

MDO4000 系列混合域示波器 基础知识大全

应用指南

目录

第一章: 简介	4-9	RF 时域轨迹.....	24
趋势: 无线技术无处不在.....	4	时域和频域相关.....	26
趋势: 当前嵌入式设计人员的职责不断扩大.....	5	触发.....	27
趋势: 无线电变成嵌入式系统.....	6	频谱瀑布图.....	28
趋势: RF 信号随时间变化.....	6	标记.....	29
趋势: RF 带宽不断提高.....	7	RF 测量.....	31
趋势: EMC 仍然非常重要.....	8	限幅指示符.....	34
趋势: 产品开发周期变得更加关键.....	9	第三章: 深入了解相关知识	36
第二章: 混合域示波器	9	频谱分析基础.....	36
MDO: 比示波器更优越.....	10	下变频.....	42
专用RF输入通道.....	11	频域触发.....	43
独立的时域和频域通道.....	12	采集原始RF时域数据记录.....	43
为频域测量优化的用户界面.....	13	数字下变频.....	48
MDO: 比频谱分析仪更优越.....	15	生成频谱.....	49
多条输入通道.....	15	生成RF时域数据.....	50
时间相关的宽频谱捕获带宽采集技术.....	19	生成频谱瀑布图.....	52
MDO4000: 独特的功能组合.....	20	时间分辨率.....	53
专用频谱用户界面.....	20	附录A: 窗口函数	54
频谱轨迹.....	22	附录B: 词汇表	58

图片列表

图 1.....	5
图 2.....	7
图 3.....	13
图 4.....	13
图 5.....	13
图 6.....	14
图 7.....	16
图 8.....	16
图 9a/9b.....	17
图 10.....	18
图 11.....	20
图 12.....	21
图 13.....	22
图 14.....	23
图 15.....	24
图 16.....	25
图 17.....	26
图 18.....	28
图 19.....	29
图 20.....	30
图 21.....	31
图 22.....	32
图 23.....	33
图 24.....	34
图 25.....	35
图 26.....	36
图 27.....	37
图 28.....	38
图 29.....	38
图 30.....	39
图 31.....	40

图 32.....	41
图 33.....	42
图 34.....	44
图 35.....	45
图 36.....	45
图 37.....	47
图 38.....	48
图 39.....	49
图 40.....	49
图 41.....	50
图 42.....	50
图 43.....	51
图 44.....	51
图 45.....	52
图 46.....	52
图 47.....	53
图 A1/A2.....	54
图 A3/A4.....	55
图 A5.....	56
图 A6.....	57

表格列表

表 1.....	7
表 2.....	11
表 3.....	12
表 4.....	44
表 5.....	46
表 A1.....	54

第一章：简介

泰克 MDO4000 系列产品代表着一种新的仪器品种：混合域示波器或 MDO。这是第一个专为在时域和频域中、在数字信号、模拟信号和 RF 射频信号之间同时进行时间相关测量而设计的仪器。

本文通过下述方式介绍了这一全新仪器：

- 讨论推动 MDO4000 需求的发展趋势
- 提供 MDO4000 最适合的应用实例
- 汇总 MDO4000 的功能
- 初步介绍 MDO4000 中采用的技术

趋势：无线技术无处不在

近几年来，使用无线技术传送的数据数量一直在迅猛增长。几乎在每个领域中，无线链路都在代替或扩展传统有线通信，例如：

- 照明使用的无线墙上开关和调光装置
- 实用新型产品(如自来水软化器)使用的无线控制/显示面板
- 家庭立体声使用的无线数据连接
- 无线轮胎气压监测传感器
- 便携式视频游戏控制杆之间的无线连接

激增的无线技术包括非开放频段技术和开放频段技术。非开放频段技术主要由广播公司或服务提供商(电视、无线广播、移动通信)使用，开放频段技术则在“自由频段”(蓝牙、无线局域网、车库开门装置、远程无键输入)中在相对较短的距离上运行。

现代无线系统采用完善的调制方案。这些调制方案一般使用数字信号处理(DSP)来实现，可以用笛卡尔复数形式的 I (同相)和 Q (正交)数据来表达，进而用来调制发送的 RF 信号。

