

自适应时域均衡器分析与仿真

陕西理工学院物理系 井敏英

[摘要] 时域均衡技术是数字基带传输中克服码间串扰的一项重要技术,本文在介绍时域均衡的原理基础上,重点讨论了自适应时域均衡的算法原理,并借助 Matlab 软件编程实现了自适应均衡算法的仿真。

[关键词] 时域均衡 自适应算法 Matlab

0.引言

由于实际信道特性的不理想,在传输过程中总是存在不同程度码间串扰,为此,就需要在接收机中设计一个补偿信道特性的滤波器,使信道和该补偿滤波器的级联总特性接近理想(幅频特性为常数)。补偿滤波器也称为信道均衡器,对于时变无线信道,信道均衡器特性也应该随信道变化而自适应的变化,这种均衡技术称为自适应信道均衡。均衡器可以在频域设计,此时均衡器是使整个系统总的传输特性满足无失真的传输条件,用来校正幅频特性和相频特性,称之为频域均衡。均衡器也可以等价的在时域设计,称之为时域均衡,目标是使得采样点时刻的码间串扰最小。随着数字信号处理技术和超大规模集成电路的发展,时域均衡已成为高速数据传输中所使用的主要方法。

1.时域均衡的原理

时域均衡的最常用方法是在基带信号接收滤波器之后插入一个横向滤波器(或称横截滤波器),它由一条带抽头的延时线构成。抽头间隔等于码元周期,每个抽头的延时信号经加权送到一个相加电路汇总后输出,其形式与有限冲激响应滤波器(FIR)相同,如图1所示:

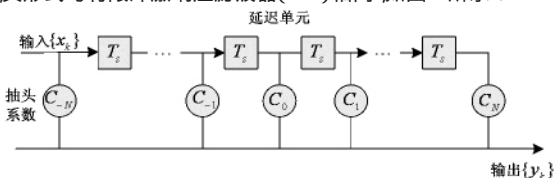


图1 横向滤波器的结构

横向滤波器的相加输出经抽样送往判决电路。每个抽头的加权系数是可变的,设置为可以消除码间串扰的数值。假设有 $2N+1$ 个抽头,加权系数分别为 $C_{-N}, C_{-N+1}, \dots, C_N$, 输入波形的抽样值序列为 $\{x_k\}$, 输出波形的抽样值序列为 $\{y_k\}$, 则有

$$y_k = \sum_{i=-N}^N C_i x_{k-i}, \quad k = -2N, \dots, +2N \quad (1-1)$$

在有限抽头的情况下,经过上述均衡后 y_k 与 x_k 相比,虽然均衡后 y_k 相邻抽样点的码间串扰可以校正为零,但相邻稍远的抽样点却会出现新的相对较小的干扰。产生这种情况的原因是抽头太少,尽管一般来说有限抽头的横向滤波器不可能完全消除串扰,但当抽头数较多时,则可以将串扰减少到相当小的程度。在极限情况下,采用无穷多抽头横向滤波器可以完全消除串扰。

2.自适应算法原理

上述横向滤波器的实现算法有迫零算法和自适应算法,迫零算法一种最简单的实现方法是采用预置式自动均衡,要求在传输实际信息前先发送低重复频率的单脉冲信号,然后按照“迫零”调整原理,调整均衡器系数,调整后再传输数据,在数据传输过程中不再调整。在实际系统中有时不允许在传输信息之前先预置式调整,即使允许预置式调整也不能保证信道在传输期间一成不变。为了在传输信息期间,利用包含在信号中的码间串扰信息自动调整抽头系数,就必须采用自适应均衡。自适应均衡一般按最小均方误差准则来构成。

设发送序列为 $\{a_k\}$, 均衡器输入为 $x(t)$, 均衡后输出的样值序列为 $\{y_k\}$, 此时误差信号为

$$e_k = y_k - a_k \quad (2-1)$$

均方误差定义为

$$\bar{e}^2 = E(y_k - a_k)^2 \quad (2-2)$$

根据式 1-1 得

$$\bar{e}^2 = E\left(\sum_{i=-N}^N C_i x_{k-i} - a_k\right)^2 \quad (2-3)$$

可见,均方误差是各抽头增益的函数。我们期望对于任意的 k , 都应使均方误差最小,故将上式对 C_i 求偏导,有

$$\frac{\partial \bar{e}^2}{\partial C_i} = 2E[e_k x_{k-i}] \quad (2-4)$$

式中 e_k 为误差信号。这里误差的起因包括码间串扰和噪声。

要使均方误差最小,应有 $E[e_k x_{k-i}] = 0$, 这就是要求误差与均衡器输入样值应互不相关。这就是说,抽头增益的调整可以借助对误差和样值乘积的统计平均值。若这个平均值不等于零,则应通过增益调整使其向零值变化,直到使其等于零为止。图2为按最小均方误差算法调整的3抽头自适应均衡器原理框图。

