

# 基于 LMS/SOLMS 算法的时变多径水声信道估计方法\*

张刚强 童峰<sup>†</sup>

(厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门 361005)

**摘要** 缓变信道下基于 LMS 算法的信道估计算法具有较好的跟踪性能,但对快变信道,LMS 算法跟踪性能下降。SOLMS 算法具有比 LMS 算法更好的跟踪性能,尤其是在快变的信道下。但由于 SOLMS 算法在收敛阶段的振荡性,这时收敛速度较 LMS 算法慢。本文提出一种收敛模式下用 LMS 算法获得信道的参数,收敛后则切换到 SOLMS 算法跟踪信道的变化的信道估计方法。新方法结合了 LMS 算法收敛快和 SOLMS 算法跟踪性能好的优点。对时变多径水声信道估计的计算机仿真实验证明了该方法的有效性。

**关键词** 时变多径水声信道,LMS 算法,二阶 LMS 算法,信道估计

## Time-varying underwater acoustic multipath channel estimation based on LMS/SOLMS algorithm

ZHANG Gang-Qiang, TONG Feng

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of the MOE, Xiamen University, Xiamen 361005)

**Abstract** Channel estimation based on LMS algorithm can work well under slowly time-varying channel. In tracking fast varying channel, however it can not provide satisfactory performance. SOLMS algorithm outperforms LMS algorithm in channel tracking especially in the fast changing channel, and yet, due to the oscillation nature of SOLMS algorithm, SOLMS algorithm converges more slowly than LMS algorithm. This paper presents a novel method of channel estimation which initially uses LMS algorithm to acquire channel parameters in the convergence mode and then converts to SOLMS algorithm for channel tracking after convergence. This new method combines the merits of the fast convergence rate of the LMS algorithm and the better tracking performance of SOLMS algorithm. The effectiveness of this new method is verified via the computer simulation of time-varying underwater acoustic multipath channel estimation.

**Key words** Time-varying underwater acoustic multipath channel, LMS algorithm, Second-order LMS algorithm, Channel estimate

2006-12-25 收稿; 2007-05-28 定稿

\*国家自然科学基金(项目编号:10704063)和福建省自然科学基金(项目编号:D0610019)资助项目

作者简介:张刚强(1984-),男,福建人,硕士研究生,研究方向:水声通信。童峰(1973-),男,教授。

<sup>†</sup>通信联系人 E-mail: ftong@xmu.edu.cn

## 1 引言

水声信道中广泛存在着反射、折射、散射、相位畸变、多普勒效应、声线弯曲、混响、噪声等现象,是典型的时变多径信道。时变多径会引起严重的码间干扰,使接收信号产生畸变,同时还会对信号造成衰落。通过对水声信道的实时估计,可以及时调整接收处理方式,使之达到与信道相匹配,从而抑制信道的影响。

最简单和常用的信道估计器是线性自适应滤波器,自适应滤波器常用的一种权系数更新算法是 LMS<sup>[1]</sup> 算法 (Least Mean Square),在恒定或缓变信道下,LMS 算法可以很好地工作,但在快变信道下,LMS 算法跟踪性能不佳<sup>[2]</sup>。

当知道信道时变特性的先验知识时,为改善信道的跟踪估计,采用二阶动态马尔可夫过程对时变信道进行建模,基于此 Gazor<sup>[2]</sup> 提出了 SOLMS (Second-order LMS) 算法,这种自适应算法分两步实现,第一步跟传统 LMS 算法一致,第二步包含对权值向量增量的估计和对下次迭代时权值的预测。这种两步自适应算法计算上的高效(特别是当采用块处理技术时,如频域分块 LMS 算法)以及它的快速跟踪能力,使它得到了广泛的应用。文献[3]中给出了一种变步长 SOLMS 的实现方法。

SOLMS 算法的跟踪性能比 LMS 算法好,但在收敛模式下,SOLMS 算法振荡比较大,使得收敛速度比 LMS 算法慢<sup>[4]</sup>。本文提出了收敛模式下用 LMS 算法获得信道的参数,收敛后切换到 SOLMS 算法来跟踪信道的变化这种信道估计方法。新方法结合了 LMS 算法收敛快、稳定性好和 SOLMS 算法跟踪性能好的优点。

