

几种改进型 RLS 算法在自适应滤波系统中的应用*

孙锦华, 金力军

(西安电子科技大学 综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 对用于信道估值(自适应模拟系统)和信道均衡(自适应逆模拟系统)的几种改进型 RLS 算法进行了比较。由于信道估值的最优解可以模拟出信道的传输函数,从而得到较为准确的信道参数,而信道均衡的最优解却受噪声功率谱密度的影响,因此提出了适用于时变信道的、基于信道估值的均衡方法,采用性能良好的信道估值算法将改善自适应均衡的性能。

关键词: RLS 算法;信道估值;自适应模拟;信道均衡

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-5694(2003)03-0014-05

Application of Several Improved RLS Algorithms in Adaptive Filter System

SUN Jin-hua, JIN Li-jun

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks,

Xidian University of Science and Technology, Xi'an 710071, P. R. China)

Abstract: This paper presents the comparison among several improved RLS(Recursive Least Squares) algorithms used for channel identification (adaptive modeling system) and channel equalization (adaptive inverse modeling system). The optimal solution of channel identification can be used to estimate the transmission function of the channel, which leads to pretty accurate channel parameters, while the optimal solution of channel equalization is influenced by the power density of noise. Therefore, this paper presents a channel identification based equalization method for time-variant channel. With this method, channel identification algorithm with good performance is used to improve the performance of adaptive equalization.

Key words: RLS algorithms; channel identification; adaptive modeling; channel equalization

0 引言

近 40 年来,自适应信号处理的理论及技术不断发展,日趋完善,在控制系统、雷达、通信、信号处理领域应用越来越广。自适应滤波器可以作为系统信号传输的模型与逆模型,因而可用于自适应辨识(adaptive identification)、自适应预测(adaptive prediction)及自适应均衡(adaptive equalization)等等。自适应滤波器的求解通常是以某种合理定义下的估

计误差最小为准则,解出待定参数,通常采用递推的方法进行求解^[1]。在传统的自适应滤波系统中,RLS (recursive least squares)算法由于采用了在每时刻对所有已输入信号重估的平方误差和最小的准则(即 LS 准则),克服了 LMS(least mean square)算法收敛速度慢、信号非平稳适应性差等缺点。与 LMS 算法相比,RLS 算法具有快速的跟踪能力,对于时变信道来说,这一点极为重要。

RLS 算法也有一些固有的缺陷,即为了减小预

* 收稿日期:2002-12-31

基金项目:国家“十五”军事预研基金资助(110010303)

作者简介:孙锦华(1979-),女,陕西西安人,博士研究生,研究方向主要为数字通信与信号处理;金力军,女,教授。

测中的噪声,当预测参数趋向于真值时,RLS算法中的Kalman增益向量接近于0,此时就可能跟踪不上信道参数的突变。一些学者相继提出了各种改进的RLS算法,例如,指数遗忘的加窗RLS算法、重新初始化迭代相关矩阵的方法、Park和Jun提出的自扰动RLS算法(selfperturbing recursive least squares algorithm)^[2]、J. Jiang和R. Cook提出的抗噪声的快速跟踪RLS算法^[3]、Kwang-Seop Eom提出的基于Kalman滤波的快速跟踪的抗噪声RLS算法^[4]。后将3种算法分别称之为SPRLS算法、MRLS算法、ISPRLS算法,它们应用的背景都是信道估值,对于信道的突跳具有较好的跟踪能力,并且对噪声有一定的抑制作用,而当这些算法用于信道均衡时,能否同样快速地跟踪信道是一个值得深入研究的问题。

在本文中,首先从自适应模拟与逆模拟的角度分析几种改进型RLS算法在信道估值与信道均衡应用中的不同之处,并给出它们的性能比较;在此基础上提出适用于时变信道的均衡方法,并给出其与自适应迭代算法的性能比较。

1 自适应模拟系统与逆模拟系统

自适应滤波系统分为自适应模拟系统和自适应逆模拟系统。自适应模拟系统可以用一个自适应系统模拟一个未知的、可以随时间慢变的系统。自适应逆模拟则可消除信号在器件和媒质中传输所受到的影响。信道估值属于前者,而信道均衡属于后者。对于信道估值与均衡而言,时变信道也就是未知系统,假定其传输函数为 $P(z)$,自适应滤波器的传输函数为 $H(z)$ 。由维纳滤波理论可知,自适应滤波器最佳权向量的变换等于输入信号和参考信号之间的互功率谱与输入信号的功率谱之比。图1给出了信道估

