



示波器实现频率分析

摘要: 本文主要论述了示波器实现频率分析的原理及外差式频谱分析仪原理与 FFT 频谱分析原理的比较、快速傅立叶变换 FFT 作用于周期性信号与非周期性信号的区别、惠美 HMO3000 示波器内置软件界面可多种方式显示频谱的特性, 最后还分析了 FFT 用于频率分析过程中不可避免会产生的效应, 并给出了一些减小这些不良效应的解决措施。

关键词: FFT 频谱分析, 外差式频谱分析, 泄漏效应, 拖尾效应, 非周期信号

一、引言

示波器, 顾名思义就是显示随时间变化的电压信号(即波形)的测量仪器。它的工作原理是利用示波管内狭窄的、由高速电子组成的电子束在被测信号的作用下发生偏转, 打在涂有荧光物质的屏幕上显示被测信号瞬时值的变化曲线。

示波器不仅可以定性观察电路或元器件的动态特性, 还可以定量测量多种电学量, 如电压、电流、周期、频率、幅度、波形的宽度及上升、下降时间等。如果用双踪示波器还可以测量两个信号之间的时间差、频率比或相位差, 显示两个相关函数的图像, 如李萨如图等。此外, 示波器还可用作其他应用的显示设备, 如晶体管的特性曲线、雷达信号等。当然, 如果与各种传感器配套使用, 它还可以用于多种非电量测量, 如压力、声光信号、生物体的物理量(心电、脑电、血压)等。

自 1931 年美国研制出第一台示波器至今已有 80 多年, 它已经在各个研究领域得到了广泛应用, 已经成为科学研究、实验教学、医药卫生、电工电子和仪器仪表等各个研究领域和行业的最常用的仪器。

但是示波器能够做频率分析是近年来才实现的。随着数字信号处理技术的发展、算法技术改进以及集成电路规模不断按摩尔定律的指数级增长等相关条件的成熟, 研发工程师就把快速傅立叶变换 FFT 引进示波器, 使示波器不仅在时域分析信号, 而且也能够频域内分析信号, 从而使得示波器的功能更加完善, 应用领域也更加广泛。

二、频率分析的原理

目前, 有两种能对信号频率分析的方法。

一种是傅立叶变换的方法, 它是通过在时域对信号进行采样、量化, 然后进行 FFT 变换将其转为频域信号。这种方法也称作动态信号分析方法, 具有速度较快, 采样率和分辨率较高的特点, 即使是两个信号频率间隔非常近, 也可用傅立叶变换将其分辨出来。但由于它分析的对象是经过数字采样的信号, 所以其所能分析的信号最高频率受到采样速率的影响(奈奎斯特定理: 最小采样率不小于输入信号的最高频率即 $f_s \geq 2 \cdot f_{in,max}$), 限制了它在高频范围的应用。因此, 这种方法一般用于低频信号的分析, 测量范围在零到几十 MHz 之间, 如声音信号等。

FFT 工作原理的公式:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_s) \cdot e^{-j2\pi kn/N}$$



分析微波或毫米波范围内的高频信号的频谱，就要使用另一种原理的频谱分析仪，它是基于外差原理来进行频谱分析的，其得到的频谱是由频域分析直接决定的，而不是经过数学变换。这种频谱仪也称为超外差接收直接扫描调谐分析仪。其频率范围最高可达 325GHz。在要求较高分辨率时，这种方法测量分析的时间会有所增加。

三、周期信号与非周期信号的 FFT 区别

周期信号的频谱是分立的，而非周期信号的频谱是连续的。对于周期信号，只要完整捕获到最小周期内信号，该频率分析就可以提供完整的频谱。理论上，为了获得清楚的结果，非周期信号必须被捕获。然而，实际上这是不可能做到的。利用 FFT 对周期信号做变换时，尽量使得信号频率与采样频率同步，这样才可以减少频谱泄漏。

