是德科技

使用 3000T X 系列示波器进行 FFT 和脉冲的射频参数测量

应用指南

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

引言

在将数字和射频设计推向市场的过程中，示波器的快速傅立叶变换（FFT）功能和各种其他运算功能经证明是极其重要的。例如，示波器的 FFT 功能可以快速突出显示电源上耦合信号的频率分布。反之，此类测量又有助于找出噪声信号的源头。这是非常重要的，因为除非发现并解决了这个问题，否则这些信号可能在设计的其他部分转化为噪声，缩减信号裕量，并可能阻碍设计完成原型验证。

当查看射频信号以验证脉冲特征或调制是否正确时，FFT 频谱视图也是很有用的。时间选通 FFT 甚至能够进一步评测信号的频谱分量，例如哪些频率出现在射频脉冲的特定点上。例如频率测量的“测量趋势”等运算功能，可以快速验证经典的调制方案是否在正确实施，如脉冲串中跨射频脉冲的线性调制频率。

本应用指南将探讨这些实例，并总结了使用 DSO/MSO-X 3000T 系列示波器进行此类测量时的实际注意事项。

使用输入正弦波进行 FFT 测量的简单示例

MSO-X 3104T 示波器拥有 1 GHz 的模拟带宽和高达 5 GSa/s 的采样率，能够执行各种测量。这两个技术指标均非常重要，将直接关系到哪些测量应用是能够实现的。我们讨论的第一个测量实例是捕获注入 50 Ω 电阻的 600 MHz、632 mV（峰峰值）、0 dBm、1 mW 正弦波信号（橙色），以及 FFT 结果（白色），如图 1 所示。

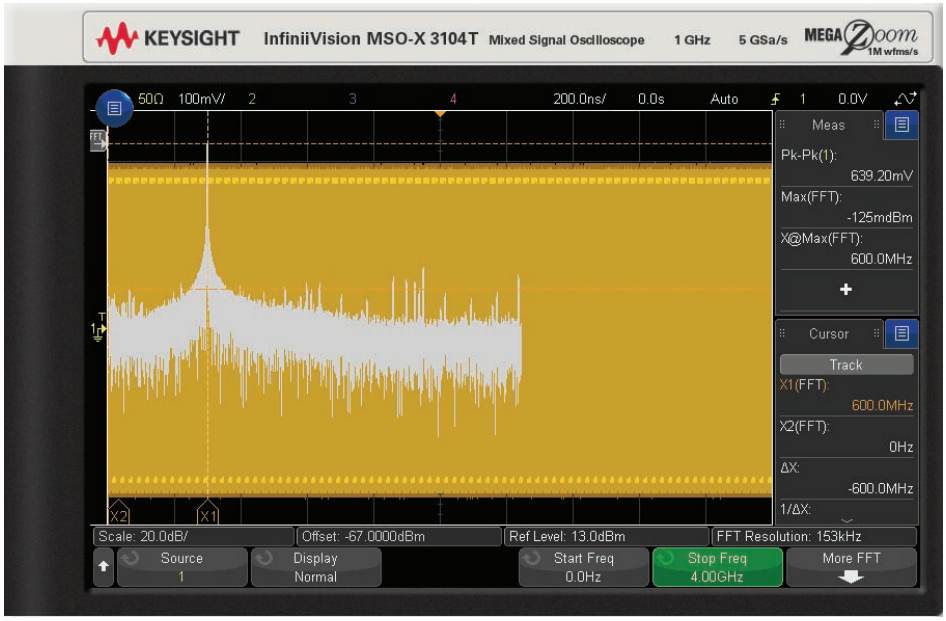

图 1. 使用 600 MHz 正弦波输入进行的 200 ns/ 格进行时域捕获以及 FFT 计算结果。

有关此 FFT 频谱测量的一些基本原理

有多种因素会影响此类 FFT 测量达到预期的精度和准确度。这些因素将在下文中进行探讨。

我们必须了解示波器的采样特征对于 FFT 测量的质量有什么样的影响。示波器的模拟带宽、采样率、存储器深度和捕获时间均对于测量结果有着深刻影响，同时这种影响也取决于被测信号的特征，以及这些信号特征与示波器捕获性能之间的关系。

例如，在这个简单的示例中，我们要测量一个单音频 600 MHz 正弦波信号，并想要观察此信号的基本频谱特征，示波器必须拥有足够的模拟带宽才不会对信号的幅度造成衰减。由于这台示波器拥有最大 1 GHz 的模拟带宽，因此足够测量 600 MHz 音频。该测量将证明时间 / 格设置对于在测量时保持此带宽是非常重要的。