## 2 LMS 及 SOLMS 算法简介

假设图 1 中的信道是一个  $k$  时刻输入向量为  $X_k$ ,权向量为  $H_k$  的滤波器,它的期望信号是  $d_k = H_k^H X_k + N_k$ ,其中  $N_k$  代表噪声。图 1 为自适应信道估计器的框图。自适应算法根据误差信号  $e_k$ ,不断对权向量  $H_k$  的估计值  $W_k$  进行修正。

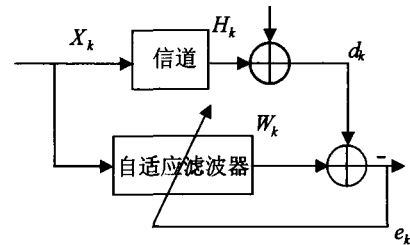


图 1 基于训练序列的自适应信道估计

在自适应均衡和信道估计中,应用最广的自适应算法是 LMS 算法,它是 Widrow 在 20 世纪 60 年代初提出的。LMS 算法的形式为<sup>[1]</sup>:

$$W_{k+1} = W_k + \mu X_k e_k \quad (1)$$

式中  $W_{k+1}$  是第  $k+1$  步迭代(也即时刻  $k+1$ )的权向量,误差信号  $e_k$  定义为期望输出  $d_k$  与自适应滤波器实际输出之间的误差,即  $e_k = d_k - \omega_k^H X_k$ ,其中  $\mu$  是迭代的更新步长,  $X_k$  是输入向量。

如果权向量的变化量  $\bar{W}_k \triangleq W_{k+1} - W_k$  与权向量  $W_{k+1}$  相关联,就可以利用这个信息来预测  $W_{k+1}$ ,从而改善跟踪性能,这是 SOLMS 算法跟踪性能优于传统的 LMS 自适应算法的一个原因。

SOLMS 算法是通过对权向量采用二阶马尔可夫过程<sup>[4]</sup>进行建模、简化卡尔曼滤波算法得到的,将卡尔曼滤波算法方程中的矩阵增益用常数代替,就得到如下 SOLMS 算法的迭代方程。

$$\bar{W}_{k+1} = \bar{W}_k + \alpha \mu X_k e_k \quad (2a)$$

$$W_{k+1} = W_k + \bar{W}_{k+1} + \mu X_k e_k \quad (2b)$$

### 3 新的时变信道估计算法

跟踪模式是自适应算法的稳态运行,它紧跟着收敛模式,收敛模式是一种暂态现象。因此,在跟踪开始之前,算法必须获得系统的参数。这有两个含义:首先,收敛速度一般是与跟踪行为无关的,同样,在迭代次数(或步数)相当大时我们分析跟踪行为;其次,参数随时间的变化与算法收敛速度相比足够小,使算法能进行适当地跟踪,否则它将不断地获取参数<sup>[5]</sup>。

在信道均衡和估计中,LMS算法收敛速度快,但跟踪性能较差。SOLMS算法跟踪性能好,但实验表明在收敛过程中SOLMS算法表现出明显的振荡特性,因而其收敛速度较慢。基于LMS算法和SOLMS算法的特点,本文设计了一种收敛模式下用LMS算法获得信道的参数,收敛后切换到SOLMS算法跟踪信道变化的混合型信道估计方法。这种方法结合了LMS

算法和SOLMS算法的优点。

收敛模式下,在算法的每次迭代过程中,我们定义 $k$ 时刻估计所得信道冲激响应各抽头系数与 $k-1$ 时刻迭代的各抽头系数之间差值的绝对值均值为 $k$ 时刻算法收敛指数(记为 $E_k$ ),由 $E_k$ 来判断算法的收敛情况。收敛指数 $E_k$ 的数学表达式为:

$$E_k = \frac{1}{M} \left( \sum_{i=1}^M |W_k(i) - W_{k-1}(i)| \right) \quad (3)$$

