

相位噪声的时域测量方法

胡为东
美国力科公司

【摘要】相位噪声主要是衡量因信号的相位变化而带来的噪声，在频域中表现为噪声的频谱，在时域中又表现为信号边沿位置的抖动，因此在实际应用中，相位噪声和信号的抖动其实本质是相同的。本文就将对相位噪声以及时间间隔误差（TIE，Time Interval Error）抖动，也叫相位抖动的概念及相互关系做一简要介绍，并详细介绍了使用力科示波器如何测量TIE抖动并将其转换为相位噪声的。

【关键词】力科；相位噪声；TIE 抖动

1 相位噪声的基本概念

一个时钟信号或者一个时钟信号的一次谐波可以用一个如下的正弦波形来表示，见图1。其中 f_c 为时钟频率为初始相位，如果 θ_n 为常数，那么 $S_m(t)$ 的傅里叶变换频谱图应该为一条谱线，如图1中的左图所示。但是如果 θ_n 发生变化，则原本规则的周期正弦信号在变化的过程中将会出现拐点，且频谱也将变得不仅仅是一条谱线，而是可能由分布在时钟频率周围的很多条谱线构成的更为复杂的频谱图，如图1中的右图所示。其中频谱波形在 f_c 附近多出的谱线即为相位噪声谱（或者叫做相位抖动谱）。因为初始

相位的变化而引起的噪声称为相位噪声，因此对于一个正弦时钟信号或者时钟信号的一次谐波来说， θ_n 在理论上应该是为零的，此时上述公式中的 θ_n 则完全为相位噪声成分。

为了更为精确的描述相位噪声，通常定义其为在某一给定偏移频率处的dBc/Hz值，其中，dBc是以dB为单位的该频率处功率与总功率的比值。如一个振荡器在某一偏移频率处的相位噪声定义为在该频率处1 Hz带宽内的信号功率与信号的总功率比值，即在fm频率处1 Hz范围内的面积与整个

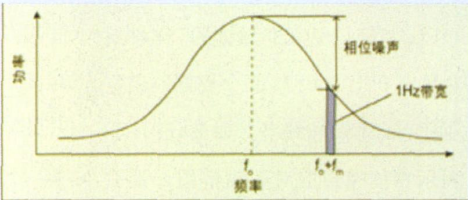


图2 相位噪声的基本定义
噪声频下的所有面积之比，如图2所示。

2 TIE抖动的基本概念及其与相位噪声的关系

TIE是指信号的实际边沿与其理想边沿之间的偏差，理想边沿可以为固定频率信号的边沿位置，如100MHz杂的信号，那么上升边沿位置就固定在10 ns的整数倍位置处；也可以通过CDR（时钟数据恢复）的方法恢复出的时钟作为理想时钟。如下图3所示，实际时钟信号的每一个实际边沿位置与理想时钟的边沿位置都会做一个比较，它们之间的差值就叫做TIE抖动。

如果仔细考虑下TIE抖动参数的定义，会不难发现其实TIE抖动参数也恰恰反映了信号在阈值交叉电平处

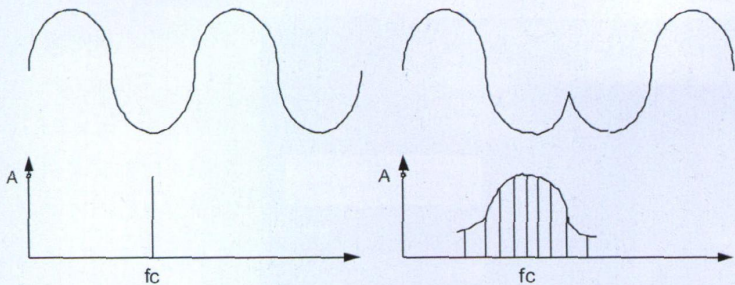


图1 正弦信号的频谱（无相位变化以及有相位变化的可能情形）

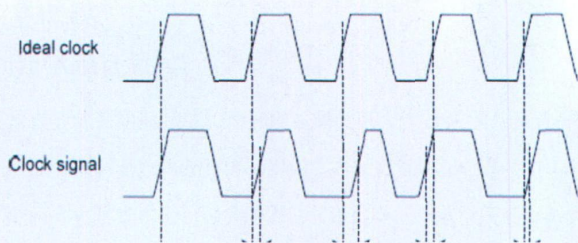


图3 TIE抖动参数的测量方法

的相位的变化。TIE参数和 θ_n 是可以相互转化的,如果用公式表示即为:

$TIE(i) = \theta_n(i, T_c) / 2\pi f_c$, 其中 $TIE(i)$ 为第 i 个边沿位置处的TIE抖动参数; $\theta_n(i, T_c)$ 为第 i 个周期的相位变化; f_c 为信号频率。如果以 $PN(f)$ 表示相位噪声的对数频谱图,那么将上式等式两边分别做FFT及对数运算,则可以得到 $PN(f) = 20 \log_{10} [2\pi \cdot f_c \cdot F(TIE)]$, 其中 $F(TIE)$ 为TIE序列的FFT变换并归一化到1Hz。

同样结合RMS的计算公式以及数据的转化关系可推导出某一频段范围内的RMS抖动值和TIE频谱的关系如下:

RMS Jitter (某一频段内)

$$\sqrt{\frac{2 \int_{f_1}^{f_2} (10 \frac{PN(f)}{10}) \cdot |H(f)|^2 \cdot df}{2\pi f_c}}$$

$$\sqrt{2 \int_{f_1}^{f_2} |F(TIE)|^2 \cdot |H(f)|^2 \cdot df}$$

其中 $H(f)$ 为抖动滤波响应系数(注:上述公式均是针对于双边带信号,下文的相位噪声测量示例是基于单边带信号)。

3 基于示波器的相位噪声测量方法

根据上文的分析,相位噪声是指

信号相位的随机性波动的功率谱密度,在频域里相位噪声通常被表达为dBc/Hz。如果信号的相位噪声值非常小,那么则需

要使用具有高动态范围的频域仪器进行测量,才能得到较好的结果。如果信号的相位噪声在-70 dBc(或者结合平均方法为-80 dBc)以上,则可以选择使用示波器进行测试。目前测量相位噪声主要有三种仪器,一是频谱仪,二是示波器,三是专用的相位噪声分析仪。频谱仪中通常具有相位噪声的测试项,可以从信号频谱上测量出相位噪声的值并进行适当的修正即可,测试原理即为测试某一指定偏移频率处的功率电平

(10 Hz带宽内)与载波总功率电平的比值;使用示波器进行相位噪声的

测量则是在时域里先测试出抖动,然后再将抖动值按照上述提到的相位噪声与抖动的转换关系转换得到;由于示波器和频谱仪的动态范围有限,因此对于很小的相位噪声很难测试得非常准确。因此如果需要准确的测试比较小的相位噪声时,则可以选用专门测试相位噪声的相位噪声测试仪。

下面为使用力科示波器对相位噪声的测量方法及步骤:

Step1: 在示波器的Timebase”