为了避免在信号的数字化过程中发生混叠，采样速度必须至少达到被测信号中任何可感知频率的两倍。在这个最简单的正弦波示例中，测量这个 600 MHz 正弦波信号需要使用至少 1.2 GHz 的采样率。显然，本示波器高达 5 GSa/s 的采样率对此测量绰绰有余。但要达到至少 1.2 GHz 的采样率，示波器的时间 / 格设置必须保持在某个特定范围内。

对这个 600 MHz 正弦波的 FFT 测量能达到什么样的质量呢？让我们回到图 1 中的示波器 FFT 测量，请注意主要的单频尖峰，其相关的测量游标显示大约 600 MHz 的频率和 0 dBm 的功率。这与预期相吻合。

由 FFT 数据所驱动的 FFT 中的实际谱线之间的间隔称为“分辨率带宽”。因为信号能量的分布方式，所以它有时也称为频率“分段”宽度。分辨率带宽严格基于采集数据的时间长度和所选 FFT 窗口类型的因数。此处使用矩形窗口，因数为“1”，因此分辨率带宽就是记录时间的倒数。在本例中：

分辨率带宽 = 1 / (200 ns/ 格 x 10 格) = 500 kHz

因此这个 FFT 能够区分信号频谱中间隔大于 500 kHz 的频率分量 , 而间隔小于 500 kHz 的频率分量会混成一团无法区分。FFT“分辨率带宽”不应与屏幕上显示的“FFT 分辨率”数字（153 kHz）相混淆。后者描述的是 FFT 数据中两个 FFT 点之间的实际间隔，但它不是在既定时间跨度内所获得的实际分辨率带宽。

屏幕上的缩减时间如何降低 FFT 响应性能

为了证明记录时间对 FFT 结果的重要性，如果时间 / 格放大至 1 ns/ 格，屏幕上只显示 10 ns 的新时间记录，则分辨率带宽会迅速改变为：

分辨率带宽 = 1 / (10 ns) = 100 MHz

FFT 结果的巨大变化如图 2 所示，图中更粗糙地显示了 600 MHz 的频域尖峰。显示在此进行了折衷。现在正在处理的时间采样越少，那么计算出的 FFT 结果的频谱线就越少，分辨率带宽越差，但是测量速度大大加快。

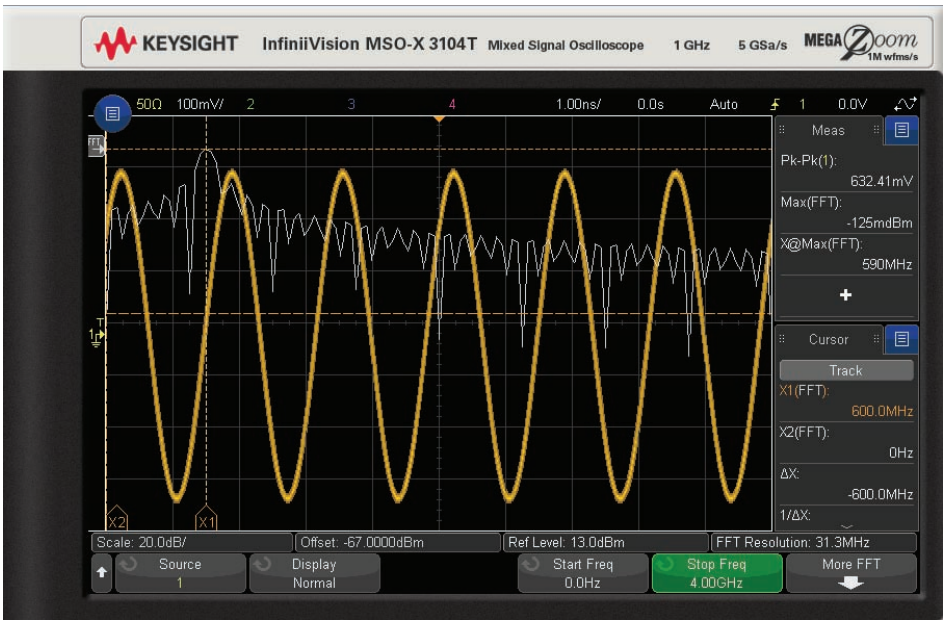

图 2. 采用 600 MHz 正弦波输入和 1 ns/ 格时的时域捕获结果，以及 FFT 计算结果。

时间 / 格的注意事项

时间 / 格设置如果设置得太小，就会造成屏幕上显示的时间记录太短，时间点太少，从而降低 FFT 测量的性能（如前面所示）；而如果时间 / 格设置得太大，使得屏幕上显示的时间记录太长，也可能会造成问题，因为示波器会降低采样率以保持良好的吞吐量。

