



示波器进行频率分析付诸实践

从技术层面讲，吉他弦、音频放大器、滤波器或旋转轴是同一个东西——信号源，它们含有大量的信息。在时间信号的示波分析和解释中，需要对频率内容进行解码，这样有利于对机械和电气部件的研发、优化和品质评估。在频率转换这个过程中，快速傅立叶变换（FFT）是一种重要的手段。下文将重点论述以下问题：对连续和非连续时间信号 FFT 这种方法有什么意义？其潜在的用途是什么？需要考虑哪些误差来源？

通过 FFT 进行频率分析，是把所有关于时间的信号离散到各自的频率。如果是周期信号，只要至少一个周期的信号完全被捕获，FFT 就能分析一个完整的频谱；在理论上，非周期信号也必须完全被捕获，以保证清晰的结果。然而，实际上这不可能做到，这就是为什么许多现代[示波器制造商](#)提供有用的功能来支持频谱分析的原因。

从汽车到抖动

需要进行与频率相关的分析，电气工程不是其应用的唯一领域：它也广泛用于汽车工业、能源供应或机械和制造工程，用来优化旋转部件或检查磨损程度。在电气工程，确定抖动滤波器传递函数或评估音频放大器失真都是典型的应用。由于滤波抖动通常用示波器的 XY 函数来测量，关于示波器 XY 函数测量此处不会进一步详细讨论。然而，在较低的频率范围，示波器 FFT 功能提供了一个替代解决方案。如果不长期要求有较好的测量精度和频率稳定度，其功能还是很有价值的；许多[传统的频谱分析仪](#)，甚至无法提供类似的结果，因为它们很难进行低频范围测量。惠美 [HMO2000 系列示波器](#)，是一款在示波器 XY 函数时域测量的基础上，具有高性能 FFT 频域测试的多功能示波器，下面所示的屏幕截图会很有意义：通过激活包络曲线，以单一简单步骤，就可配置进行整个频率分析。



情况 1：周期信号

由于元件的非线性特性曲线，即使高品质的音频放大器也会导致输入信号失真，畸变因子作为一个参数来量化失真。如今，数字测量桥通常用来确定畸变因子。这些测量桥由一个产生本振的信号发生器、被测器件（DUT）和 FFT 分析仪组成。此方面现代示波器具有明显的竞争优势：它们覆盖明显较宽的频带、允许在兆赫范围内测试。这确保了畸变系数的定义不仅仅只限于音频范围，也可测试其它信号放大器。无论使用的仪器如何，最终获得的频谱会显示各次谐波和畸变因子的有效值。



通常情况下，输入信号的失真，不能用肉眼检测，例如：显示在图 1 中的正弦信号，其频率为 1MHz、幅度为 1 V，一眼看上去似乎无失真。只有频谱图（图 2）清楚地显示了附加的谐波，其为基波频率倍数的谐波振荡，在主信号 1MHz 基波频率紧随有幅度逐步降低的 2、3 和 4MHz 附加的高频谐波。

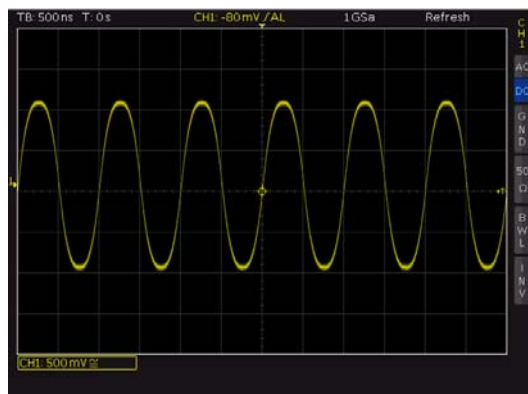


图 1 看上去无失真的正弦信号 (1MHz/1 V)