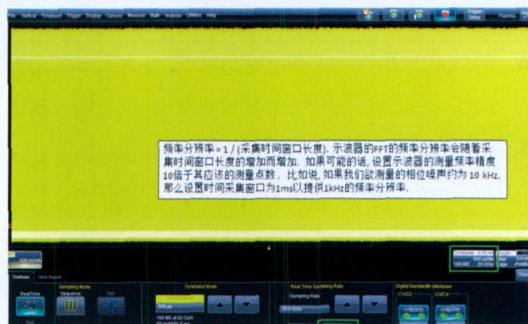


图5 使用力科示波器测量相位噪声步骤2

按钮中选择“Fixed Sample Rate”,并设置一个合理的采样率以确保在信号边沿上采集到足够多的样本点,如图4所示。

Step2: 设置示波器的最小采集窗口时间至少为1ms,这将在FFT频谱中提供1 KHz的频

率分辨率。时间窗口越长,FFT频谱的频率分辨率越高(比如说5 ms的采集时间窗口将得到200 Hz的FFT频谱分辨率),如图5所示。

Step3: 对于204.8 MHz的时

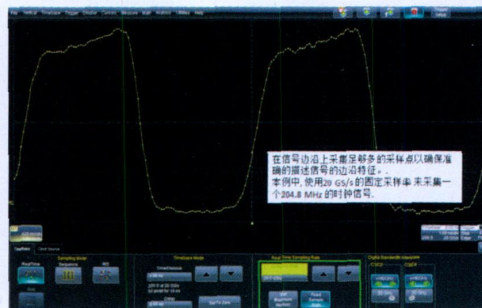


图4 使用力科示波器测量相位噪声步骤1

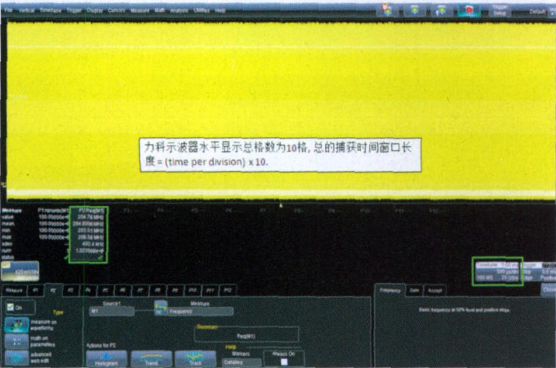


图6 使用力科示波器测量相位噪声步骤3

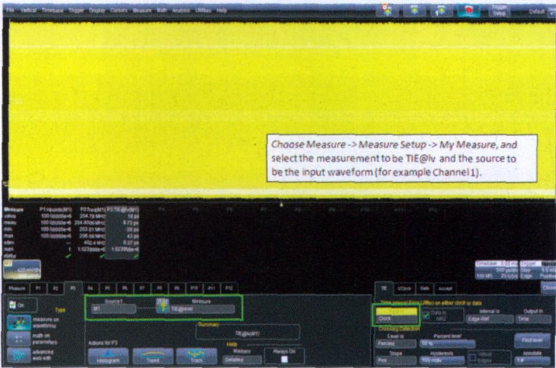


图7 使用力科示波器测量相位噪声步骤4

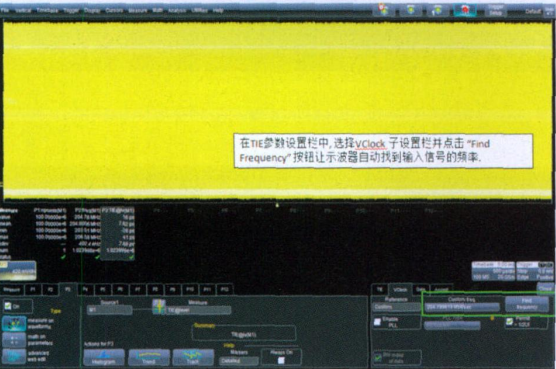


图8 使用力科示波器测量相位噪声步骤5

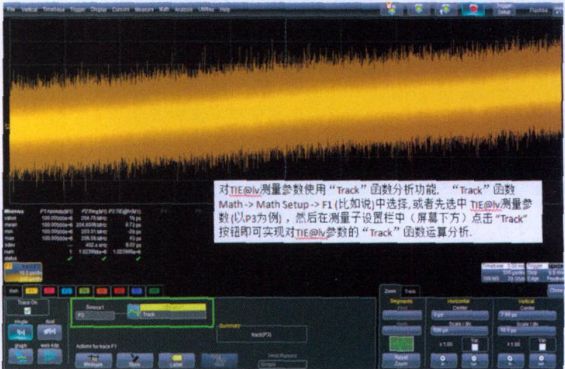


图9 使用力科示波器测量相位噪声步骤6

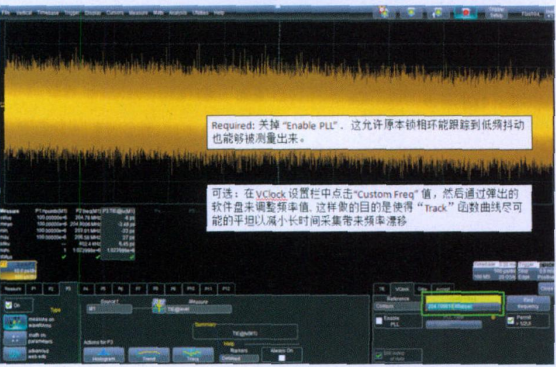


图10 使用力科示波器测量相位噪声步骤7

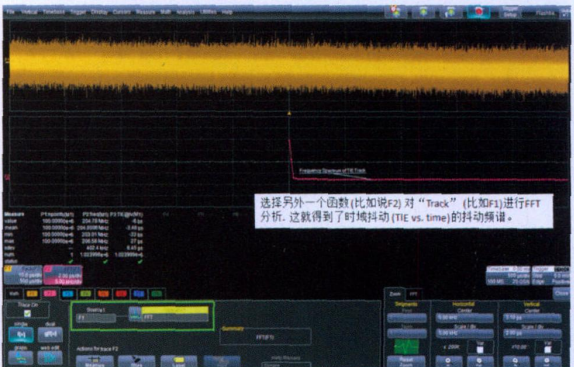


图11 使用力科示波器测量相位噪声步骤8

钟信号, 为了获得一个很大的捕获时间窗口, 我们采集了100 M的采样点数, 获得5 ms的捕获时间窗口, 如图6所示。

Step4: 测量时钟波形的TIE抖动。设置输入源为时钟, 如图7所示。

Step5: 在TIE参数设置栏里的VClock中选择“Find Frequency”, 如图8所示。

