

什么是均衡器仿真?

力科眼图医生支持目前最流行的CTLE、FFE、DFE三种均衡器。关于这几种均衡器的理论介绍,可参考一些通信理论书籍,在这里仅作简要介绍。

### CTLE均衡器

Continuous Time Linear Equalization均衡器(简称CTLE)即连续时间线性均衡器,是一种常见的线性均衡器。在最新的USB3.0中使用了CTLE均衡器。USB3.0的速度高达5Gbps,在不久的将来会在计算机、消费电子类产品上广泛应用。由于USB3.0的速度很高,当USB电缆较长时,RX端眼图很可能已闭合,这时分析眼图与抖动是没有意义的。使用力科眼图医生的CTLE均衡仿真后,对均衡后信号测量眼图与抖动指标,可以精确的验证其性能。结合力科的信道仿真功能,直接测量USB3.0的TX,可以迅速评估不同的信道是否需要均衡?或者均衡后的性能指标。

USB的官方组织规定了USB3.0使用的CTLE均衡器的参数,如下图11左上部分为均衡器的频响,右上方的表格是均衡器的参数,下方是力科示波器中集成了USB3.0的均衡器参数,可方便调用。

CTLE均衡器的优点是功耗低、实现起来很简单、不会增大抖动。

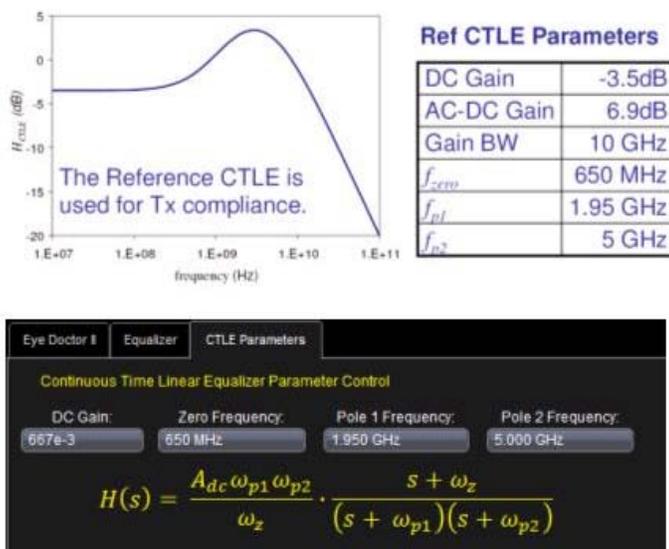


图 11: USB3.0 的 CTLE 均衡器参数设置

图1: USB3.0的CTLE均衡器参数设置

### FFE均衡器

Feed Forward Equalization均衡器(简称FFE)是一种常见的模拟均衡器,如下图12所示,由延迟电路(Delay)、乘法器、加法器组成,延迟电路的时间延迟正好是1个比特, Tap系数(tap level)是每一级乘法器(放大器)的增益,输入信号通过每一级处理后相加得到输出波形,即FFE均衡后的波形。

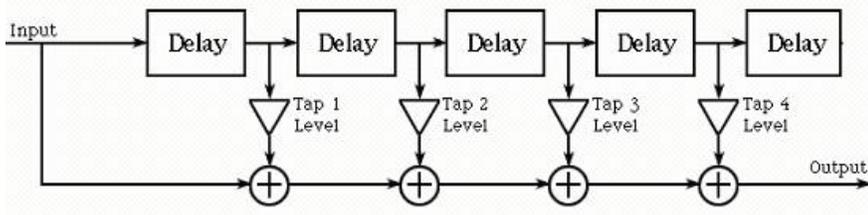


图2: FFE均衡器示意图

如下图13所示为某3阶FFE均衡器（3个tap）的系统简化示意图，输入信号为左上角的红色信号，淡紫色虚线标识的波形是理想的信号波形，由于信道使到达RX的信号恶化，均衡器的输入信号相比理想波形，其幅度较低、上升时间与下降时间较慢。第一、二、三级乘法器的系数分别为 $C1=-0.3$ 、 $C2=1.4$ 、 $C3=-0.5$ 。第二级乘法器的增益为1.4，可以大大提升信号的幅度，其输出波形如下图13粉红色波形；第一级乘法器的系数 $C1=-0.3$ ，产生一个负向的脉冲信号，用于补偿信号的上升沿；第三级乘法器的系数 $C3=-0.5$ ，用于补偿信号的下降沿。三级乘法器的输出相加后的信号为图中的黑色波形，其幅度接近理想信号，上升、下降沿都比均衡器的输入信号更快。FFE的均衡器的响应很像一个高通滤波器。在这个3-tap的FFE均衡器中，第二个乘法器是用于补偿幅度的，由于前面还有一级乘法器，所以称为pre-cursor tap=1的FFE均衡器。在使用力科FFE均衡器参数优化仿真时，需要输入tap的数量和pre-cursor tap的数值，分析软件会自动计算出每个tap的系数。