四、惠美 HMO3000 示波器可多样化显示频谱特性

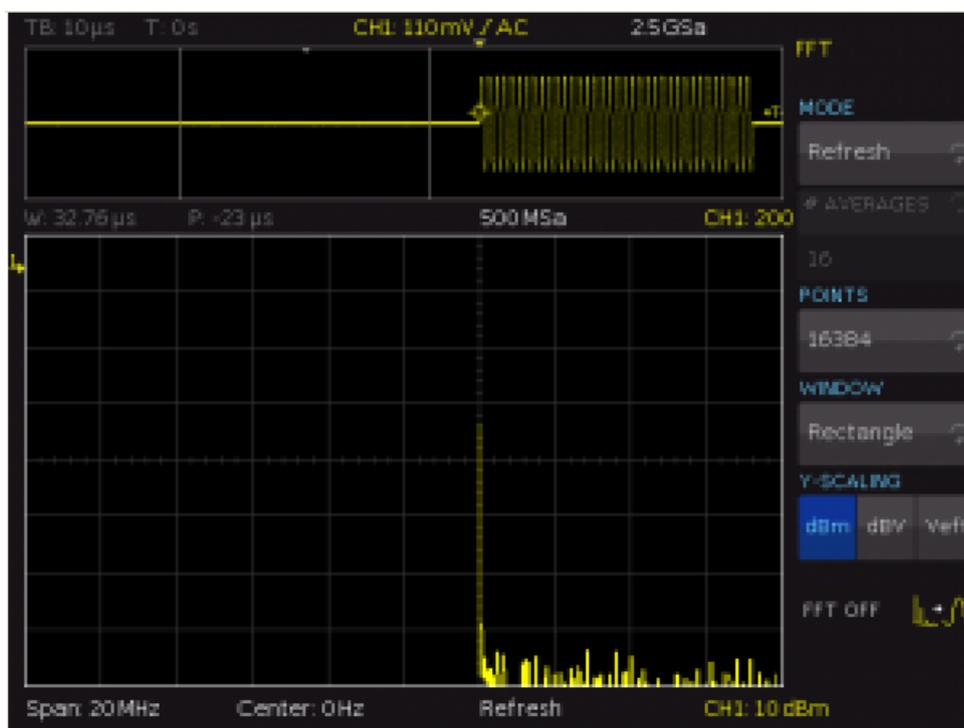


图 1 矩形窗没有框选脉冲

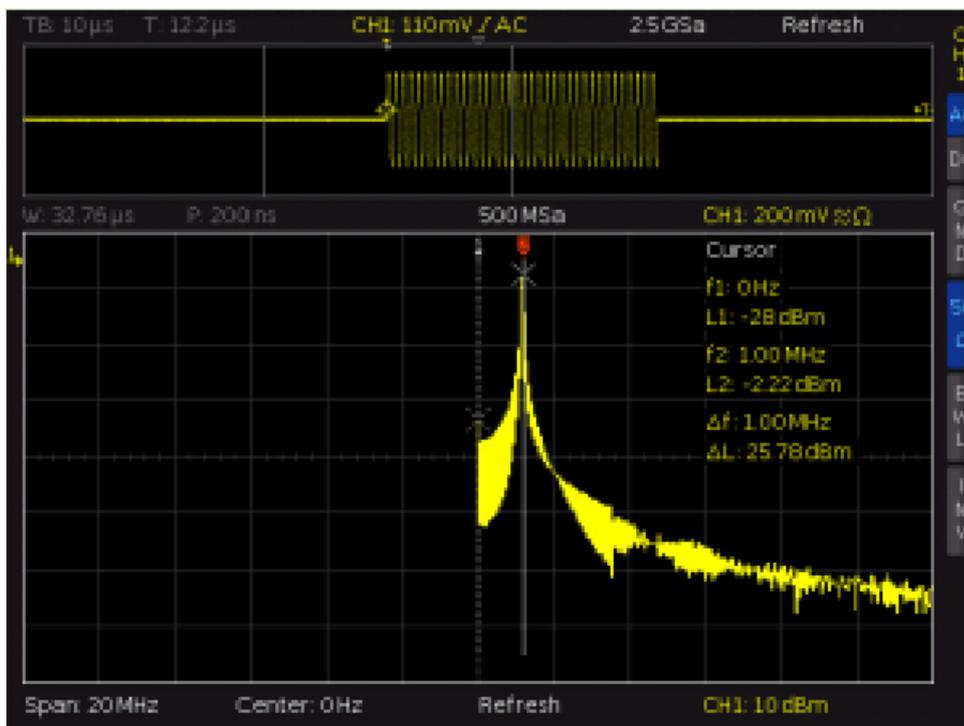


图 2 矩形窗框选脉冲和本底噪声

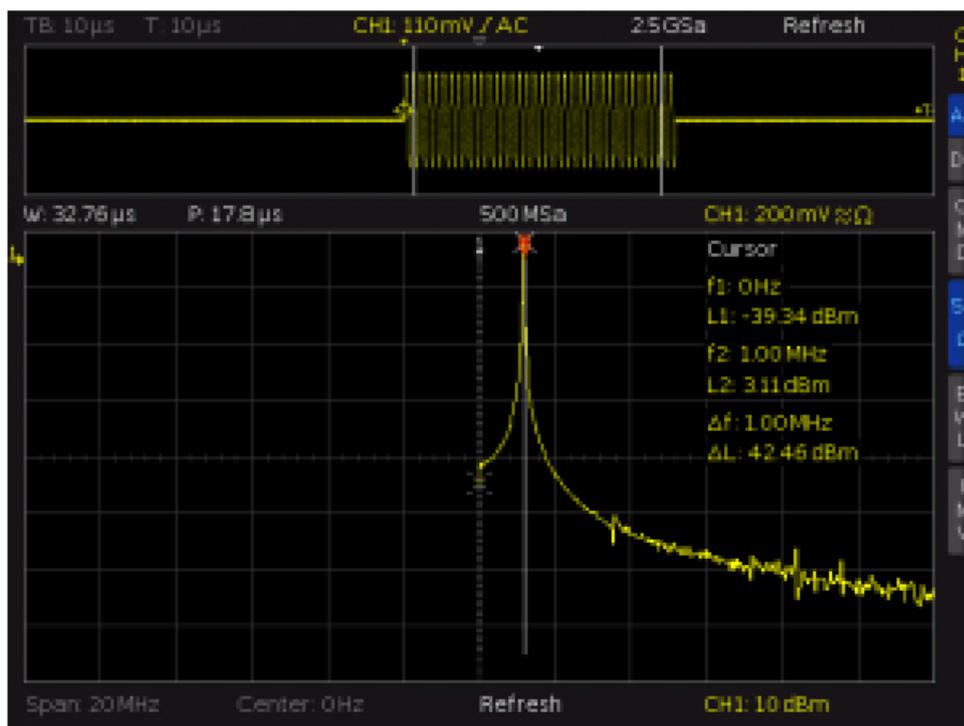


图 3 矩形窗只框选脉冲

从以上三幅图可以看出，惠美 HM03000 系列示波器具有多种显示频谱的方式，可以更好地显示本底噪声对频谱的影响。

五、频谱泄露效应

所谓频谱泄露，就是信号频谱中各谱线之间相互干扰，使测量的结果偏离实际值，同时在真实谱线的两侧的其它频率点上出现一些幅值较小的假谱。产生



频谱泄露的主要原因是采样频率和原始信号频率不同步，造成周期的采样信号的相位在始端和终端不连续。简单来说就是因为计算机的 FFT 运算能力有限，只能处理有限点数的 FFT，所以在截取时域的周期信号时，没有能够截取整数倍的周期。信号分析时不可能取无限大的样本。只要有截断不同步就会有泄露。如图 4、5 所示：