Step6: 对TIE测量参数进行“Track”函数分析, 如图9所示。

Step7: 关掉 PLL并适当微调

“Customer Frequency”以获得“Track”函数曲线的最大平坦度, 如图10所示。

Step8: 对Track曲线进行FFT分析, 如图11所示。

Step9: 选择FFT参数设置中的

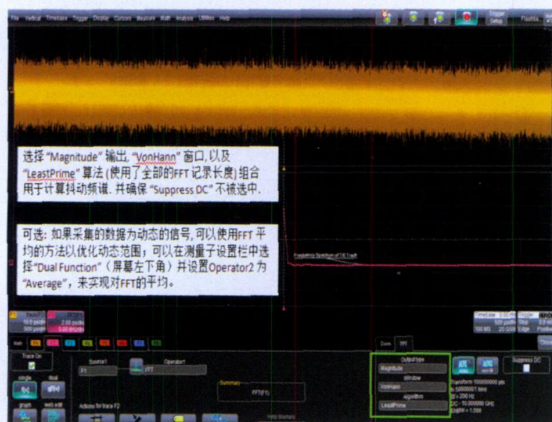


图12 使用力科示波器测量相位噪声步骤9

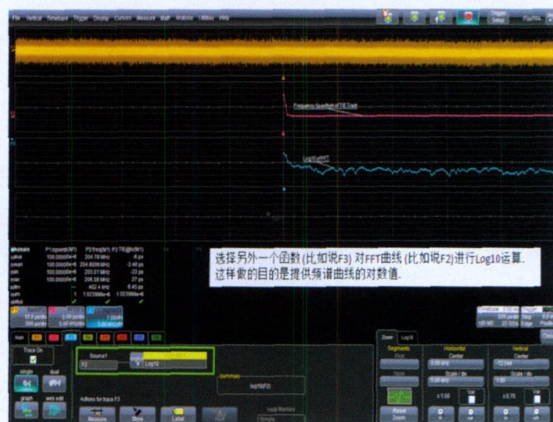


图13 使用力科示波器测量相位噪声步骤10



图14 使用力科示波器测量相位噪声步骤11

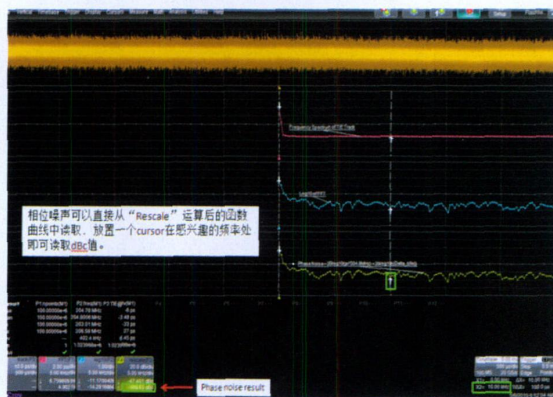


图15 使用力科示波器测量相位噪声步骤12

“Magnitude”、“VonHann”、“LeastPrime”，并去掉“Suppress DC”选择，如图12所示。

Step10：对抖动的FFT进行Log10运算，如图13所示。

Step11：在“Rescale”运算设置中，选择乘以“20”，然后通过下述公式决定需要增加的常数： $20\log_{10}(\pi \cdot \text{carrier frequency})$ 。在本例

中， $20\log_{10}(643398175) = 176$ ，在“Rescale”运算设置中输入该数值，如图14所示。

Step12：使用一个光标放置在相应的相位噪声偏移频率（比如10kHz）位置并直接从F4曲线中读出cursor对应的以DBC为单位的相位噪声值。如本例中的10kHz的相位噪声

为-109.63 dBc，如图15所示。

4 结束语

本文简要介绍了相位噪声及其TIE抖动的概念及其相互转换关系，并重点介绍了基于力科示波器是如何测量出TIE抖动并将抖动参数转换为相位噪声的。