定性问题做出合理的解释,并提出一种有效方法,解决了一般快速 RLS 算法固有的稳定性问题。将算法广泛用于不同的 LRM 系统和不同的语音激励加以考查值得进一步研究。

参考文献

- [1] T. Petillon et al. The fast Newton transversal filter: An efficient scheme for acoustic echo cancellation in mobile radio. IEEE Trans. Signal Processing, 1994, 42(3): 509~ 518
- [2] B. Farhang Boroujeny. Fast LMS/ Newton algorithms based on autoregressive modeling and their application to acoustic echo cancellation. IEEE Trans. Signal Processing, 1997, 45(8)

- [3] G. V. Moustakides and S. Theodoridis. Fast newton transversal filters — A new class of adaptive estimation algorithm. IEEE Trans. Signal Processing, 1991, 39(10): 2184~ 2193
- [4] 维德罗等著,王永德等译. 自适应信号处理. 四川大学出版社, 1991
- [5] S. Thomas Alexander. Adaptive signal processing theory and applications, Springer Verlag, New York Inc, 1986
- [6] 王永德. 有色高斯噪声景下信号的最佳处理——自适应逆谱滤波. 四川大学学报, 1985, (4): 66~ 75



王永德 四川大学教授, 1962 年毕业于无线电系, 1981~ 1982 年美国康奈尔大学作访问学者。现为中国电子学会信号处理学会委员, 四川大学 TI DSP 实验室主任。主要研究方向为自适应信号处理在通信、雷达中的应用, 全数字化高速 Modem DSP 实现。



王春霞 1975 年生, 四川大学无线电系 98 级硕士研究生。主要研究方向为模式识别与信号处理及其 DSP 实现。

(上接第 30 页)

参考文献

- [1] Evans, A., Kantrowitz, W. . A user authentication scheme for requiring secrecy in the computer. Comm. ACM, 1974, 17(8): 437~ 442
- [2] Lennon, R. E., Matyas, S. M. . Cryptographic authentication of time invariant quantities. IEEE Trans. Comm., 1981, 29(6): 773~ 777
- [3] Lamport, L. . Password authentication with insecure communication. Comm. ACM, 1981, 24(11): 770~ 773
- [4] Chang, C. C., Wu, T. C. . Remote password authentication with smart cards. IEE Proc. E, 1991, 138(3): 165~ 168
- [5] Chang, C. C., Lai, C. S. . Correspondence for remote password authentication with smart cards. IEE Proc. E, 1992, 139(4): 372~ 375
- [6] Chang, C. C., Hwang, S. J. . Using smart cards to authenticate remote passwords. Comput. Math. Applic., 1993, 26(7): 19~ 27
- [7] Wu, T. C. Remote login authentication scheme based on a geometric approach. Comput. Commun., 1995, 18(12): 959~ 963
- [8] Wu, T. C., Yeh, Y. S. . A conference key distribution system based on crossproduct. Comput. Math. Applic., 1993, 25(4): 39~ 46