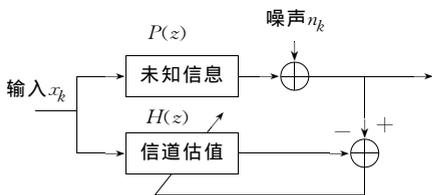


图1 信道估值模型

Fig. 1 Channel Identification Model

值模型,若假定信道估值系统噪声 n_k 与输入 x_k 相互

独立,则自适应滤波器的最佳传输函数^[5]为:

$$H_{opt}(z) = P(z) \tag{1}$$

图2给出了信道均衡模型,信道均衡模型系统噪声 n_k 与输入 s_k 相互独立,其最佳传输函数为:

$$H_{opt}(z) = \frac{P^*(z)\Phi_{ss}(z)}{|P(z)|^2\Phi_{ss}(z) + \Phi_{nn}(z)} \tag{2}$$

式(2)中, $\Phi_{ss}(z)$ 、 $\Phi_{nn}(z)$ 分别为输入信号 s_k 和噪声 n_k 的功率谱。

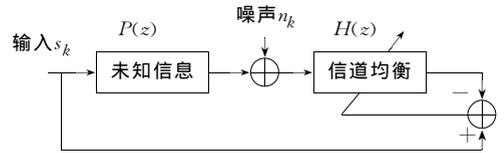


图2 信道均衡模型

Fig. 2 Channel Equalization Model

可以看出,当自适应模拟系统具有足够的“自由度”去匹配未知系统的输出或输入时,不可能同时匹配系统噪声 n_k 。事实上,内部系统噪声表现在系统输出,一般可看成是一个加性噪声,并认为该噪声与系统本身的输出是不相关的。若自适应模型为线性组合器,并且它的权值已调到使均方误差达到最小,则其最小均方误差解将主要由被控系统的冲激响应所决定,而不受噪声存在的影响,也就是说信道估值的最优解就为未知信道的传输函数,但自适应收敛过程还是会受到噪声的影响。另外,系统模拟还与输入信号谱或统计特性有关联,一般要求输入信号谱足够宽或统计相关性足够小才能得到好的模拟和辨识结果。

自适应逆模拟和自适应模拟不同,系统噪声 n_k 和被控系统(未知信道)输出信号 x_k 一起作为自适应滤波器的权输入,因而对权值的最小均方解产生影响,同时也影响自适应收敛,即信道均衡的最小均方解会受到噪声功率谱密度的影响。

2 用于信道估值与信道均衡的比较

从上述分析可以看出,自适应滤波算法用于信道估计时,可以模拟出未知信道的传递函数。用于信道均衡时,只有在系统噪声为零时,逆模型的传输函数才等于未知信道的逆系统(未知信道传输函数的倒数)。

前面提到的几种改进型RLS算法,对于时变信

道具有快速的跟踪能力,克服了正规RLS算法有可能失效的缺点。为了便于比较几种改进型RLS算法用于信道估值与信道均衡的不同,首先从算法的迭代公式入手来分析。假定接收信号为:

$$y(t) = \theta^{*T}(t)\Phi(t) + n(t) \quad (3)$$

正规RLS算法可以表示为:

$$e(t) = y(t) - \hat{\theta}^T(t)\Phi(t) \quad (4)$$

$$k(t) = \frac{P(t-1)\Phi(t)}{1 + \Phi^T(t)P(t-1)\Phi(t)} \quad (5)$$

$$P(t) = P(t-1) - k(t)\Phi^T(t)P(t-1) \quad (6)$$

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + k(t)e(t) \quad (7)$$

在式(3)~式(7)中, t 为离散采样时刻; $y(t)$ 是 t 时刻经过信道受到噪声干扰的信号; $n(t)$ 为零均值的高斯白噪声,方差为 σ_n^2 ; θ^* 为信道的真值向量; $\hat{\theta}(t)$ 是要预测的滤波器权向量; $\Phi(t)$ 为输入向量; $k(t)$ 为Kalman增益向量; $P(t)$ 为协方差矩阵。假定 $n(t)$ 与 $\Phi(t)$ 不相关。为了减小预测中的噪声,当迭代时间很长时,Kalman增益向量 $k(t)$ 已经趋于0,即使信道参数再次改变, $\hat{\theta}(t)$ 和 $\hat{\theta}(t-1)$ 也非常接近,也就是说RLS算法失去了跟踪能力。为此,几种改进型的RLS算法都是在迭代协方差矩阵 $P(t)$ 上下功夫,在 $P(t)$ 中加入一项与预测误差有关的自扰动项,该自扰动项对于信道参数的变化非常敏感,而对噪声却不敏感,当信道发生变化时,迭代矩阵受到扰动,变成非0,从而跟踪信道的变化。