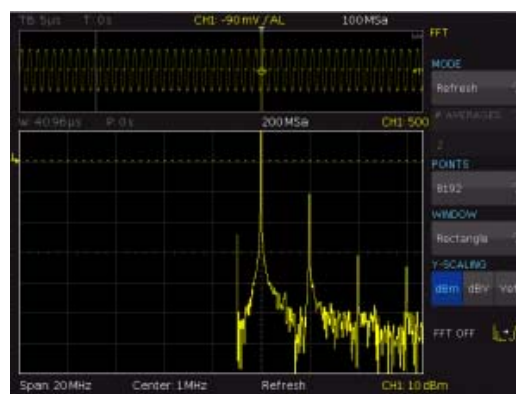


图 2: 信号失真的频谱

情况 2: 非连续信号

如果是非周期性输入信号情况会怎样？大多数仪器会提供选项来触发频谱，仅仅在合适的时刻捕获它，在稍后的时间进入“停止”模式。然而，在这一点上，很多带 FFT 功能的示波器计算频谱仅只有一次，并将结果存储在存储器中，该基本时间信号将不再用于计算，因此，就不再可能对信号的所有部分进行计算。

惠美 [HMO 系列示波器](#) 与此不同：既然 FFT 以前存储的信号还有用，通过一个可调节的窗口宽度，以单次模式或停止模式捕获的这些信号部分，随后对它们进行分析就非常有用。图 3 为非周期信号曲线。

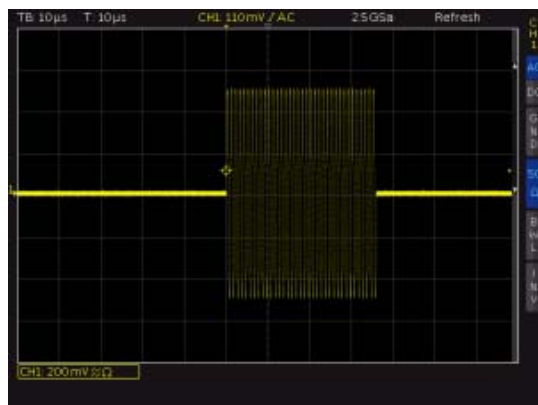


图 3 非周期信号 (f=1MHz 和 36 周期)

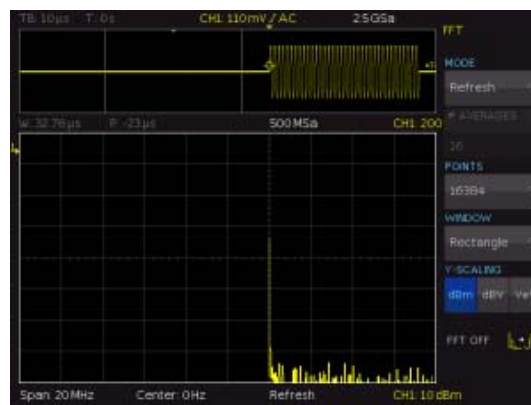


图 4 测量窗口放在正弦脉冲外面 (2 根白色的垂直线)

为了方便分析，首先把测量窗口（图 4 显示的上部）放到正弦脉冲外面。因为测量窗口内没有信号，屏幕下部的频谱图显示本地噪声。如果测量窗口往右移动，一直移到完全覆盖正弦波，游标指示频率为 1MHz（图 5），与无谱线相比，其谱线明显突出。

如果测量窗口往左移，使测量窗口一半覆盖零点线和另一半覆盖正弦脉冲，半窗口频谱见图 6 的黄色线。1MHz 谱线左右侧边的出现，在零点线和正弦周期之间会导致硬限制影响。按照显示的步骤，信号被存储在存储器（停止模式激活），通过选定的窗口，FFT 会不断重新计算频谱，该特征使用户能按时间顺序递进分析频谱实时线。



最后的图作为另一个实验的基础：多窗口如何影响频谱？所有以前的例子，使用的是矩形窗。虽然矩形窗（Rectangular）以很高的准确度来捕获频率，但也伴随更多的噪音。抑制这种干扰一个更好的方法是使用汉宁窗（Hanning），它对频谱的正面影响立即可见（图7）。