式中, $M$ 是信道的阶数, $W_k(i)$ 表示信道的估计值,其中 $k$ 表示迭代次数, $i$ 表示信道冲激响应抽头系数的序号。

取 $\epsilon$ 为设定的收敛指数阈值,当 $E_k \geq \epsilon$ 时,迭代还没有收敛,取式(2)中的 $\alpha=0$ ,迭代过程采用LMS算法,避免了迭代过程中抽头系数的振荡;随着迭代的进行, $E_k$ 越来越小,当 $E_k < \epsilon$ 时,收敛过程结束,进入跟踪模式,式(2)中的 $\alpha$ 取一个设定的值,迭代过程采用SOLMS算法,更好地跟踪信道的变化。即混合型方法系数迭代公式为:

$$\begin{cases} W_{k+1} = W_k + \mu X_k e_k & E_k \geq \epsilon \\ \bar{W}_{k+1} = \bar{W}_k + \alpha \mu X_k e_k, W_{k+1} = W_k + \bar{W}_{k+1} + \mu X_k e_k & E_k < \epsilon \end{cases} \quad (4)$$

### 4 仿真实验

仿真中采用文献[6]中的海洋水声信道模型。该模型的参数为:海深54.9m,海面声速为1475m/s,海底声速为1467m/s;声源布放深度为18.30m,发射频率为15kHz;接收点深度为15.2m,距离声源为5km,信息传输速率为1000符号/s。选用声压幅度较大的6条本征声线<sup>[6]</sup>,信道的脉冲响应由式 $c(t) = \sum_i \alpha_i p(t - \tau_i)$ 计算,式中: $\alpha_i$ 是对应于不同本征声线的声压幅值, $\tau_i$ 为相对时延, $p(t)$ 为滚降系数为20%的升余弦脉冲。将该信道归一化后,信道脉冲响应表示为 $h_0$

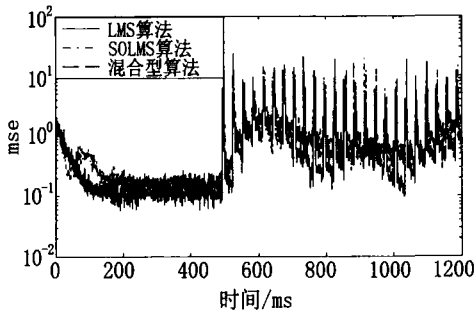
$$= [1, -0.0509, 0.0049, 0.1351, 0.6565, 0.4899, 0.1876, -0.0367].$$

在信道仿真实验中,取LMS算法 $\mu=0.02$ ,SOLMS算法 $\mu=0.02$ , $\alpha=0.05$ ,收敛指数阈值为 $\epsilon=0.01$ 。噪声为加性高斯白噪声,信噪比为10db。发送的数据序列由独立同分布的 $\{-1, 1\}$ 组成,前500个序列周期期间信道恒定,使LMS算法和SOLMS算法达到收敛。从第501个序列周期开始,设定信道响应中幅度较大的第1阶、第5阶和第6阶每隔 $L$ 个序列周期按照正弦规律变化,其余各阶保持不变。即仿真时变信道的数学表达式为:

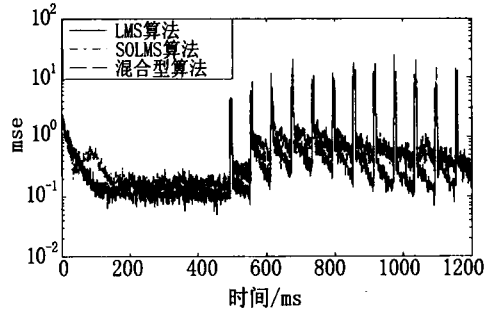
$$\begin{cases} h(i) = h_0 & i < 500 \\ h(i) = h_0 + [\sin(2\pi k/20), 0, 0, 0, \sin(2\pi k/20), \sin(2\pi k/20), 0, 0] & 500 + (k-1)L + 1 \leq i \leq 500 \\ + kL, k = 1, 2, \dots, 40 \end{cases}$$