例如，时间 / 格设置可向上平移至 200 ns/ 格，在屏幕上显示 2 μs 的时间记录，在此条件下，示波器能够保持 5 Gsa/s 的采样率和 1 GHz 的模拟带宽。但是在采用 330 ns/ 格及更高设置时，采样率就会下降，示波器带宽降低，这样会影响 FFT 结果。

使用起始频率、终止频率、中心频率和扫宽控制

FFT 计算和结果视图的一个重要功能是能够对您所关注的区域进行放大分析。第一个示例拥有 0 Hz 至 2.5 GHz 的宽频率扫宽，因此很难看到 600 MHz 载波附近的任何细节。如果在 600 MHz 载波频率附近存在着可疑噪声，并希望对此噪声进行检验。FFT 控制功能可以将中心频率设置在 600 MHz，并设置一个目标扫宽，例如在 600 MHz 载波附近 100 MHz。设置 550 MHz 的起始频率和和 650 MHz 的终止频率也可以提供相同结果。采用这些参数的 FFT 测量如图 3 所示。

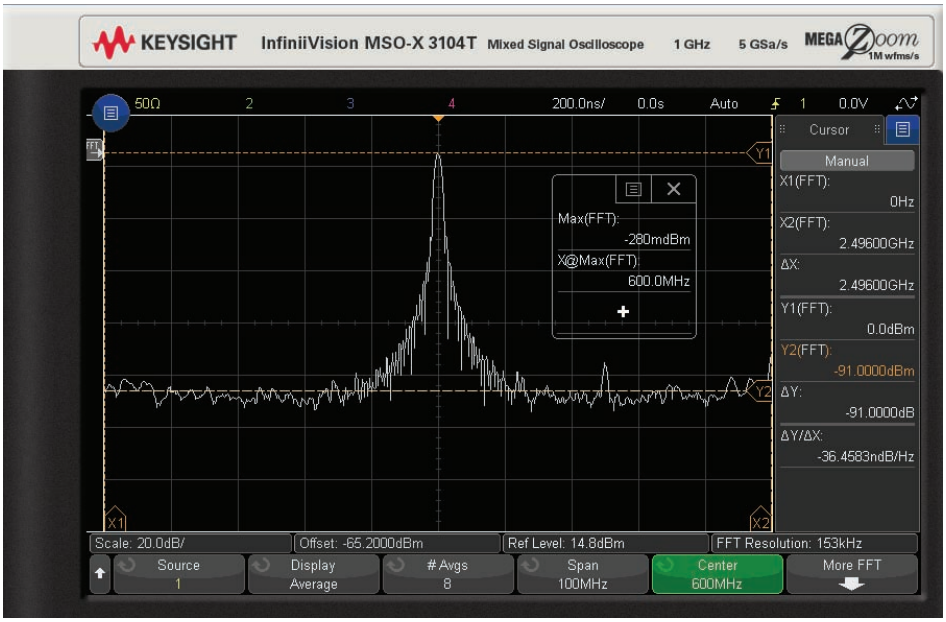

图 3.600 MHz 正弦波输入的 FFT 结果，FFT 控制设置为 600 MHz 中心频率和 100 MHz 扫宽。

宽带 FFT 分析

如今越来越多的信号均经过调制，可将频谱宽度增加至几百 MHz 甚至几 GHz。如果信号的带宽超过 510 MHz，则当前市场上的频谱分析仪或矢量信号分析仪都没有足够的分析带宽来进行有效的测量。在此情况下，需要使用有足够宽分析带宽的示波器或数字化仪来满足应用的需求。待测信号的载波频率也很重要。被测信号的载波频率加上一半的信号谱宽，必须小于或等于示波器的带宽，以便示波器能够独立完成测量。

现在我们将讨论宽带信号频域测量。被测信号是一个 600 MHz 射频脉冲串，每 20 μs 有 4 μs 宽的射频脉冲重复。我们对该信号进行 600 MHz 宽的线性调频，也就是对从 300 MHz 开始到 900 MHz 结束的射频脉冲包络的载波频率进行线性调频。