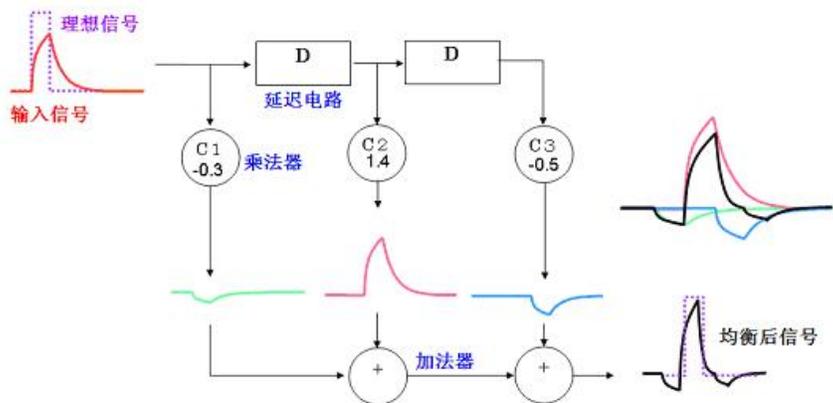


图3: 某3-tap的FFE均衡器的简化示意图

### DFE均衡器

Decision Feedback Equalization均衡器（简称DFE）即判决反馈均衡器，是一种广泛使用的非线性均衡器。在眼图医生的高级模式中可以设置DFE均衡器的参数，也可以自动优化出DFE均衡器的参数。如下图14所示为某3-tap的DFE均衡器的示意图。DFE均衡器中包括了延时电路、乘法器和加法器，和FFE均衡器有些相似。不过DFE的反馈回的信号是二进制信号，而FFE反馈的是模拟信号。在DFE均衡器仿真时，只需在眼图医生中输入tap的数值，分析软件会自动计算出每个tap的系数。

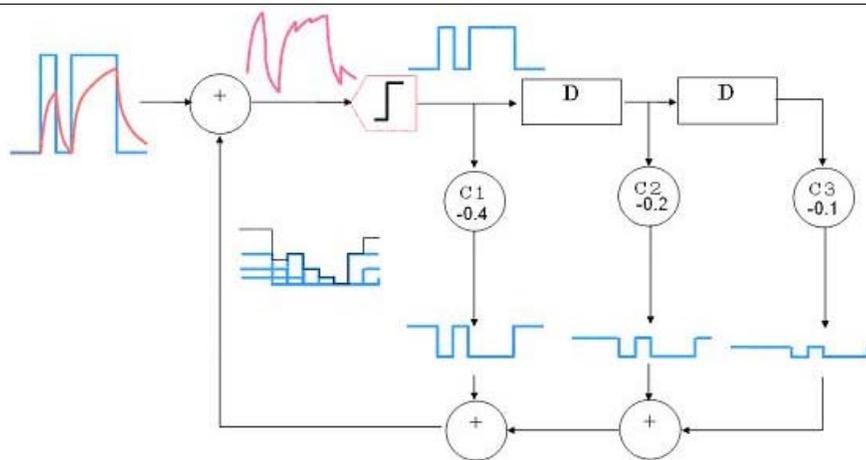


图4: 某3-tap的DFE均衡器的简化示意图

DFE不会放大噪声与串扰，易于实现，在高速收发器芯片中非常流行。比如Altera和Xilinx的某些FPGA的收发器就集成了DFE和CTLE。

#### 均衡器仿真的作用

对于5Gbps以上的串行链路，RX端通常使用了均衡器，如果用示波器在RX端测量，只能得到未均衡的信号，可能其眼图已闭合，无法从物理层的测试手段验证接收端的性能。使用均衡器仿真后，可以计算出均衡后的波形、眼图和抖动，能进一步验证真正的接收端的电气特性。

另外，对于高速收发器芯片厂商，使用力科的均衡器仿真，可以预估某信道最适合的均衡器以及相关参数。大大加快了芯片的设计与验证速度。

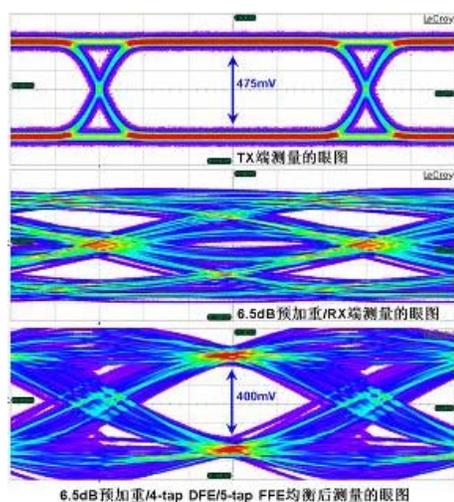


图5: 某8.5Gbps驱动24英寸传输线的均衡器优化

在图15中，最上面的眼图是直接测量某8.5Gbps信号的眼图；中间的眼图是TX端做了6.5dB预加重后，通过24英寸微带线的PCB后在RX端测量的眼图，可见眼图已闭合；在下方的眼图是接受端使用4-tap的DFE和5-tap的FFE后测量的眼图，可见通过RX端均衡后，眼高达到400mV，信号质量得到很大的改善。

#### 结语

眼图医生提供了高速串行链路的发送端、信道、接收端的全方位的仿真与分析能力，改变了传统的高速串行设计的研发与调试方

式。配合力科30GHz带宽的实时示波器SDA830Zi, 可以实现当前流行的10G信号的信道仿真、均衡仿真、以及全面的测量与分析。