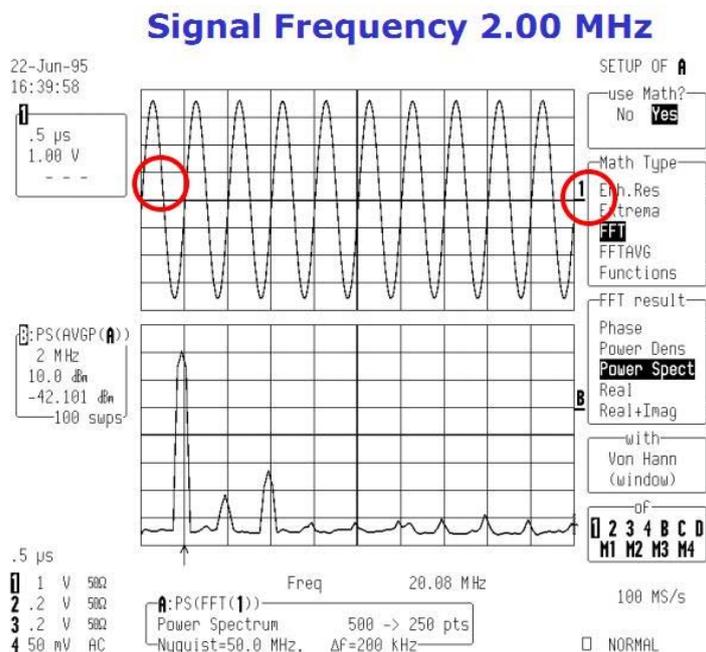


图4 采样速率与信号频率同步

图中被测信号的开始端相位和截止端相位相同，表示在采集时间内有整数倍周期的信号被采集到，所以此时经行 FFT 运算后得出的频谱不会出现泄露。

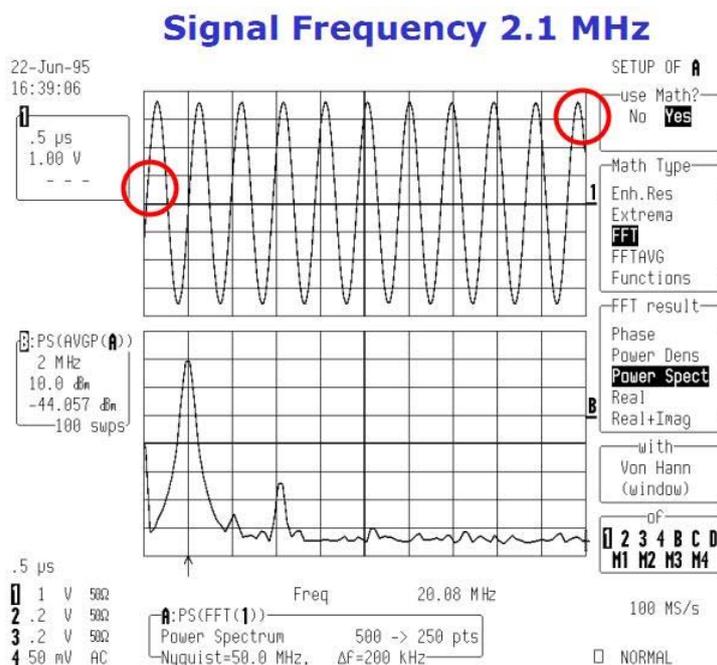


图5 采样速率与信号频率不同步



上图的信号频率为2.1MHz，采集时间内没有截取整数倍周期的信号，FFT运算之后谱线的泄露现象严重，可以看到能量较低的谱线很容易被临近的能量较高的谱线的泄露给淹没住。

因此，避免频谱泄露的方法除了尽量使采集速率与信号频率同步之外，还可以采用适当的窗函数。

另外一个方法是采集信号时间足够长，基本上可以覆盖到整个有效信号的时间跨度。这种方法经常在瞬态捕捉中被使用到，比如说冲击试验，如果捕捉的时间够长，捕捉到的信号可以一直包括了振动衰减为零的时刻。在这种情况下，可以不加窗函数。

窗函数其实就是一个加权函数，它在截取的信号时间段内有值，时间段之外值为0，记为：

$$w(t)=g(t) , \quad -T/2 < t < T/2 ; \quad w(t)=0 , \quad \text{其它}$$

加窗在时域上表现的是点乘，由卷积定理，在频域上则表现为卷积。卷积可以被看成是一个平滑的过程。这个平滑过程可以被看出是由一组具有特定函数形状的滤波器。因此，原始信号中在某一频率点上的能量会结合滤波器的形状表现出来，从而减小泄露。基于这个原理，人们通常在时域上直接加窗。