顾名思义，现代无线技术同时涵盖了时域和频域。此外，信号存在于三个域中：数字域、模拟域和 RF 频域。

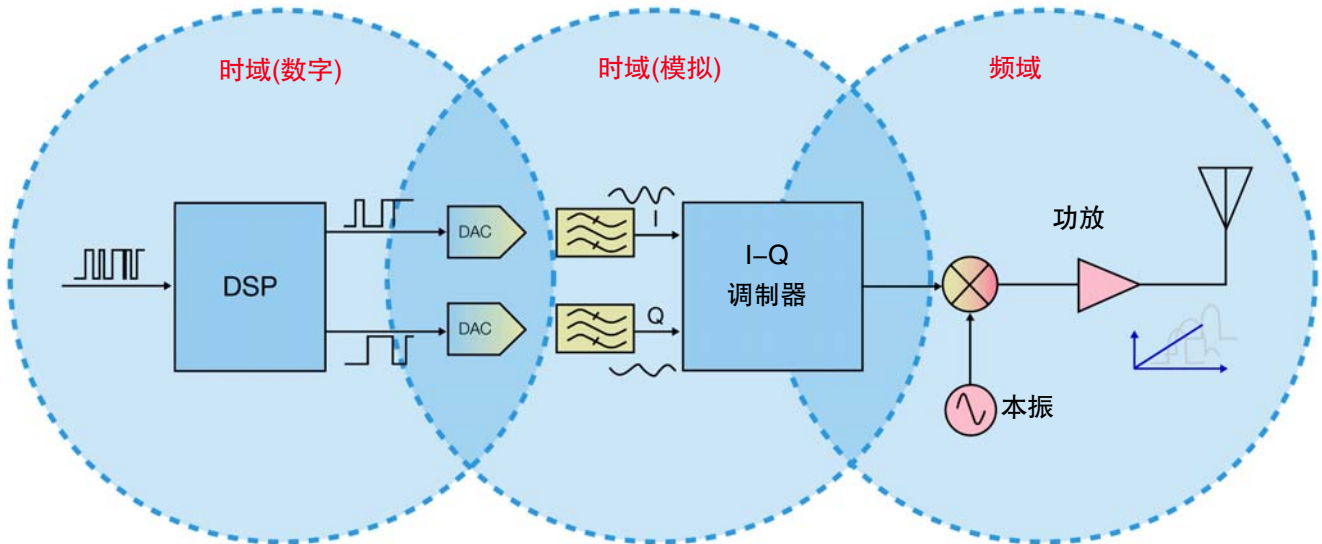


图 1. 现代无线发射机简化的方框图。

若设计人员需要对跨越这三个测量域的系统进行必要的测量、调试和检验，往往需要花费许多的精力与时间。到目前为止，没有任何一台仪器是为这些测量类型与需要而优化的，这样使得设计与调试工作更显艰巨。

他们需要一种为在这三个域中“同时”进行测量的专门设计的测量工具。

趋势：当前嵌入式设计人员的职责不断扩大

无线技术无处不在的这种趋势，给嵌入式系统设计人员的职责带来了深远的影响，为了迎合市场与应用需求，他们正努力在设计中采用一些新兴并自己所不熟悉的 RF 射频技术。

嵌入式设计人员经常发现，自己必需解决许多问题，但在执行任务时却没有所需的适当设备，列举一些例子：

- 设计和调试采用了 ASK 或 FSK 调制方式的简单 RF 链路

- 确定蓝牙无线电集成电路是否以预想的方式传送信号
- 在运行过程中调试 IEEE 802.11 芯片组的程序
- 检测和同步相同频段、相同设备上的多种无线技术，避免自我干扰
- 在通信建立时追踪无线电发射机和接收机之间的交互

作为嵌入式设计人员的首选工具，示波器只是为进行时域测量所优化的。MSO (混合信号示波器)可以同时测量模拟信号和数字信号(包括各种总线数据与指令)，但很难使用示波器在 RF 载波上有效测量 RF 信号。另外，也很难把时域中的事件与频域中的事件充分关联起来，而这一点对查找系统级问题至关重要。

