通过眼图和BER测试分析高速串行链路的信号质量

Zeeshawn Shameem

无论是连接客户端路由器的千兆以太网接口，还是输出到显示器的低电压差分高清视频信号，在高速串行链路上获得无误码数据是一个巨大挑战。从用户角度看，衡量数字通信系统的基本指标是误码率（BER），它从统计学角度提供了一个评估整体系统失真度的指标，但有效的BER测试非常复杂，是一件成本极其高昂的工作。BER测试对于用户很有用，但对工程师查找出错原因毫无帮助。眼图对于数字通信/网络工程师而言已经成为不可或缺的工具，特别是在数字示波器商用化以后。眼图相对于BER测试的显著优势是能够发现问题的根源并进行改善。

眼图测试

早期使用模拟示波器时，工程师利用不同的输入信号描述抖动变化。目前的数字示波器增加了附加功能可完成这一测试。Tektronix的CSA8000可以设置采样时间长度，产生时间抖动和幅度变化的直方图，列出每个参数的统计数据，如均值、中值和方差。简而言之，它能提供足够的数据估算BER，CSA8000提供的规一化统计数据为高斯函数。

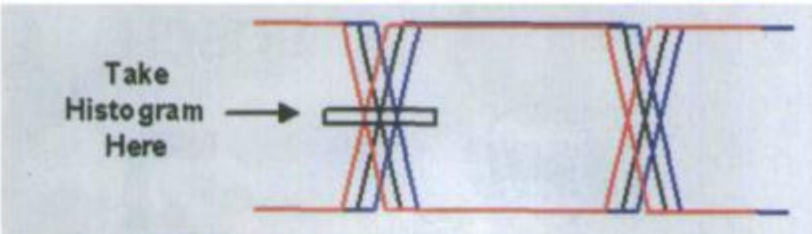

图1．跳变点的变化产生时间抖动。

对于没有时序抖动的通道来说，每个间隔采样值的跳变点发生在同一时刻。但是，由于存在抖动，跳变点会发生变化（图1）。抖动包括随机性抖动（RJ）和确定性抖动（DJ）。随机性抖动没有限制，可以用高斯随机变量描述。产生确定性抖动的原因有很多，而且是有限的。图1直方图是对总体抖动（TJ）的测量，它是随机性抖动和确定性抖动之和（TJ = RJ + DJ）。

可以采用不同技术分离抖动的随机成分，也可以部分地估算BER。估算BER时要考虑随机抖动和确定抖动。但是，利用眼图无法达到BER的测试精度，不能完全取代BER测试。

利用眼图估计BER

张开的眼图说明数据失码率较低，系统运行正常。所以，理想眼图每次触发的采样值的跳变点发生在同一时刻。功能上，可以用理想的脉冲描述这些要求（图2）。随机抖动会导致跳变点随时间变化，可以用随机变量表示。最通用的随机

抖动模型是高斯函数，实际系统可以用高斯分布很好地建模，高斯随机变量在数学角度也很容易理解，很多数字示波器（CSA8000）提供高斯统计功能。

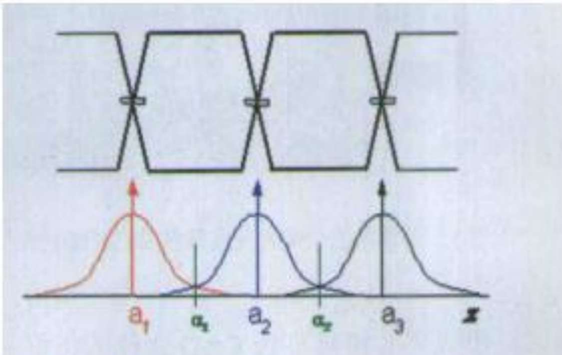

图 2. 高斯分布的抖动。

由于存在抖动，跳变点可以用概率函数表示，例如用高斯概率密度表示（图 2）。另一种方法是可以用高斯随机变量对采样点建模，得到条件误码概率，两种方法给出的答案相同，图 2 中 a2 的概率密度函数是：

$$p(z=a_2)=\int_{\alpha_1}^{\alpha_2}\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-a_2}{\sigma}\right)^2\right] \quad (1)$$

a2 是跳变点的平均值，z 是随机变量，σ 为方差或 RMS 值。为了得到随机变量没有误码的概率，对（1）进行积分。误码概率即是曲线下面的区域。这个区域代表 a2 的采样结果是 a1 或 a3，或者是 a1 和 a3 的跳变点被采样为 a2。

随机变量 a2 在曲线下方的面积是：

$$p(z=a_3\mid a_2)=\int_{\alpha}\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-a_2}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2)$$

和

$$p(z=a_1\mid a_2)=\int^{\alpha_1}\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-a_2}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3)$$

总的误码概率是两个等式之和再乘以 2，因为条件概率与 a1 和 a3 相关，假设 a2 的条件概率对称。

$$p_{TOTAL} = [p(z = a_1 | a_2) + p(z = a_3 | a_2)] \times 2 \qquad (4)$$

为了得到 a2 的误码概率，从 a1 到无穷大、从 a0 到负的无穷大对（4）进行积分。考虑到对称性，可以简化得到（5）。

$$p(z \neq a_2) = 4 * \int_{a_2}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - a_2}{\sigma}\right)^2\right]$$

求解（5）实际上对该式求解并无必要，CSA8000 的直方图可以按照高斯随机变量提供规一化的统计数据。高斯统计数据只需要两个参量：均值和方差，方便易用。一般情况下，可以设置均值为零，这样就剩下一个参量。

方差代表随机抖动，如果希望将随机抖动与确定性抖动分离开，必须给系统输入一个已知模板，然后对采样值区平均后消除随机抖动。假设噪声和随机抖动表现为零均值的高斯随机分布，对采样值取平均后能够消除随机抖动，剩下的只有确定性抖动。然后，可以修改包括确定性抖动的方差，用新的方差估算 BER。

得到方差后，可以计算从均值到下一个采样间隔之间 z 值的方差，统计函数提供了偏离均值的概率。由于按指数函数衰减，6σ 给出的误码概率接近 10 亿分之一，7σ 给出的误码概率接近 1 万亿分之一。如果没有 σ 表格，则可以在适当的限制条件下求解式（5）。