为了进行射频脉冲的基本 FFT 测量，第一步是在屏幕的信号上捕获一个干净的时域脉冲。使用触发释抑以确保触发不会发生在脉冲中间，避免捕获的迹线出现不稳定的情况。触发释抑设置为略长于射频脉冲的宽度。射频脉冲为 4 μs 宽，因此可以将触发释抑设为 5 μs。

定义触发释抑的最简单方式是按下前面板触发区的“Mode/Coupling（模式 / 耦合）”键，然后选择 5 μs 的触发释抑时间。

再按下“FFT”键，从屏幕上的时域数字化信号来计算射频脉冲串的频谱视图。示波器提供了起始和终止频率，或者中心频率和扫宽等 FFT 控制功能。首先选择较宽的扫宽，起始频率为 0 Hz，终止频率为 2.5 GHz。选择矩形窗口进行 FFT 计算，因为屏幕上的数据以噪声开始，以噪声结束，整个射频脉冲都在屏幕窗口内。进行 8 次 FFT 平均也有助于优化测量结果。图 4 显示了 FFT 响应结果。

图 4. 4 μs 脉宽，20 μs 重复周期的线性调频脉冲信号的 FFT 结果。

游标放置在 FFT 响应处，可以看到这个射频脉冲有一个从 300 MHz 至 900 MHz 一共 600 MHz 宽的频谱宽度。至目前仍未证明的是，载波的频率从 300 MHz 呈线性转移到 900 MHz，从脉冲的左侧跨越到脉冲的右侧。

选通 FFT 运算功能

要想很快看到脉冲上的某些载波频率值，一种办法是使用选通 FFT 功能。这可通过启动正常的时域迹线时间选通功能来实现。一旦启动，屏幕上半部就会出现一个正常的迹线视图，下半部出现一个放大的视图。无论哪一部分的波形出现在窗口的下方迹线中，均是经过放大的。

通过创建小时间宽度窗口功能，然后将其移到脉冲的起点，可以得到我们感兴趣的测量结果。通过图 5 所示的选通时间窗口所包含的数据，计算得出 FFT。

图 5. 时间选通 FFT 功能观察射频脉冲开端的载波。

尖锋峰值幅度和频率的 FFT 测量结果显示，射频脉冲从大约 300 MHz 的载波频率开始。如果时间选通窗口移至射频脉冲的中心，则观察到的频率在 600 MHz 左右。在射频脉冲的末端为 900 MHz。这看上去像是我们预期的线性调频。

频率测量和“Measurement Trend（测量趋势）”运算功能

在某些情况下，“测量趋势”运算功能能够很好地显示频率线性调频曲线。在一个类似的信号示例中，一个脉冲串由 700 ns 宽的射频脉冲组成，这些脉冲每 20 μs 重复一次。我们需要验证它在 300 MHz 至 900 MHz 之间的线性调频特征。FFT 函数现在已关闭，我们进行纯时域测量。

首先，示波器的采集模式从“Normal（正常）”捕获切换为“High Resolution（高分辨率）”捕获模式。其次，从候选测量列表中选择一种频率测量。载波零交叉检测的中间阈值设为 30 mV。然后按下“Math（运算）”键，选中“Measurement Trend（测量趋势）”运算功能。标记显示出来的就是运算的结果。跨射频脉冲进行的频率测量结果视图如图 6 所示。

图 6. 跨脉冲进行的“频率”测量的测量趋势运算功能。

显然，脉冲载波像设计的那样，在整个脉冲上按照线性方式从左到右移动。垂直游标显示起始频率从大约 320 MHz 开始，终止频率在大约 830 MHz 附近，水平游标显示该事件持续了大约 600 ns。这样计算出线性调频斜率为 0.85 MHz/ns。期望的线性调频斜率将会在 700 ns 宽的脉冲（包括包络上升时间和下降时间）上移动 600 MHz，或 0.86 MHz/ns。测得的线性调频斜率和预期相匹配。

注意，线性坡度显示并未跨越整个射频脉冲的宽度，但在脉冲结束之前达到了极限值。这是因为在趋势计算中已达到了 1000 的测量极限。重要的是，我们可以看到一部分脉冲 FM 功能呈线性。对于跨脉冲的频率测量来说，要获得足够的精度，就必须选择“高分辨率”采集模式。

要选择“High Resolution（高分辨率）”模式，请在前面板的“Waveform（波形）”区域按下“Acquire（采集）”键，然后选择“High Resolution（高分辨率）”。