频谱分析仪可以在频域中进行测量，但这些工具并不是大多数嵌入式系统或硬件设计人员的首选工具。在系统其余部分使用频谱分析仪进行时间相关的测量几乎是不可能的。

设计人员需要一种测量工具扩展传统MSO的测量优势，允许用户把频域中的现象与导致这些现象的时域事件关联起来，以便查找这些事件之间的逻辑与时间关系，进而帮助设计人员洞悉与透视系统中的真实情况。

趋势：无线电变成嵌入式系统

在过去20年中，无线电设计一直受到主导电子设计的嵌入式微控制器的发展趋势所影响，其结果是现代无线电包含着多条数据总线(串行总线和并行总线)、多个微控制器和一个重要的软件组件。

无线电设计人员经常发现自己需要解决许多问题，但没有适当的测量与检测设备，例如：

- 确定编程错误是否导致所发送功率偏低
- 查找所发送的无线电信号中造成间歇性串扰的来源
- 检验跳频算法是否正确地工作

作为这些设计人员的首选工具，扫频分析仪是为测量单个频域信号而优化的。它不能测量时域信号，也不能在

RF信号与设备中大量其它电子信号之间提供任何有意义的时间关联。传统扫频分析仪不适合考察随时间变化的RF射频信号，对调试无线嵌入式系统中的问题更是远远不足。

矢量信号分析仪是一种现代型频谱分析仪，是为测量随时间变化的射频信号而开发的。在某些情况下，可以在示波器中增加矢量信号分析软件(如泰克公司提供的SignalVu矢量信号分析软件)，分析随时间变化的RF射频信号；但是，示波器的带宽可能不能直接测量RF载频，或没有足够的灵敏度与动态范围来检定RF射频信号。

示波器可以在时域中进行多通道测量，但在示波器通道上增加矢量分析软件可能会限制示波器进行相干分析的基本功能。对数字状态逻辑信号、模拟信号和RF射频信号进行不同的时域分析，对调试嵌入式系统至关重要。

