

自适应滤波器介绍与应用

俞一鸣

上海聚星仪器有限公司

1 引言

在工程实际中,经常会遇到强噪声背景中的微弱信号检测问题。例如在超声波无损检测领域,因传输介质的不均匀等因素导致有用信号与高频噪声信号叠加在一起。又如心电图信号受到的噪声污染可以出现在感兴趣的频带内并且具有类似心电图信号本身的特征表现。被埋藏在强背景噪声中的有用信号通常微弱而不稳定,而背景噪声往往又是非平稳的和随时间变化的,此时很难用传统方法来解决噪声背景中的信号提取问题。自适应滤波技术是一种有效降噪的方法,当系统能提供良好的参考信号时,可获得很好的提取效果。

自适应滤波的研究对象是具有不确定的系统或信息过程。“不确定”是指所研究的处理信息过程及其环境的数学模型不是完全确定的。其中包含一些未知因数和随机因数。任何一个实际的信息过程都具有不同程度的不确定性。自适应滤波器是利用前一时刻已获得的滤波器参数,自动地调节、更新现时刻的滤波器参数,以适应信号和噪声未知的统计特性,从而实现最优滤波。

自适应滤波器是能够根据输入信号自动调整性能进行数字信号处理的数字滤波器。作为对比,非自适应滤波器有静态的滤波器系数,这些静态

系数一起组成传递函数。对于一些应用来说,由于事先并不知道所需要进行操作参数,例如一些噪声信号的特性,所以要求使用自适应的系数进行处理。在这种情况下,通常使用自适应滤波器,自适应滤波器使用反馈来调整滤波器系数以及频率响应。

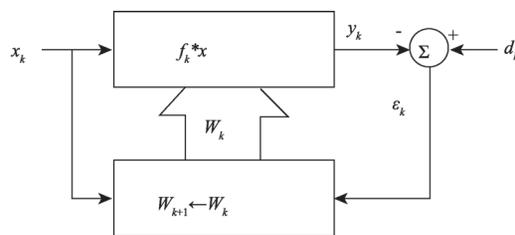


图1 自适应滤波器原理

图1中： k 表示离散采样时刻； $x(k)$ 表示观测到的信号输入； X 表示一系列的观测输入 x 的集合，即 $X=[x(n),x(n-1),\dots,x(n-p)]^T$ ； $d(k)$ 表示期望信号输入； W 表示滤波器系数， p 阶滤波器的系数定义为 $W_k=[w_k(0),w_k(1),\dots,w_k(n-p)]^T$ ； $\varepsilon(k)$ 表示输出误差信号，是期望信号 $d(k)$ 与估计信号 $y(k)$ 之差； f 表示滤波器的单位冲击响应。

图1上部的方框表示线性滤波，即将滤波器的单位冲击响应与观测到的输入信号进行卷积，得到 k 时刻的信号估计 $y(k)$ ，下部的方框则是自适应算法，通过输入信号 $x(k)$ 和误差信号 $\varepsilon(k)$ 改变滤波器系数。

$x(k)$ 作为输入信号，通过权系数可

2 自适应滤波器原理

自适应滤波器的特性变化是由自适应算法通过调整滤波器系数来实现的。一般而言，自适应滤波器由两部分组成，1)滤波器结构，为完成期望的处理功能而设计；2)调整滤波器系数的自适应算法，以改进性能。

调的数字滤波器产生输出信号 $y(k)$ ，将 $y(k)$ 与期望信号 $d(k)$ 进行比较得到误差信号 $e(k)$ 。 $e(k)$ 和 $y(k)$ 通过自适应算法对滤波器参数进行调整，自适应算法根据输入信号与误差信号生成校正因子，按照某种算法准则判断误差信号 $e(k)$ 是否达到最小。重复以上过程，滤波器逐渐掌握了输入信号与噪声规律以此为依据调节自身参数达到最佳滤波效果。