在SPRLS算法、MRLS算法、ISPRLS算法中的 $P(t)$ 分别为式(8)、式(9)、式(12):

$$P(t) = P(t-1) - k(t)\Phi^T(t)P(t-1) + \beta \cdot \text{NINT}[\gamma e^2(t-1)] \cdot I \quad (8)$$

$$P(t) = P(t-1) - k(t)\Phi(t)P(t-1) + \beta \cdot \text{NINT}\{\gamma |f[y, \hat{y}, \sigma_n, M, (t-1)]|\} \cdot I \quad (9)$$

$$f[y, \hat{y}, \sigma_n, M, (t-1)] = \frac{1}{M} \sum_{i=t-1-M}^{t-1} y^2(i) - \frac{1}{M} \sum_{i=t-1-M}^{t-1} y(i)\hat{y}(i) - \sigma_n^2 \quad (10)$$

$$\hat{y}(t) = \hat{\theta}(t)\Phi(t) \quad (11)$$

$$P(t) = [I - k(t)\Phi^T(t)]P(t-1) + Q(t) \quad (12)$$

$$Q(t) = \beta \cdot \text{NINT}\left\{\gamma \left| \frac{E[e^2(t)] - \sigma_n^2}{\sigma_n^2} \right|\right\} \cdot I \quad (13)$$

式(8)~式(13)中, I 为单位阵,NINT为取整函数, E 代表求均值。在SPRLS算法和ISPRLS算法中, β , γ 为常数;在MRLS算法中, γ 需根据信道噪声的大小来调整, M 代表了运行窗口的大小,它取决于噪声的强度。

在这3种算法当中,SPRLS算法的 $P(t)$ 矩阵受到前向预测误差 $e(t-1)$ 的扰动,前向预测误差可以反映信道真值与预测值之间的不同,在信道参数变化很大而噪声很小时,该算法确实很有效,然而当噪声较大时上述算法几乎不能工作,原因在于信道参数的变化以及噪声的影响都可能导致较大的前向预测误差。MRLS算法中, $P(t)$ 矩阵受 f 函数的影响。 f 函数是包括 $y(t)$ 的自相关矩阵、 $y(t)$ 与 $\hat{y}(t)$ 的互相关矩阵、噪声方差的代数和。由于 $n(t)$ 是高斯白噪声,与 $\Phi(t)$ 不相关,很容易看出,不管噪声强度多大,当预测参数已经收敛到真值时,一个相当大的 M 就使得 f 函数的返回值为0(M 的选择应当正比于噪声的方差)。而当 $\hat{\theta}$ 不等于 θ^* 时, f 函数的值非0,即 f 函数对于信道参数的变化很敏感而对于噪声不敏感。由于采用了运行窗口 M ,该算法对于信道参数变化的检测有一个时延。 M 越大,收敛的速度越慢。为了克服MRLS算法中 γ 参数以及 M 窗口的大小要根据噪声的强度进行选择的不便,ISPRLS算法的自扰动项 $Q(t)$ 不需要在不同的信噪比条件下改变 γ 及 M 窗口大小,就能够很好地克服噪声的影响,快速地跟踪信道。

相比基本的RLS算法,几种改进型的RLS算法用在信道估值时,都能比较快地跟踪上信道的变化,但对于噪声的抑制程度而言,MRLS算法和ISPRLS算法比SPRLS算法要好,并且ISPRLS算法对于参数的控制较少,在实际应用中也就避免了进行参数设置的检测环节。

在仿真中,对RLS算法、MRLS算法、ISPRLS算法用在信道估值和信道均衡中进行了对比。信道估值的信道参数选自文献[2]、[3]、[4],假定未知信道的参数在第70次迭代时由[0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0]变为[0.8 0.9 1.3 1.1 -0.7 0.1 0.9 1.5 -0.2 -0.3]。信道均衡,采用线性均衡器,信号为2PSK,假定在第70次迭代时信道参数从[1+0j 0+0j 0.5*(0.996+0.087j) 0+0j 0.3*

$(0.985 + 0.174j)]$ 变为 $[1 + 0j \ 0.3 * (0.996 + 0.087j) \ 0 + 0j \ 0.2 * (0.985 + 0.174j) \ 0 + 0j]$ 。