设计人员需要一个集成了现代频谱分析仪测量优势(矢量信号分析)的测量工具，允许用户简便地进行完善的、时间相关的模拟、数字时域与频域的测量。

趋势：RF信号随时间变化

现代通信越来越多地随时间变化。无线电通常会以间歇方式发送信号，以节约能耗。许多现代调制方案使用扩频技术，在多个频率中编码信号。

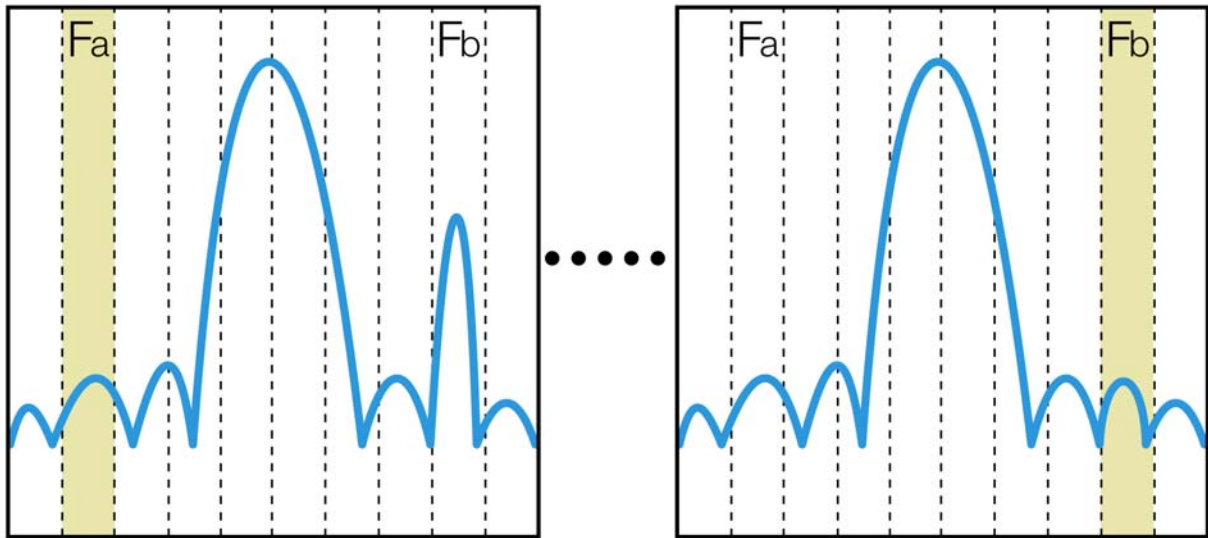


图 2. 由于扫频结构限制了分析过程中关心的频率，传统频谱分析仪可能会漏掉一些随时间变化的突变信号。

通信标准	信道带宽	工作带宽	突发信号的数据包时长
FM 无线电	200 kHz	~20 MHz @ 100 MHz	连续发送
电视广播	6–8 MHz	55 MHz – 700 MHz	连续发送
蓝牙	1 MHz	~80 MHz @ 2.4 GHz	~ 400 us
IEEE 802.11	20 或 40 MHz	~ 80 MHz @ 2.4 GHz; ~ 200 MHz @ ~5.6 GHz	5 us 到几十 us
UWB	> 500 MHzx 3 通道	> 1.5 GHz @3.1–4.6 GHz(频段 1)	每个符号 ~300 ns

表 1. 常见的通信标准 – 传统广播通信(黄色)和现代嵌入式[d3]无线技术(绿色)。

传统扫频分析仪在观察随时间变化的RF射频信号方面是一种有缺欠的工具。如果分析仪在扫描通过该频带后，某突发信号才出现在已扫描过的频带内，那么这个突发信号将不能被捕获。看一下下图：

Fb 处关心的信号以间歇方式广播。在分析仪从 Fa 扫描到 Fb 时，如果在分析仪扫描通过 Fb 时信号恰好没有广播，那么可能会漏掉信号。

设计人员需要一个拥有宽实时频谱捕获带宽的频域测量工具，可以在某个时刻点上进行频域与时域的采集与测量，该时刻点可以由时域中某个指定的事件(如：某种触发条件被满足时)所确定，这可以让系统设计人员了解在某时刻点上，系统中各个信号是如何交互作用的。

趋势：RF 带宽不断提高，信号越来越快

现代通信正在采用带宽越来越宽的调制方案，分组通信的速度正变得越来越快。

看一下下表，其中显示了部分常见的通信标准及对应的信道带宽和工作带宽。注意在较新的调制方案中，信道带宽会大幅度提高：

为高效测量这些现代嵌入式无线技术，通常必需在一个时点捕获整个信道带宽。

虽然传统扫频分析仪可以测量连续广播信号，但它不是为在这些带宽中测量随时间变化的信号而设计的。扫频分析仪的有效频谱捕获带宽低于分辨率带宽(RBW)。由于它采取扫频方式，因此它“看不到”当前扫描频率外面(带外)的信号。扫频分析仪也不能以时间一致的方式，捕获整个频谱。

而且，这些现代信号随时间变化的特点对传统扫频分析仪来说是太快了。在超出RBW的极限时，扫频分析仪在以最快速度扫描关心的工作频段时，只能捕获几十到几百毫秒的时间。但发送的信号发生的时间通常只有几十微秒或以下。

更加现代的频谱分析仪(矢量信号分析仪)一般拥有10 MHz的频谱捕获带宽，可以用于比较老或比较简单的无线通信标准。某些频谱分析仪提供了高达140 MHz的带宽¹，更加适合现代标准，但获得这种性能的同时，其价格也会大幅度提高。

若需要比这更高的频谱捕获带宽，实际上现时还没有专用频谱分析工具可以达到(除了新型的MDO外)。用户被迫使用示波器或运行专用矢量信号分析软件的模数转换器进行测量。遗憾的是，这些时域解决方案在频域测量中性能都比较差，特别是在SFDR指标上。