大多数的信号分析仪一般使用矩形窗 (rectangular)，汉宁 (hann)，flattop 和其它的一些窗函数。

不同的窗函数对频谱谱线的影响不同，基本形状可以参看下图：

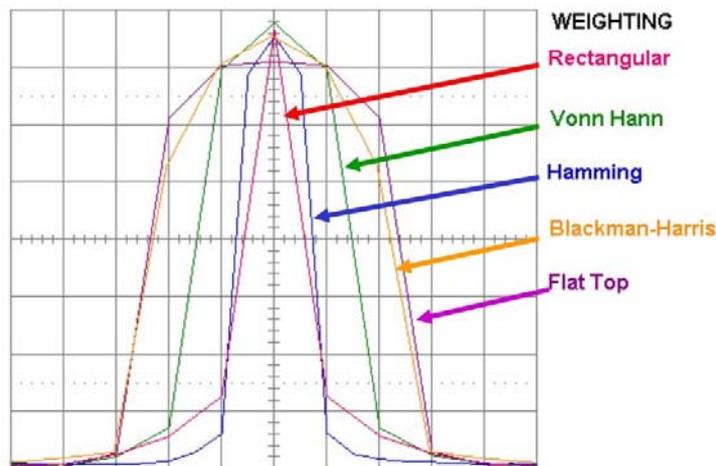


图6 各种窗函数的频谱图

可以看到，不同的窗函数的主瓣宽度和旁瓣的衰减速度都不一样，所以对于不同信号的频谱应该使用适当的窗函数进行处理。

矩形窗(Rectangular): 加矩形窗等于不加窗，因为在截取时域信号时本身就是采用矩形截取，所以矩形窗适用于瞬态变化的信号，只要采集的时间足够长，信号宽度基本可以覆盖整个有效的瞬态部分。

汉宁窗(Von Hann): 如果测试信号有多个频率分量，频谱表现的十分复杂，且测试的目的更多关注频率点而非能量的大小。在这种情况下，需要选择一个主瓣够窄的窗函数，汉宁窗是一个很好的选择。

flattop 窗: 如果测试的目的更多的关注某周期信号频率点的能量值，比如，



更关心其 EU peak,EU peak-peak,EU rms, 那么其幅度的准确性则更加的重要, 可以选择一个主瓣稍宽的窗, flattop 窗在这样的情况下经常被使用。

六、频谱拖尾效应

所谓频谱拖尾效应, 它是由于所选的测量窗口时间宽度不是相应被测信号周期的整数倍, 产生新的频谱线的现象。在现实中, 具有这些谱线的正弦波是不存在的。由于频谱有拖尾效应, 所以要可靠的描述信号的实际频谱分量是不可能的。但是, 可通过尽量扩大所选窗口宽度, 使此类效应的影响最小化。

七、总结

本文论述了两种实现频谱分析的技术, 即通过快速傅立叶变换计算得到频谱和利用外差原理得到频谱, 两种各有优点和不足。FFT 由于 AD 转换器带宽的限制, 只能在低频信号范围内应用, 但他的速度快, 分辨率较高, 相信随着技术的发展, 它也会逐步适用于较高频的信号, 而利用外差原理的频谱仪虽然可以在高频信号范围内分析频谱, 但要获得较高的分辨率会花费更长时间。分析了周期信号与非周期信号的 FFT 的不同点, 并介绍了惠美 HM03000 示波器的一个显示频谱的优越特性, 即窗可以任意框选本底噪声或脉冲。

此外, 本文还分析了频谱的泄漏效应和拖尾效应, 并且还给出了减小这些不良效应影响的措施。

参考文献

- [1] 马亦飞.力科示波器基础应用系列
- [2] Christoph Rauscher. 频谱分析原理
- [3] Kai.Frequency analysis put into practice