图 2(a)(b)分别为信道每隔 30 和 60 个序列周期(即上式中  $L=30$  和  $L=60$ )变化时 LMS 算法、SOLMS 算法和混合型方法的均方误差曲线,图 3(a)(c)(e)分别为信道每隔

30 个序列周期变化时 LMS 算法、SOLMS 算法和混合型方法对信道第 1、5、6 阶跟踪情况的比较。图 3(b)(d)(f)为信道每隔 60 个序列周期变化时跟踪情况的比较。

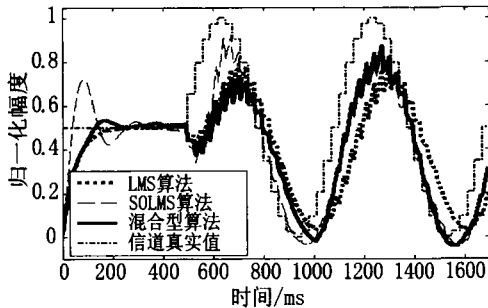


(a)  $L=30$ 时的均方误差曲线

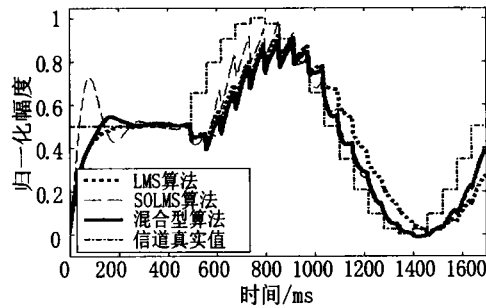


(b)  $L=60$ 时的均方误差曲线

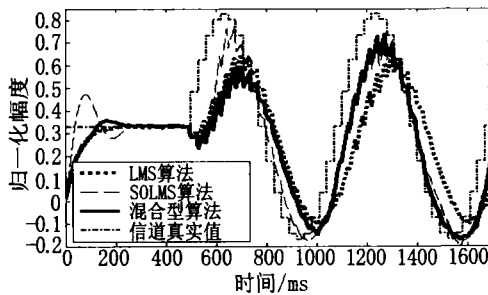
图 2 均方误差曲线



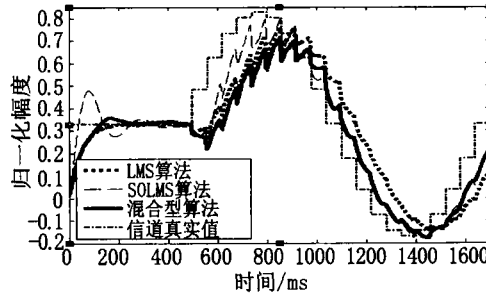
(a)  $L=30$ 时几种算法对信道第1阶变化的跟踪情况的比较



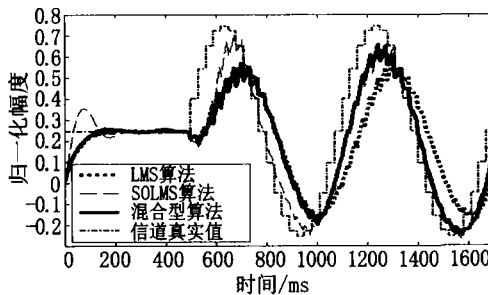
(b)  $L=60$ 时几种算法对信道第1阶变化的跟踪情况的比较



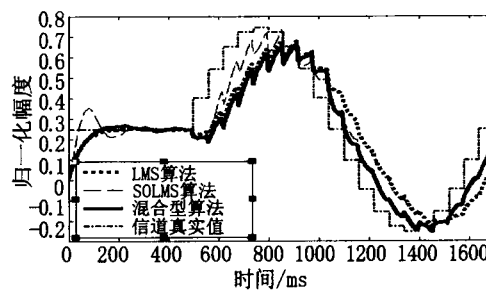
(c)  $L=30$ 时几种算法对信道第5阶变化的跟踪情况的比较



(d)  $L=60$ 时几种算法对信道第5阶变化的跟踪情况的比较



(e)  $L=30$ 时几种算法对信道第6阶变化的跟踪情况的比较



(f)  $L=60$ 时几种算法对信道第6阶变化的跟踪情况的比较

图 3 几种算法对信道变化跟踪情况的比较

由图2均方误差曲线可以看出,在收敛模式下,SOLMS算法振荡地收敛,因而收敛速度比LMS算法慢,在稳定时的均方误差值也比LMS算法稍大;混合型方法则克服了收敛过程中的振荡,收敛速度变快,曲线接近LMS算法。