设计人员需要一个拥有宽频谱捕获带宽的跨域测量工具。

趋势：EMC 仍然非常重要

电磁兼容性或 EMC 一直是现代电子设计的一个重要要素。

然而，这一领域中的问题通常很难调试。进行 EMC 测量的主要问题是法定频率覆盖范围至少为 1 GHz，被测信号可能是间歇性信号或定向信号。

在传统测试设置中，在有接收天线时，可以转动电子设备，这样就可以从所有方向进行测量，在各种高度最大限度地执行测量。但是由于宽频率范围，旋转速率必须非常慢，以允许扫频分析仪在所有方位中绘制准确的辐射画面，因此所耗费的时间也相当长。此外，可以在一个天线高度上最大限度地提高基础频率上的辐射，而在另一个不同高度上最大限度地提高其谐波。了解被测产品的辐射概况，要求能够同时观察所有频率。

如果干扰源是间歇性的，诊断会变得更加困难。使用这些传统测量技术时，几乎不可能把所侦测到的辐射与电子器件或系统中的某个时间关联起来，例如：

- 诊断脉冲性辐射是否与被测器件的存储器被访问或进入诊断状态有所关联
- 在进入和离开低能耗模式时，检测设备启动时或状态变化时所产生的辐射
- 了解辐射是否造成高阶谐波有关

设计人员需要一种拥有宽频谱捕获带宽的频域测量工具，可以在特定时点进行测量，并与时域中所关心的事件互相相关。

¹ 安捷伦 N9030A PXA

趋势：产品开发周期变得更加关键

毫不奇怪的是，世界各地的企业正在更快地把产品推向市场。错过切入市场的窗口或设计周期过长在竞争环境中可能会导致整体的新产品上市的失败。同样明确的趋势是，与此同时，各企业还正在转向“更加精简”的组织架构，以便以更少的投入获得更高的回报。

在这个压力日益提高的设计与竞争环境中，当前测试测量设备并不能很好地顺应上述的趋势。

- 为在多个域中测量信号，需要使用多台测量设备，这提高了资本开支或租赁费用。
- 跨域时间相关测量方式效率低下，甚至是不可能的，大大降低了工程设计的效率。
- 在偶尔使用时，了解怎样使用逻辑分析设备、示波器和RF频谱测量设备涉及到的学习曲线通常要求操作人员重新学习每一台设备的使用方式，费时失事。
- 测量宽带宽、随时间变化与突变的射频信号所需的设备价格昂贵，再次提高了资本开支或租赁费用，使进入无线设备开发的资本门槛相对偏高。

设计人员需要拥有公共用户界面，把多种测量功能集成到一个经济的工具中的测量仪器，可以测量当前跨域环境中宽带宽、并时间相关的信号。

第二章：混合域示波器

泰克 MDO4000 系列混合域示波器是第一个有效解决嵌入式RF射频设计人员面临的所有测量挑战的最佳工具。

MDO4000是混合信号示波器和现代频谱分析仪的整合。但是，通过提供独特的功能，MDO4000混合域示波器实现了真正优于这两种仪器的简单相加。本节将介绍这些独特的功能，并考察这些功能的部分应用。

混合域示波器的主要价值是它能够在多个域中进行时间相关测量：**时域**、**频域**和**调制域**。此外，它可以在多个**模拟信号**、**数字信号**和**RF射频信号**之间进行这些测量与分析。

时间相关意味着混合域示波器可以测量所有输入信号之间的定时关系。例如，它可以测量控制信号与无线电传输开始时间之间的时延，测量发送的无线电信号的上升时间，或测量无线数据流中各码型之间的时间。它可以分析器件状态在变化过程中的电源电压暂降，并这对RF射频信号的影响是怎样的，在时间轴上关联起来。时间相关对了解与诊断整个系统操作至关重要，它可以了解这些时域、频域与调制域事件之间的因果关系。

时域信号以幅度如何随时间而变化的角度来观察是最好的。这些时域信号传统上使用示波器来观测与测量。以幅度随时间变化方式观察信号有助于回答下述问题：“这个电源真的是直流吗？”“这个数字信号是否有足够的建立时间？”“我的RF射频信号打开了吗？”或“通过这条有线总线正在发送哪些信息？”时域信号并不限于模拟输入。观察RF射频信号的幅度、频率和相位怎样随时间变化可以研究RF射频信号简单的模拟调制、启动和稳定等各特点。