图3和图4分别给出了信道参数估计的误差曲线和均衡器的均方误差曲线。参数预测误差定义为 $\|\theta - \hat{\theta}\|$, 取2-范数, 即 $\|x\| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}$ 。可以看出, 在第70次迭代信道发生变化时, MRLS算法和ISPRLS算法可以迅速地跟上信道的变化, 具有较快的收敛能力。MRLS算法和ISPRLS算法相比于正规RLS算法对于信道的突跳具有快速的跟踪能力和收敛性能。在信噪比较低时, 由于MRLS算法、ISPRLS算法中多加的扰动项受到噪声的影响, 在信道突跳前的一段时间, 其收敛时的参数误差要大于正规RLS算法。

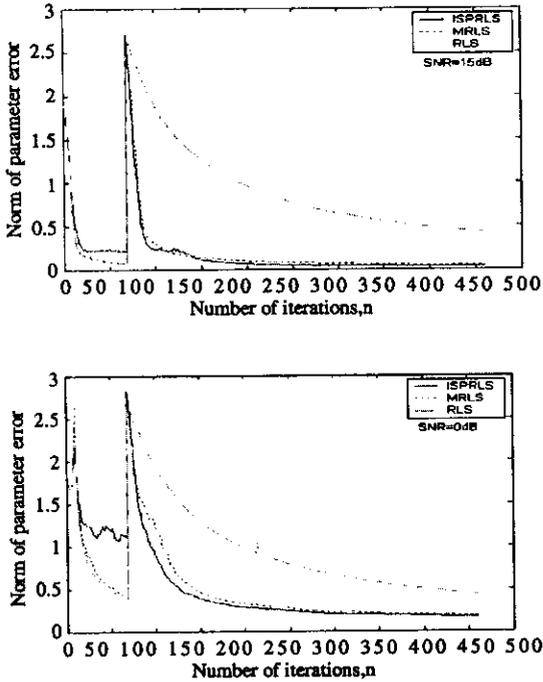


图3 参数误差性能曲线
Fig. 3 Performance of Parameter Error

在信道均衡中, 高信噪比下, ISPRLS算法在信道发生突跳时具有较快的跟踪能力和较好的收敛性能, MRLS算法略优于RLS算法, 但后两种算法的跟踪能力不如ISPRLS算法。在低信噪比下, MRLS和ISPRLS算法却显示不出它们对于正规RLS算法性能的改善。信道的变化早已淹没在很强的噪声之中, 区分不开。这也进一步验证了信道逆模拟的最优系统传输函数要受到噪声功率谱密度的影响。

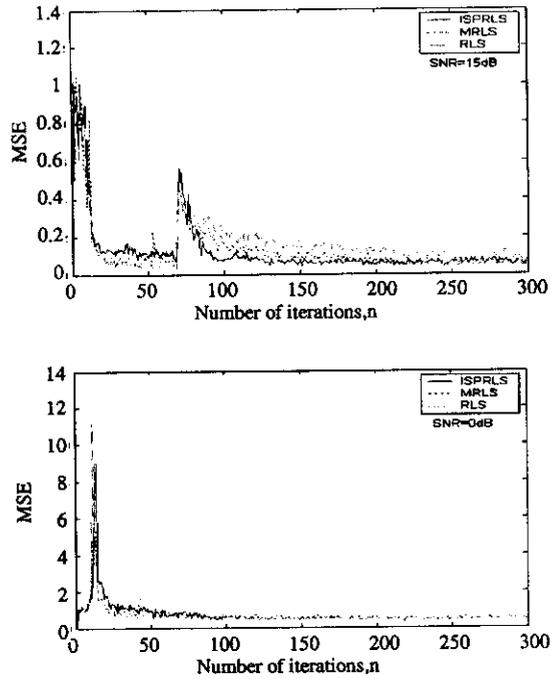


图4 均方误差性能曲线
Fig. 4 Performance of Mean Square Error

3 适用于时变信道的均衡算法

通过前面的理论分析和仿真, 得到基于信道均衡的最优系统传输函数要受到噪声功率谱密度的影响, 而最优化的信道估值对噪声有一定的抑制作用, 可以将信道较好地模拟出来。因而提示在信道均衡时, 可以采用能够快速跟踪信道变化且能够抑制噪声的自适应滤波算法先进行信道估值, 然后通过将信道估值的参数映射成均衡器系数^[6]来完成信道均衡, 从而改善自适应的均衡算法对噪声的敏感程度。在突发方式的通信系统中, 可以利用突发中的训练序列先估计时变信道, 然后得到均衡器系数用以完成后续数据的均衡。