由图3(a)(c)(e)可以看出,当信道每隔30个序列周期变化时,对信道的第1、5和6阶,收敛模式下混合型方法和LMS算法的估计值稳步接近真实值;由于SOLMS算法是振荡收敛的,因此SOLMS算法的估计值围绕真实值持续振荡了一段时间后趋向收敛,在跟踪模式下,SOLMS算法和混合型方法跟踪的曲线与变化的真实曲线比较接近,而LMS算法跟踪的曲线则有一定的偏差。由图3(b)(d)(f)可以看出,当信道每隔60个序列周期变化时,三种算法跟踪的曲线都与变化的真实曲线接近,同时SOLMS算法和混合型方法跟踪的曲线又优于LMS算法跟踪的曲线。因此,在仿真的两种信道时变情况下,SOLMS算法的跟踪性能都优于LMS算法;而混合型方法在继承SOLMS算法跟踪好的优点的同时,克服了收敛过程中振荡的缺点。

文献[7]从减小运算量的目的出发,提出了一种在收敛模式下采用跟踪时变信道能力强的平方根卡尔曼算法,而在跟踪模式下采用具有一定跟踪性能且运算量较小的LMS算法,从而得到了一种新型的混合自适应均衡算法。对比讲,本文提出的信道估计混合方法,由于在跟踪模式下采用了SOLMS算法,因而跟踪性能好于这种均衡算法,虽然运算量略有增加,但随着数字信号处理技术的发展,本文的混合型方法同样可以于DSP或FPGA实现实时处理,从而为快变的水声信道数据传输进行信道实时估计或均衡提供了一种有效的途径。

## 5 总结

本文首先介绍了信道跟踪中常用的LMS算法和改进的SOLMS算法。SOLMS算法跟踪性能好于LMS算法,但由于收敛阶段的振荡性,SOLMS算法的收敛速度较LMS算法慢。针对SOLMS算法的这种缺点,本文提出了新的混合型方法,即在收敛模式下采取LMS算法获得信道的参数,并通过引入收敛指数判断算法收敛与否,当信道收敛进入跟踪模式后,切换成SOLMS算法跟踪信道的变化。时变多径水声信道估计的仿真实验结果表明,混合型方法结合了LMS算法和SOLMS算法的优点,具有收敛速度快、稳定性好和跟踪性能好的特点。

## 参 考 文 献

- [1] B. Farhang-Boroujeny, S. Gazor. Performance of LMS-based adaptive filters in tracking a time-varying plant. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1996, 44(11): 2868-2871.
- [2] S. Gazor. Prediction in LMS-type adaptive algorithms for smoothly time varying environments. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1999, 47(6): 1735-1739.
- [3] Y. Xue and X. Zhu. Wireless channel tracking based on self-tuning second-order LMS algorithm. *IEEE Proc. - Commun.*, 2003, 150(2): 115-120.
- [4] K. Shahtalebi, S. Gazor, S. Pasupthy et al. Second-order  $H^\infty$  optimal LMS and NLMS algorithms based on a second-order Markov model. *IEE Proc. - Vis. Image Signal Process*, 2000, 147(3): 231-237.
- [5] Simon Haykin, 郑宝玉译. 自适应滤波器原理(第4版). 北京: 电子工业出版社, 2003, 504-526.
- [6] 杨晓东. 水声数据高速传输技术的研究. 博士学位论文, 西北工业大学, 1998.
- [7] 刘莹, 李文铎. 时变深衰落信道中的自适应均衡技术. *无线电通信技术*, 2003, 29(1): 30-32.