

抖动与相位噪音

抖动与相位噪音的基础知识

【序文】

近年，伴随影像传输等普及，骨干网中流过的通信量有增无减，通信的高速、大容量化进展迅速。在这种情况下，高速化通信基础设施对高频且输出信号稳定的基准信号源的需求十分强烈。抖动（Jitter）是评估输出信号波形稳定性的指标之一。英语的“Jitter”有神经过敏、紧张不安或激动的意思。在表现高频石英振荡器的稳定度时，指传送数字信号时波形中产生的时间偏差和晃动。本次说明有关抖动和相位噪音的基础知识。

【1】通信设备的重要指标——抖动

用示波器观察数字信号的波形，有时可以发现本应以单一周期振荡的波形亮线很宽。这种波形拉宽就是抖动。

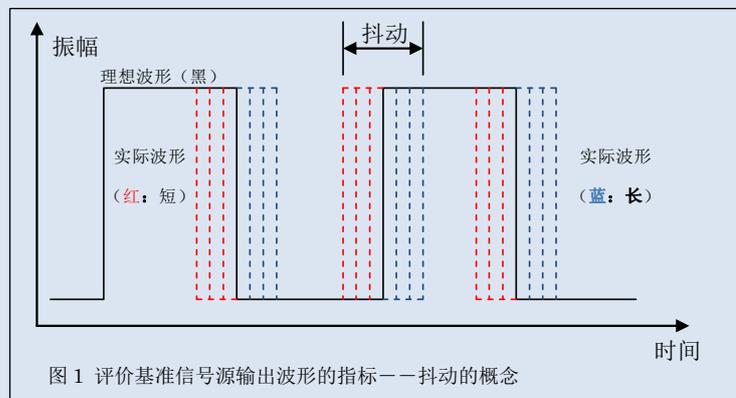


图 1 表示在一个周期单位中出现了几种周期的信号波形的情况。理想波形以单一周期反复出现，但实际波形的一部分周期变短（红色）或变长（蓝色）。

抖动因读取电子信号元器件的极微小的不稳定或信号传输途中的不良影响等原因而产生。抖动过大将造成相邻信号之间相互干扰，在传送影像和音乐信号时将导致影像质量和音质的劣化。如上所述，抖动表示数字信号在时域上的晃动，但抖动的种类不限于一种。抖动随时间而精微变化，对时间的变化模式也有多种多样，因此难以用一个参数来评价抖动。

【2】有关抖动种类的说明

- 周期抖动（峰峰值）：表示一周期中的偏差幅度（最大和最小之差）的抖动
- 标准差：表示偏差程度的标准偏差
- 随机抖动：自然产生的无法预测的抖动
- 确定性抖动：因电路、电磁感应或外界环境等因素而引起的抖动
- 累加抖动（长期抖动）：时钟各周期的连续偏差

本公司在测试时使用的是 Wavcrest 公司制造的“DTS-2075”测试仪，测试条件是使用基本无噪音的电源、探针测试点为输出端、输出电阻设定为 50ohm。

图 2 的横轴表示一个周期（皮秒），本测试用直方图表示了 50000 次随机抽选的周期离差。这是 SG-8002CA 125MHz PCB 的数据。最理想的是在 125MHz 的一周期处出现一个波峰，但由于各种因素致使特性出现变化。PLL 尤其容易出现右图所示的倾向，因此重要的是如何正确理解该特性并反映到设计中去。

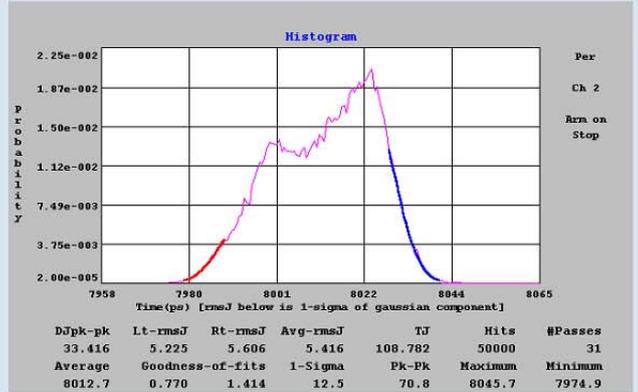


图 2：数据的直方图

(1) 周期抖动（峰峰值抖动）

周期抖动显示离差的幅度，本公司用峰峰值来表示这个离差。上图中最长周期和最短周期之差就是峰峰值抖动。

(2) 标准差抖动（1 标准差）

标准差抖动是从上述测试结果得出的标准差（ 1σ ）。由此可以得知 12.5ps 中的发生概率为 68.26%。

但是，峰峰值抖动只显示了通常情况下长时间使用的石英产品的极小部分的状态（几毫秒），并不能显示抖动整体；标准差抖动仅在理想的正态分布（又名高斯分布）下有效，在其它的分布下数值的可靠性非常低。为此确立了把测试得到的直方图划分为两个成份，以此捕捉抖动整体状态的分析方法。