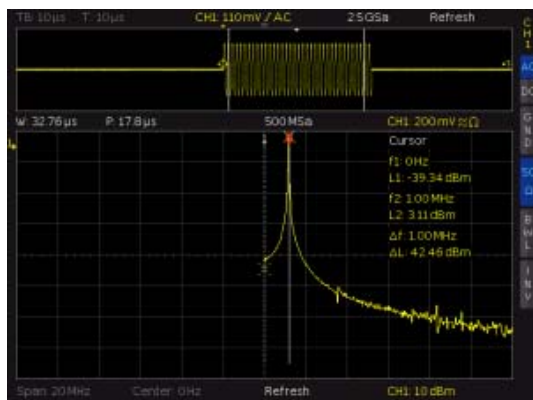


图5 测量窗口完全覆盖正弦脉冲

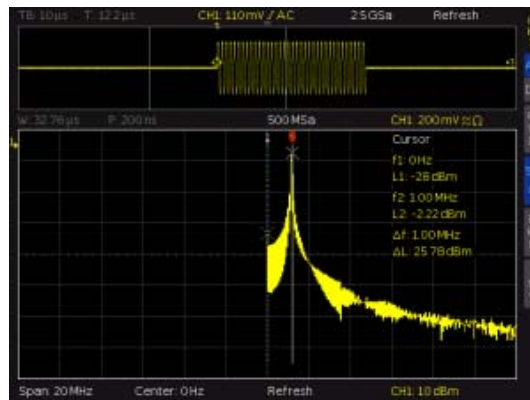


图6 测量窗口覆盖 50%正弦脉冲

这些例子，表明了所有在停止模式下 FFT 实时计算功能的优点：所有的操作可应用到单次记录信号，在采样存储器里它不受限制。

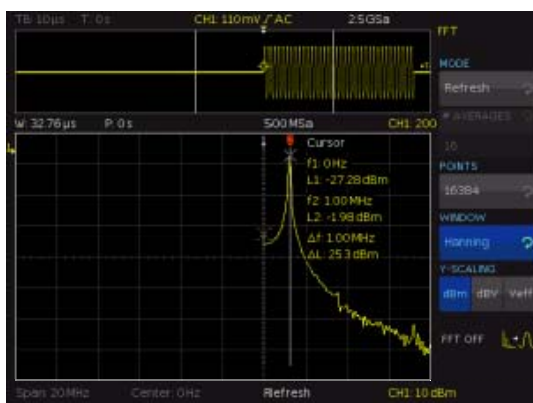


图7 使用汉宁窗代替矩形窗的频谱

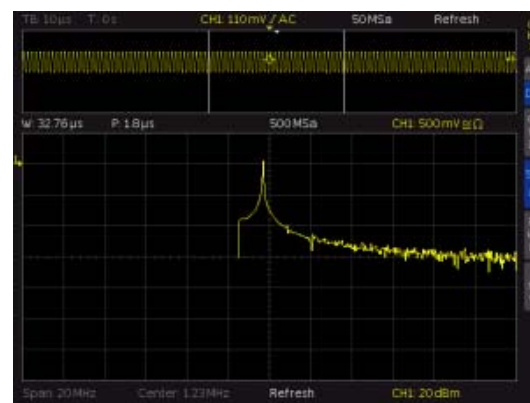


图8 矩形窗显示的时间信号和频谱图（采样率 500MSa/s）

拖尾现象

FFT 功能，除了其优势外，在实践中我们必须考虑 FFT 的局限，这包含所谓的拖尾，拖尾现象与测量过程直接相关，并导致频谱“拖尾”。这主要是时间信号窗口导致的：窗口宽度和采样率的选择决定了测量点的数量。从数学定义上讲，该框内的时间信号对应于该窗口信号时间的整数倍。通常情况下，在微调期间是不可能捕获所有完整的正弦波，这样会成为频谱边缘上产生小信号的原因。

既然 FFT 总是只适用于一段时间信号，那么就不可能完全避免这种拖尾现象。但是，也可通过使用各种“窗”来补救（见表1）。

表1 几种常窗函数定义和应用表

窗	定义	应用
矩形窗（无窗）	$W[n]=1.0$	区分频域和振幅接近的信号，瞬时信号宽度小于窗
指数形窗	$W[n]=\exp[n*\ln f/N-1]$ ，f=终值	瞬时信号宽度大于窗
汉宁窗	$W[n]=0.5\cos(2n\pi/N)$	瞬时信号宽度大于窗，普通目的应用