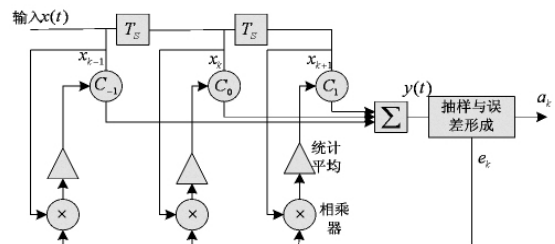


图2 自适应均衡器示例

3.自适应时域均衡器仿真

以 Matlab 编写 m 文件的方式实现信道自适应时域均衡器的仿真模型。仿真条件为:传输码元速率为 1000bps, 滤波器采样频率为 10000Hz, 系统仿真步长为 0.1ms。测试信道设计为多径传输信道,信道噪声为高斯白噪声。假设接收机定时恢复是理想的,定时脉冲边沿对准了眼图张开最大的时刻。3 抽头、5 抽头以及 7 抽头的自适应时域均衡器的仿真结果如图3到图6所示。仿真结果表明,在自适应均衡器收敛的条件下,随着均衡器抽头数增加,均衡输出眼图的会聚程度就越高。汇聚度越高,眼图张开的就越大,允许的噪声容限就越大,系统的性能就越好,所以理论上,在极限情况下,采用无穷多抽头横向滤波器可以完全消除串扰。但是自适应均衡器的收敛与否与抽头系数调整步长以及均衡器的阶数有关系,当抽头初始系数设置不当或者均衡器阶数过高时,有可能导致抽头系数迭代发散。所以应合理选择均衡器的阶数和初始抽头系数调整步长。

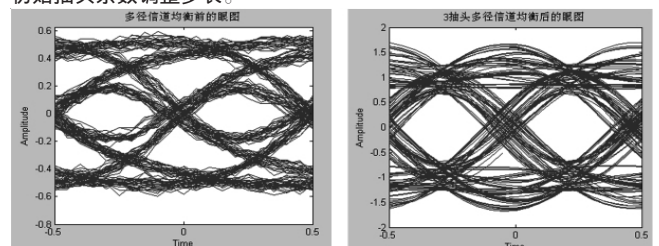


图3 多径信道均衡前的眼图

图4 3抽头多径信道均衡后的眼图

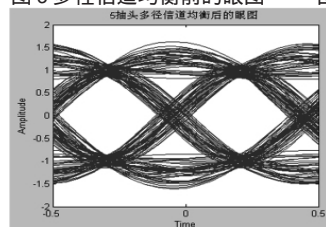


图5 5抽头多径信道均衡后的眼图

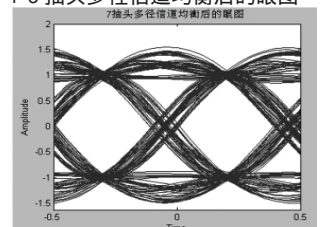


图6 7抽头多径信道均衡后的眼图

4.总结

理论分析和实践表明,最小均方算法比迫零算法的收敛性好,调整时间短。但按这两种算法实现的均衡器,为了克服初始均衡的困难,在数据传输开始前要发一段接收机已知的随机序列,用以对均衡器进行“训练”。有一些场合,如多点通信网络,希望接收机在没有确知训练序列可用的情况下能与接收信号同步,并能调整均衡器。基于不利用训练序列初始调整系数的均衡技术称为自适应或盲均衡。另外,上述均衡器属于线性均衡器,它对于像电话线这样的信道来说性能良好,在无线信道传输中,若信道严重失真造成的码间串扰以致线性均衡器不易处理时,可采用非线性均衡器。

参考文献

- [1] 李白萍. 现代通信理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 117~123.
- [2] 张辉, 曹丽娜. 现代通信原理与技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 126~131.
- [3] 邵玉斌. Matlab/Simulink 通信系统建模与仿真实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 292~298.