(3) 随机抖动（RJ）

随机抖动表示无法预测的抖动成份，名副其实。它受元器件自身的特性、热噪音等因素的影响而自然产生。因此，设定直方图中存在理想的正态分布，并从抖动实际测试所得到的直方图，根据曲线的上升、下降边界的曲线拟合来预测。而且，随机抖动用标准差来表示，经常使用“左侧的 RJ”或“右侧的 RJ”的表现方式。

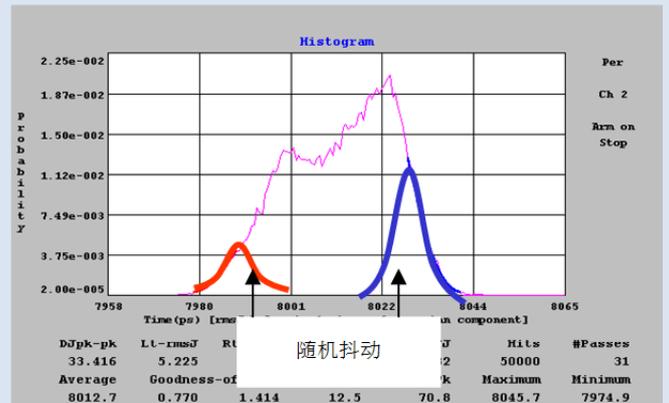


图 3：关于随机抖动的说明

(4) 确定性抖动（DJ）

确定性抖动因电路设计、电磁感应或外界因素而产生。

在实际测试结果中，它可以用夹在左右随机抖动中间的部分来表示。

汇总以上抖动的观点，可以得出由自然产生的随机抖动和人为因素产生的确定性抖动构成一周期中的抖动成份整体。

减少抖动即等于如何尽量减少确定性抖动，将确定性抖动成份最佳化就能使左右的随机抖动之间相互重合，实现理想的正态分布。

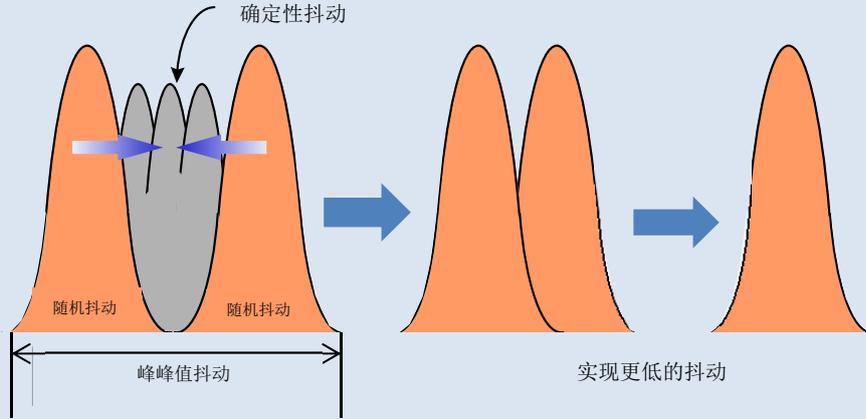


图 4: 关于确定性抖动的说明

(5) 累加抖动 (长期抖动)

以上说明的抖动均以一周期为标准，对其离差进行了测试，但有些抖动不能仅由此来表现。

这就是累加抖动。

累加抖动不仅表示一周期的离差，还表示二周期、三周期等多周期连续波形的离差，以右示图表来表示。

图表的横轴表示测试的周期数，竖轴表示各周期的 1 标准差。观察累加抖动可以确认持续几个周期的抖动的变化状态。周期累加的抖动从某一周期起 1 标准差呈现收缩的倾向。我们能够以此判断 PLL 电路的带宽和过度响应特性。

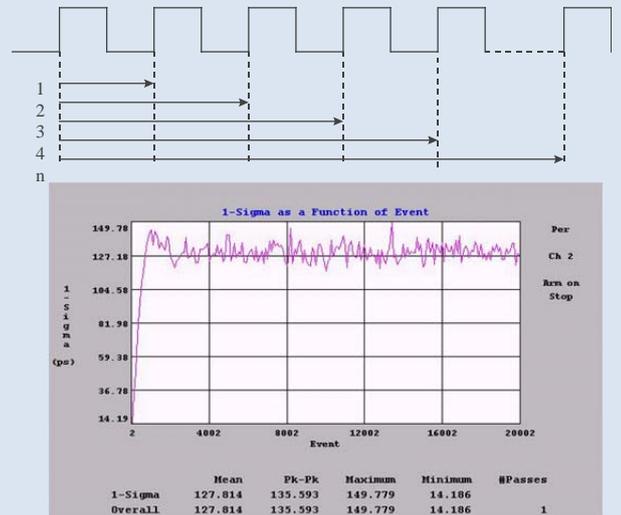


图 5: 关于累加抖动的说明

[3] 振荡器的输出与抖动的关系

石英振荡器除了输出应起振的频率以外，还输出频率分量。

从图 6 所示的石英振荡器输出信号频率特性可以看到基本频率周围所存在的其它频率的“裙摆”。这是因随机信号而引起的相位调制，即因噪音源调制振荡器而产生的，通常被称为“相位噪音”。这些频率大多高于本底噪音，并出现在载波频率附近。噪音可用以下算式表示：