3 滤波器实现

自适应噪声抵消系统的核心是自适应滤波器，自适应算法对其参数进行控制，以实现最佳滤波。不同的自适应滤波器算法，具有不同的收敛速度、稳态失调和算法复杂度。最小均

方滤波器(LMS)和递归最小平方(RLS)是两种不同的系数更新算法。

3.1 最小均方滤波器

最小均方滤波器(least mean square filter, LMS)是一类可通过最小化误差信号的均方值而修正滤波器系数,达到所需理想滤波器的自适应滤波器,其中作为修正依据的误差信号为理想参考信号与实际输出信号之差。这种滤波器所用之最小均方法只以当前信号误差值为准进行修正,是一种随机梯度下降法。

由于LMS算法只是用以前各时刻的抽头参量等作该时刻数据块估计时的平方误差均方最小的准则,而未用现时刻的抽头参量等来对以往各时刻的数据块作重新估计后的累计平方误差最小的准则,所以LMS算法对非平稳信号的适应性较差。

3.2 递归最小平方滤波器

递归最小二乘(RLS)是以递归方式找到最小化加权线性最小二乘代价函数与输入信号有关的系数自适应滤波器。这与LMS目的在于减少均方根误差的算法不同。在RLS的推导中,输入的信号被视为确定性,而LMS则被视为随机。

RLS根据最小二乘法一次完成算法的参数估计。每取得一次新的观测数据后,就在前次估计结果的基础上,利用新引入的观测数据对前次估计的结果,根据递推算算法进行修正,减少估计误差,从而递推得出新的参数估计值。这样,随着新观测数据的

逐次引入,一次接一次地进行参数估计,直到参数估计值达到满意的精确程度为止。

RLS算法的基本思想是力图使在每个时刻对所有已输入信号而言重估的平方误差的加权和最小,这使得RLS算法对非平稳信号的适应性要好。与LMS算法相比,RLS算法采用时间平均,因此,所得出的最优滤波器依赖于用于计算平均值的样本数,而LMS算法是基于集平均而设计的,因此稳定环境下LMS算法在不同计算条件下的结果是一致的。在性能方面,RLS的收敛速率比LMS要快得多。因此,RLS在收敛速率方面有很大优势。但其计算复杂度高,不便于实时处理。

4 自适应滤波器的应用

4.1 通道辨识

对于一个未知系统,将对未知系统的输入作为自适应滤波器的输入,使用来自未知系统的输出作为自适应滤波器的参考。当误差最小时,此时自适应滤波器就与未知系统具有相近的特性,自适应滤波器用来提供一个在某种意义上能够最好拟合未知装置的线性模型。

4.2 噪声消除

在这类应用中,自适应滤波器以某种意义上的最优化方式消除包含在输出信号中的未知干扰。输出信号用作自适应滤波器的期望响应,信息信号用作滤波器的输入。通过自适应滤波器可以消除输出环境的噪声对信息

信号的干扰,使得输出信号更干净、信噪比更高。

4.3 信号预测

在这类应用中,自适应滤波器的作用是对随机信号的当前值提供某种意义上最好的预测。于是,信号的当前值用作自适应滤波器的期望响应,信号的过去值加到滤波器的输入端。取决于感兴趣的应用,自适应滤波器的输出或估计误差均可作为系统的输出。在第一种情况下,系统作为一个预测器;而在后一种情况下,系统作为预测误差滤波器。

4.4 逆模型

自适应滤波器可以提供一个逆模型,该模型可在某种意义上最好拟合执行装置的特性。理想地,在线性系统的情况下,该逆模型具有等于执行装置转移函数倒数的转移函数,使得二者的组合构成一个理想的传输媒介。使用自适应滤波器建立逆模型,并使用此逆模型来调节输入的驱动信号,使输出产生预期的完全相同的结果。