海明窗	$W[n]=0.54-0.46\cos(2n\pi/N)$	声音处理
平顶窗	$W[n]=0.2810639-0.5208972\cos(2n\pi/N)+0.1980399\cos(4n\pi/N)$	分析无精确参照物且要求精确测量的信号
Kaiser-Bessel 窗	$W[n]=I^0(\beta)$	区分频率接近而形状不同的信号
三角形窗	$W[n]=1- (2n-N)/N $	无特殊应用

泄漏效应

第二种误差来源是所谓的泄漏效应，也与窗口相关。如果选定的测量窗口的持续时间没有对应信号周期的整数倍，会发生新的谱线。在现实中，这些谱线的正弦波是不存在的。由于频谱“泄漏”，就不可能可靠地表现显示实际信号的频谱分量。然而，此问题相当容易解决，通过最大化选择窗口来最小化泄漏效应。

结论

FFT 提供了大量的选项，来快速而安全的分析时间信号。然而在实际应用中，下列因素需要考虑：例如，如果使用的示波器限制点数到 2 倍以上，那么测量选项会明显受到限制。[惠美 HMO 示波器](#)提供了优秀的选项：65536 点进行 FFT 分析，[HMO 示波器](#)还包括光标测量综合选项。此外，它还简化了频谱测量，与时间信号同屏显示：测量窗口同屏显示 FFT 分析、时间信号。对单一信号选择应用“多窗测试”非常重要，对时间信号选择不同的测量窗，可以进一步降低噪声成分。此外，潜在的误差来源，如泄漏或拖尾，可以很大程度的消除。

备注：FFT 基础知识

如果你从学校毕业很长时间或者你不知道 FFT 快速傅里叶的基本知识，下面我们就简单介绍 FFT 基本概念：通常情况下，时间信号包括各种正弦波（谐波），以及波的频率和幅度等信号特征。傅立叶变换实现了时间信号到能显示谐波的频谱转换。从数学的角度看，FFT 通过以下公式运算：

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

周期信号的傅立叶频谱演变为离散线，最简单例子是相同振幅和频率的正弦波为 1 根频谱线（图 a 和 b）。

非连续信号是另一个极端的例子：由于它们的非周期性，其包括大量的谐波与不同的振幅，因此其傅立叶频谱也为非连续的。付诸实践，当信号总是通过定义的时间窗口时，问题就可能出现。时间窗口和采样率的设置最终会确定分析的正确性。在 FFT 运算时，信息（除了相位）不应丢失，尽管数据量大大减少，这才是本质。求和公式的增量问题才是关键。从一级到下一级，采样值数量一分为二，在某些情况下，以便使所需的计算明显低于 1%。

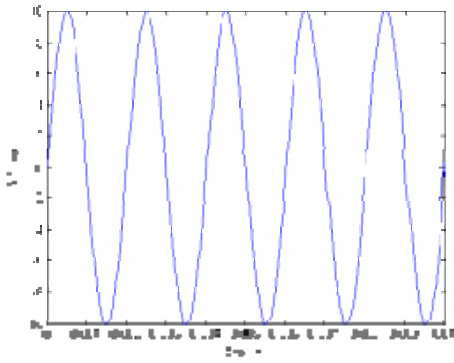


图 a 正弦时间信号 (10V/500Hz)

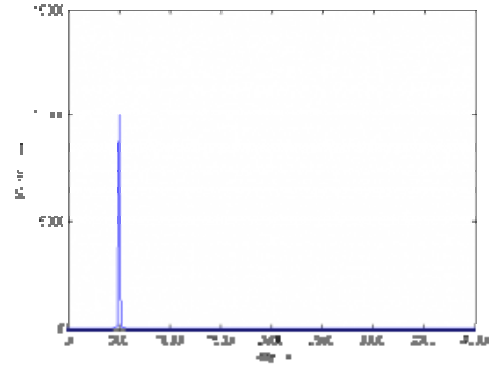


图 b $A=10000\text{mV}$ 和 $f=500\text{Hz}$ 离散线频谱

@本文由北京海洋仪器整理，如需转载请注明出处。