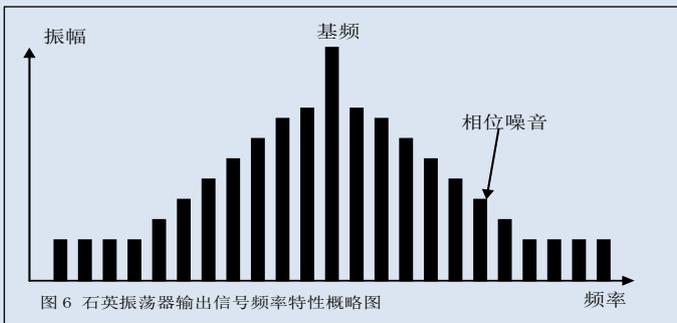


图 6 石英振荡器输出信号频率特性概略图

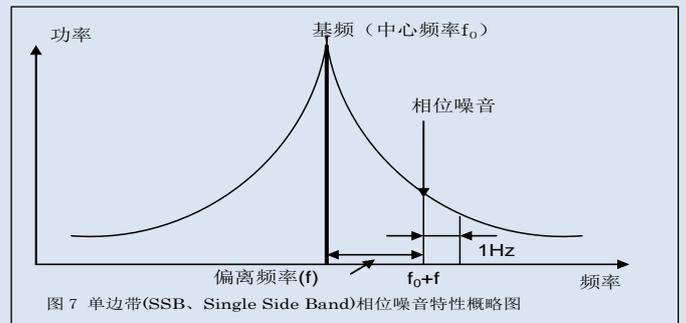


图 7 单边带(SSB、Single Side Band)相位噪音特性概略图

理想的信号 $V(t) = A \times \sin 2\pi f_0 t$... 算式(1)

实际的信号 $V(t) = (A + E(t))\sin(2\pi f_0 t + \varphi(t))$... 算式(2)

这里的 $E(t)$ 表示振幅的变化（振幅噪音）， $\phi(t)$ 表示相位的变化（相位噪音）。 $\phi(t)$ 是相位噪音。相位噪音通常定义为偏离载波的偏离频率的噪声功率和载波功率之比。所有相位噪音均成为抖动。

一般情况下用“单边带（SSB、Single side Band 之略）相位噪音 $L(f)$ ”表现相位噪音。 $L(f)$ 是偏离频率 f 的函数，单位是 dBc/Hz 。用相位变化而造成的单边带功率来定义，是偏离载波频率 $f\text{Hz}$ 频率的 1Hz 频带宽的电气信号总功率（图 7）可用以下算式来表现：

$$L(f) = (\text{中心频率} + f\text{Hz}) \text{ 1Hz 频带宽的功率/电气信号总功率} \quad \dots \text{ 算式(3)}$$

$L(f)$ 是噪音，所以必须折算成 1Hz 单位才能进行比较。若把测试相位噪音时的测定频带宽设定为 A ，则可用测试得出的相位噪音除以 A 来算出 $L(f)$ 。例如，测试频带宽为 1kHz ，测试结果为 -70dBc ，可以得出 -70dBc 、 -30dB ，得到 -100dBc/Hz 的结论。 1Hz 是 1kHz 的 $1/1000$ ，所以频带宽的平均输出也为 $1/1000$ ($=-30\text{dB}$)。 dBc/Hz 是表示相位噪音的标准单位。

相位噪音除了产生于石英振荡电路的以外，如果使用了 PLL 电路，也会因起源于各电路部分、噪音成分或环路特性的噪音而产生。相位噪音表示信号相位的晃动。因此，以时间变化来观测就可以看到先前说明的波形抖动。

【4】相位抖动

和抖动一起表示信号的稳定性，相互有关。具体来说，相位噪音表现在频率领域中的频率不稳定，而抖动则表示在时间领域中的信号波形的晃动。

与前述同样，横轴表示偏离频率，竖轴表示相位噪音。该相位噪音的积分值（图 8 的网点部分）就是属于随机抖动的相位抖动。

通过计算特定偏离频率范围的积分，便能获得具有特定频率范围成份的相位抖动值。

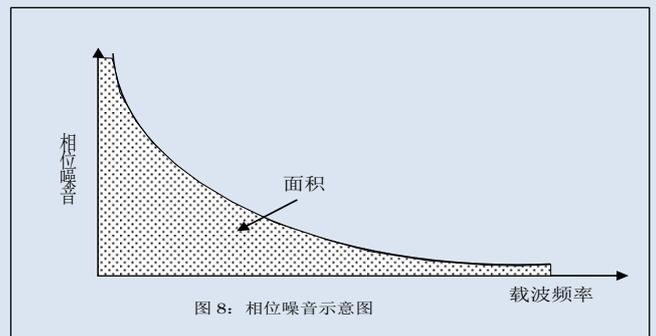


图 8：相位噪音示意图

市场要求石英元器件具有各种应用特性。包括之前介绍的抖动和噪音的特性在内，爱普生将不断提供满足客户需求的石英元器件产品。