频域信号以幅度如何随频率而变化的角度来观察是最好的。这些信号传统上使用频谱分析仪来观测与测量。以幅度随频率变化观察信号有助于回答下述问题：“发送的这个RF射频信号是否位于分配的频谱范围内？”“是不是这个信号上的谐波失真导致器件问题？”或“这个频段内是否存在任何信号？”

模拟信号是电气信号中最通用的信号。在传感器的帮助下,许多物理现象都可以转换成模拟电信号。基本上,模拟电信号的电压会随着时间推移而连续变化。模拟信号连续表示可变现象,如电源输出电压或锁相环控制电压。

数字信号是现代电子器件中的主要信号。通过在两个不同电压之间的切换,这些信号用来以二进制格式编码数字信息。实际上,数字信号也是模拟信号,但通常没有必要(有时会引起混淆)以逻辑电平“1”或“0”之外的方式观察这些信号。数字信号一般用来控制或编码信息(在时域中)。

RF信号可以分为故意信号和非故意信号。非故意信号可以分为电磁辐射(EMI),故意 RF 射频信号主要用于现代无线通信中。在频域中进行信息编码是故意信号的特点。由于与无线电通信相关,RF 射频信号一般使用频率非常高的载波对信息编码。RF 射频信号也是模拟信号,但其调制方案、频率和无线传输使它们自成一派。

传统上,测量这里讨论的信号需要使用三种不同的仪器:

- 示波器,这是为在时域中对模拟信号进行时间相关测量而优化的。
- 逻辑分析仪,这是为在时域中对数字信号进行时间相关测量而优化的。通常为简单起见,逻辑分析仪会代替混合信号示波器。混合信号示波器是增加逻辑通道或数字通道的示波器,是为数字信号和串行总线解码与触发而优化的。
- 现代频谱分析仪,这是为在频域中对RF射频信号进行测量而优化的,基于矢量信号分析结构。

MDO4000 混合域示波器是第一台为使用一台仪器在时域和频域中对全部三种信号(模拟信号、数字信号和 RF 射频信号)进行时间相关测量而优化的仪器。

MDO: 优于示波器

大多数示波器能够计算和显示采集的时域信号的快速傅立叶变换或 FFT。从表面上看,这似乎为许多用户提供了充足的频域分析功能。普通示波器即使有 FFT 功能,在进行频域测量中仍是次优方案。

与普通示波器(即使有 FFT 功能)相比,MDO 混合域示波器有多个主要优势:

- 它拥有一条专用 RF 输入通道,为频域测量提供了杰出的功能、动态范围、灵敏度和保真度。
- 其结构允许在时域通道和频域通道上独立设置采集参数。
- 在多个输入中进行采集,并可以实现样点对准(基于跨域的触发电路)和多域样点的时间相关。
- 为显示和控制频域测量通道优化的用户界面,节省学习与熟悉使用多台仪器的时间。

MDO4000 混合域示波器型号	模拟通道带宽	RF 射频输入频率范围
MDO4104-6	1 GHz	50kHz to 6 GHz
MDO4104-3	1 GHz	50kHz to 3 GHz
MDO4054-6	500 MHz	50kHz to 6 GHz
MDO4054-3	500 MHz	50kHz to 3 GHz

表 2. MDO4000 混合域示波器各型号

专用 RF 通道

第一个主要优势是采集能力。MDO4000 混合域示波器基本上是在 MSO4000 系列混合信号示波器中增加了一个专用的 RF 射频输入通道。除测量 RF 射频信号使用的单独专用输入外，这个输入提供了多个重要优势(不是一般频谱分析仪可以实现):

- 输入频率范围大
- 杰出的保真度
- 低噪声性能
- 集成的多域样点对准功能
- 与所有其它输入通道共享和集成的跨域触发功能

为进行频谱测量，要求能够测量高频信号的输入。许多现代通信信号在 2.4 GHz 和 5.8 GHz 的 ISM 频段中运行。即使在频率相对较低的 900 MHz 系统上进行测量，也要求 4.5 GHz 的输入频率范围，以检查五阶谐波。