5 DTMB信号的信道均衡

在数字信号的无线传输中,由于回波或者是多径传输的存在,接收到的信号实际上是多个带有不同功率和相位的版本的信号叠加,这在频域上等同于使信号经过了一个不平坦的滤波器。因此在每一时刻采样的结果中不仅包含有某个特定的符号,还包括相邻一些符号产生的符号间干扰(ISI)。于是在接收机设计的过程中,

必须引入一种技术来减小由于信道不平坦引起的性能下降，就是均衡技术。

聚星仪器利用自适应滤波器技术提供了一个高效的均衡器设计，应用于数字电视（DTMB）的接收解调中，有效地解决了系统的多径效应。

系统的框架如图2，接收机收到

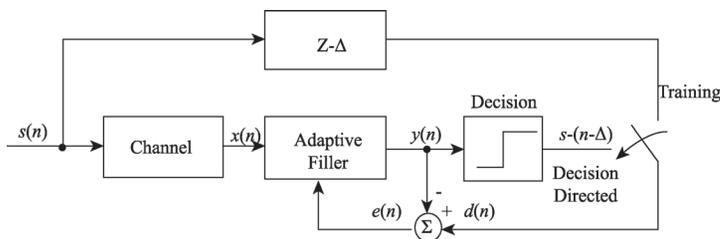


图2 自适应信道均衡实现框图

聚星仪器采用RLS算法对信号作自适应滤波，其收敛速度快。在计算过程中采用对整个帧体数据成块进行均衡，利用矩阵算法降低计算的复杂

度，起到了很好的效果。数字电视的同步序列作为系统的期望(d(n))，将系统的输出y(n)和同步序列进行比较，利用递归最小二乘(RLS)算法对自适应滤波进行回归，从而得到实际传输信道模型的纠正。将有效传输的信息信号应用于该系统上，从而消除多径对解调的影响。

如图3所示为实际接收DTMB信号的多径测量。从图中可以看到，由于室内环境信号反射比较强烈，有4个比

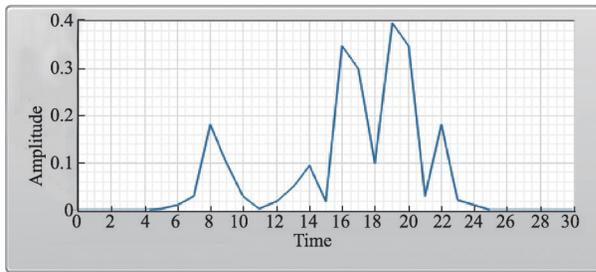
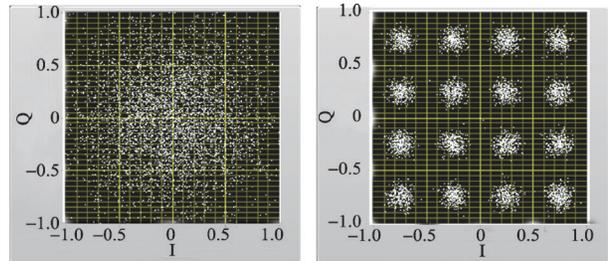


图3 DTMB多径测量结果

较明显多径信号，并且主径从径信号能量接近。

如图4(a)所示，接收DTMB信号直接在星座图上的映射，由于多径的影响，不同时刻的符号会相互干扰，无法对信号进行判决，在星座图上显示就是一堆散点。而在图4(b)中，由于通过自适应滤波作了信道均衡，可以很容易的分辨出信号的星座点进行判决，从而提高DTMB信号接收解调的效果。

从这个例子中可以看到聚星仪器利用自适应滤波器技术开发的均衡器设计，有效地解决了系统的多径效应，很大程度上降低了星座映射的矢量误差(EVM)，并且提高了数字电视接收解调的效果。



(a) 接收DTMB信号直接在星座图上的映射

(b) 信道均衡后的DTMB星座映射

图4 信道均衡前后DTMB星座映射