如果载波在更高的频率范围内跨越脉冲进行线性调频，例如上述范围的两倍（900 MHz 至 1.8 GHz），则线性坡度只能在脉宽的一半上看到。对于通用雷达系统等更高频率范围的应用来说，可以选择 Infiniium S 系列、V 系列或 Z 系列示波器，它们的测量趋势功能没有 1000 的测量极限。

总结

示波器中的 FFT 是一个十分宝贵的工具，它能够给出信号的频域视图，使示波器能够以极宽的带宽进行测量，从而完成窄带矢量信号分析仪无法完成的测量。FFT 测量实例能够验证线性 FM 调频信号是否按照既定方式来移动载波频率。另外，示波器还提供了其他运算功能，即测量趋势功能。 在本例中，这样的计算允许您在特定的频率范围内，对线性 FM 调频进行非常简单的验证。

从惠普到安捷伦再到是德科技

传承 75 年创新史，我们始终帮助您开启测试测量新视野。我们独有的硬件、软件和技术人员资源组合能够帮助您实现下一次突破。1939 年成立的惠普公司起源于电子测量，是德科技将这一业务传承至今，并将继续发扬光大。

1939 — 未来

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight
个性化视图为您提供最适合自己的信息！

3 年保修

www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty
是德科技卓越的产品可靠性和广泛的 3 年保修服务完美结合，从另一途径帮助您实现业务目标：增强测量信心、降低拥有成本、增强操作方便性。

是德科技保证方案

www.keysight.com/find/AssurancePlans
5 年的周密保护以及持续的巨大预算投入，可确保您的仪器符合规范要求，精确的测量让您可以继续高枕无忧。

www.keysight.com/go/quality

是德科技公司
DEKRA 认证 ISO 9001:2008
质量管理体系

Keysight Infoline
www.keysight.com/find/service
是德科技的洞察力帮助您实现最卓越的信息管理。免费访问您的是德科技设备公司报告和电子图书馆。

如欲获得是德科技的产品、应用和服务信息，请与是德科技联系。如欲获得完整的产品列表，请访问: www.keysight.com/find/contactus

是德科技客户服务热线
热线电话: 800-810-0189、400-810-0189
热线传真: 800-820-2816、400-820-3863
电子邮件: tm_asia@keysight.com

是德科技 (中国) 有限公司
北京市朝阳区望京北路 3 号是德科技大厦
电话: 86 010 64396888
传真: 86 010 64390156
邮编: 100102

是德科技 (成都)有限公司
成都市高新区南部园区天府四街 116 号
电话: 86 28 83108888
传真: 86 28 85330931
邮编: 610041

是德科技香港有限公司
香港北角电器道 169 号康宏汇 25 楼
电话: 852 31977777
传真: 852 25069233

上海分公司
上海市虹口区四川北路 1350 号
利通广场 19 楼
电话: 86 21 26102888
传真: 86 21 26102688
邮编: 200080

深圳分公司
深圳市福田区福华一路 6 号
免税商务大厦裙楼东 3 层 3B-8 单元
电话: 86 755 83079588
传真: 86 755 82763181
邮编: 518048

广州分公司
广州市天河区黄埔大道西 76 号
富力盈隆广场 1307 室
电话: 86 20 38390680
传真: 86 20 38390712
邮编: 510623

西安办事处
西安市碑林区南关正街 88 号
长安国际大厦 D 座 501
电话: 86 29 88861357
传真: 86 29 88861355
邮编: 710068

南京办事处
南京市鼓楼区汉中路 2 号
金陵饭店亚太商务楼 8 层
电话: 86 25 66102588
传真: 86 25 66102641
邮编: 210005

苏州办事处
苏州市工业园区苏华路一号
世纪金融大厦 1611 室
电话: 86 512 62532023
传真: 86 512 62887307
邮编: 215021

武汉办事处
武汉市武昌区中南路 99 号
武汉保利广场 18 楼 A 座
电话: 86 27 87119188
传真: 86 27 87119177
邮编: 430071

上海MSD办事处
上海市虹口区欧阳路 196 号
26 号楼一楼 J+H 单元
电话: 86 21 26102888
传真: 86 21 26102688
邮编: 200083

本文中的产品指标和说明可不经通知而更改
© Keysight Technologies, 2015
Published in USA, October 7, 2015
出版号： 5992-1094CHCN
www.keysight.com