图5中给出了采用RLS算法直接进行信道均衡和采用RLS先进行信道估计再均衡的均方误差性能比较。由于基于信道估值的均衡器系数来自于已经估出的信道参数, 故这种方法没有收敛过程。可以看出, 只要保证信道估值的准确性和实时性, 不论在高信噪比下, 还是在低信噪比下, 基于信道估值的均衡算法的性能都要优于直接均衡。这种方法对于快变信道以及衰落信道而言, 往往要优于传统的迭代算法。

使移动通信部门的维护能力和维护水平有了质的提高,但这些系统却存在静态、滞后的问题。而七号信令集中监测系统可以实时、动态地对信令网进行监测和维护,可以及时发现信令网存在的问题和隐患,并提供有效的解决方法和手段,为移动运营商提供了全新的、实时的、有效的维护手段,又对原有维护手段提供有益的、必要的补充,并已在移动网络的维护中发挥着越来越重要的作用。本系统采用的一些硬件和软件设备是目前国际上流行的先进技术设备,GPS授时系统、分布式数据库技术以及信令监测对象的全方位,多功能实施取得了较好的效果。

参 考 文 献

[1] GF007.1-2000.中国移动七号信令集中监测平台技术规范[S].

[2] GF001-9001-1990.中国国内电话网七号信号方式技术规范[S].
 [3] GF007.8-2000.GSM移动七号信令网技术体制[S].
 [4] 杨晋儒.七号信令系统技术手册[M].北京:人民邮电出版社,2001.
 [5] 纪红.七号信令系统[M].北京:人民邮电出版社,1999.
 [6] 李盘林,田兵,丰勇等.第三代移动通信系统TD-SCDMA信令测试软件[J].重庆邮电学院学报(自然科学版),2002,14(2):9-11.
 [7] 陈前斌,张云麟.No.7信令监测系统的设计—兼谈我国与国外各种制式交换机No.7信令的转换技术[J].重庆邮电学院学报(自然科学版),1997,9(2):1-6. (编辑:龙能芬)



(上接17页)

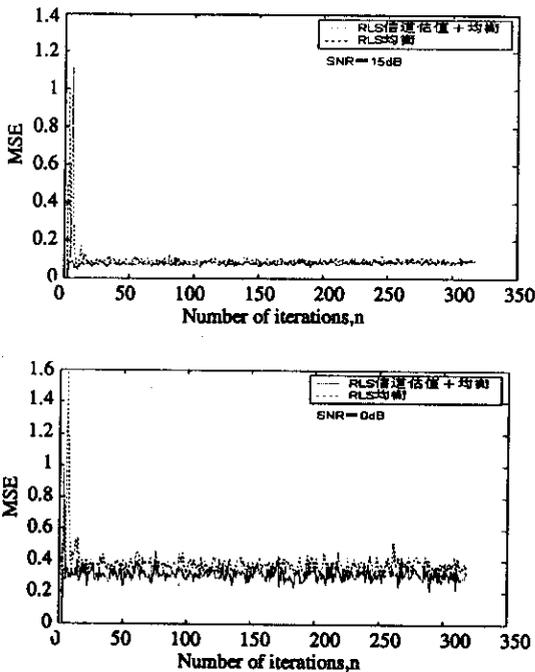


图5 自适应RLS均衡与基于信道估值的均衡均方误差性能比较
 Fig. 5 Performance Comparison of Mean Square Error between Adaptive RLS and Channel Identification-based Equalization

本文通过理论分析和仿真结果说明了几种改进型RLS算法在信道估值和信道均衡中应用的区别,并给出了采用基于信道估值的均衡策略,在快速准确的信道估值的保证下,该算法可以改善自适应迭

代均衡算法的性能。

参 考 文 献

[1] 陈尚勤,李晓峰.快速自适应信息处理[M].北京:人民邮电出版社,1993.
 [2] PARK D J, JUN B E. Selfperturbing recursive least squares algorithm with fast tracking capability[J]. Electronics Letters 1992, 28(6):558-559.
 [3] JIANG J, COOK R. Fast parameter tracking RLS algorithm with high noise immunity[J]. Electronics Letters, 1996, 28(22):2043-2045.
 [4] KWONG Seop Eom, DONG Jo Park. Fast tracking and noise-immunised RLS algorithm based on kalman filter[J]. Electronics Letters, 1996, 32(25): 2311-2312.
 [5] 沈福民. 自适应信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001.
 [6] FECHTEL S A. An investigation of channel estimation and equalization techniques for moderately rapid fading HF-channels[C]. In ICC'91 Conf, Rec, 1991. (编辑:龙能芬)