尽管示波器提供了可以测量这些信号的带宽，但其一般比较昂贵，因为所有输入通道承载相同的带宽等级。MDO4000 上的专用 RF 射频输入通道为典型 RF 射频信号提供了能满足要求的性能，而不要求每条模拟通道都等于该带宽性能。因此，其在模拟通道和 RF 射频通道上都实现了充足的性能水平，同时仪器价格与主流示波器相当。MDO4000 混合域示波器提供了四种型号：

在 RF 射频信号上进行测量时，信号保真度也同样重要。

频谱分析仪中最重要保真度指标是无杂散信号动态范围(SFDR)。这个指标表明了频谱分析仪在大幅度信号存在时检测和测量小幅度信号的能力。

与输入相关的杂散信号是由于用户信号与测量仪器之间的交互而产生的。它们很难“修复”，因为其频率和幅度会随着输入信号的变化而变化。

残余杂散信号是表明测量仪器内部所产生的信号泄漏到信号路径中的部分的大小。它们消除起来比较容易，因为其一般是静态的，但如果用户信号位于大体相同的频率上，则可能会出现这个问题。

由于示波器的通用性特点，它的杂散响应一般要比普通的频谱分析仪要差。

低噪声性能指标对测量低电平信号及发射机的带外辐射非常重要的。

	MDO4000 指标	普通示波器指标 ²	普通频谱分析仪指标 ³
输入频率范围	50 kHz–3 GHz	DC–3.5 GHz	100 kHz–3 GHz
输入相关杂散信号	–60 dBc 标称值, 有时为 –50 dBc	–45 dBc 标称值	–60 dBc 标称值, 有时为 –40 dBc
残余杂散信号	–90 dBm, 有时为 –80 dBm	–70 dBm	–90 dBm, 有时为 –70 dBm
显示的平均噪声(DANL)	–152 dBm/Hz 典型值 (5 MHz–3 GHz)	无 ⁴	–125dBm/Hz(10 MHz – 50 MHz) –123dBm/Hz + 3.79 x (频率在几 GHz – 1GHz) (50 MHz– 2.7 GHz)

表 3. 典型的 SFDR 指标。

MDO4000 混合域示波器上的专用 RF 射频输入通道解决了这些问题，其杰出的保真度填补了这些产品类别之间的空白。上面列出了部分主要指标。

MDO4000 混合域示波器较传统的示波器在这些性能上得以改进，是因为采用了专用 RF 射频输入通道，允许其采用高保真度的 RF 射频衰减器器件、屏蔽与优化了的信道及先进的信号处理技术，如采用添加高频振动来模糊模数转换器量化的分辨率，并改善其线性化，从而增加信道的信噪比。这些技术不能用于普通模拟示波器模拟输入通道上，因为所采用的 RF 射频衰减器，它将会影响到示波器的模拟通道带宽是否能达到 DC (比方说：MDO4000 的专用 RF 射频输入通道是由 50KHz 开始的)。并且在模数转换中采用高频振动模糊技术的话，在时域中将会被显示为噪声。

独立采集时域和频域

第二个主要优势是 RF 射频通道控制和设置是独立于其它示波器通道的。在示波器上使用 FFT 进行频域测量的一个缺点，是特定频域测量要求的采样率和记录长度设置还会影响其它示波器通道。这通常意味着一次只能在一个域中进行测量。在用于频域测量时，时域显示通常价值不大。在用于时域测量时，频域显示通常价值不大。如果想进一步了解时域设置和频域设置之间的交互，请参阅下面的“采集原始的 RF 时域数据记录”。

² 泰克 DPO7354，在典型生产仪器上测量，性能没有保障

³ 安捷伦 CSA 频谱分析仪技术数据指南列明的安捷伦 CSA 性能，2010 年 9 月。安捷伦科技公司版权所有。

⁴ 如果没有考虑矢量信号分析软件，实现频率、跨度和解析带宽控制，那么 DANL 在示波器上没有意义的。

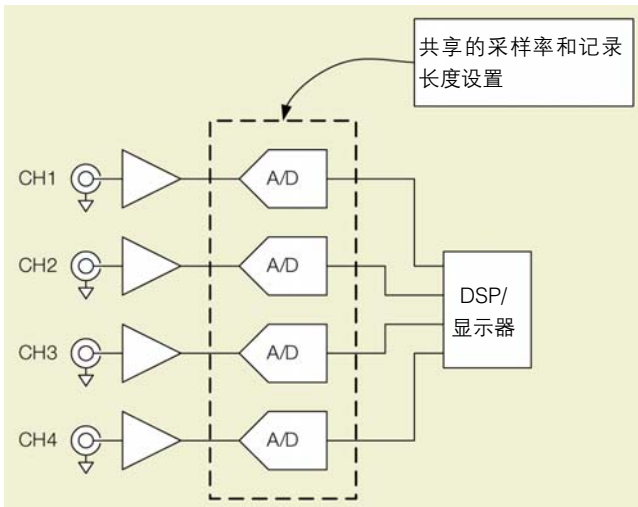


图 3. 典型的示波器结构。



图 5. MDO4000 混合域示波器频域画面的用户旋钮。

下面是简化的普通 4 通道示波器的结构，可以看出这种局限性。

相比之下，MDO 混合域示波器拥有与 RF 射频输入相关的专用独立采集系统，可以独立控制采集参数，在进行频域测量时实现优化显示。还可以以类似方式优化时域采集参数，在该域中进行显示。这两个采集域同步化，从而实现采集数据的时间相关，如下图 MDO4000 混合域示波器的简化方框图所示。

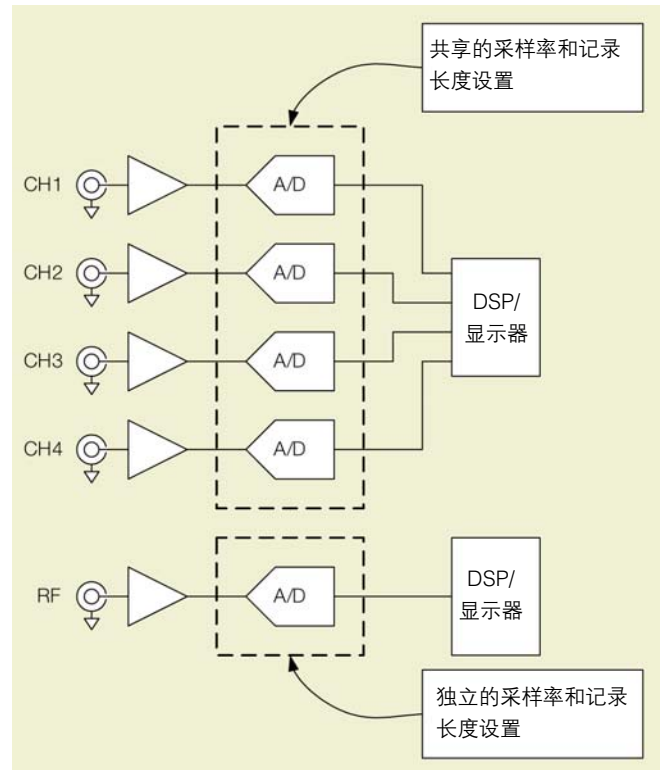


图 4. MDO4000 混合域示波器简化的采集系统。

为频域测量优化的用户界面

最后一个优势是用户界面。在普通示波器上使用 FFT 进行频域测量的另一个明显问题，是其用户界面是为时域测量而优化的。因此，一般频谱分析仪的参数，如中心频率、跨度和 RBW 分辨率带宽，在这样的界面上是很难被调节的(用户需要调节示波器的记录长度，采样率等时域概念来控制如 **中心频率**、**跨度**和 **RBW** 分辨率带宽等频域概念)。调节画面一般需要手动计算采样率和记录长度等时域参数。获得确切的所需设置通常也是不可能的。

此外，FFT 通常以与时域曲线相同的方式显示，并且在与时域曲线相同的窗口中显示，因此经常会导致客户对这些画面发生混淆。

MDO4000 混合域示波器消除了这些问题，它提供了直观的用户界面和显示功能，这些用户界面和显示功能是为同时分析时域和频域优化的，并在任何时候在各域之间保持时间相关。

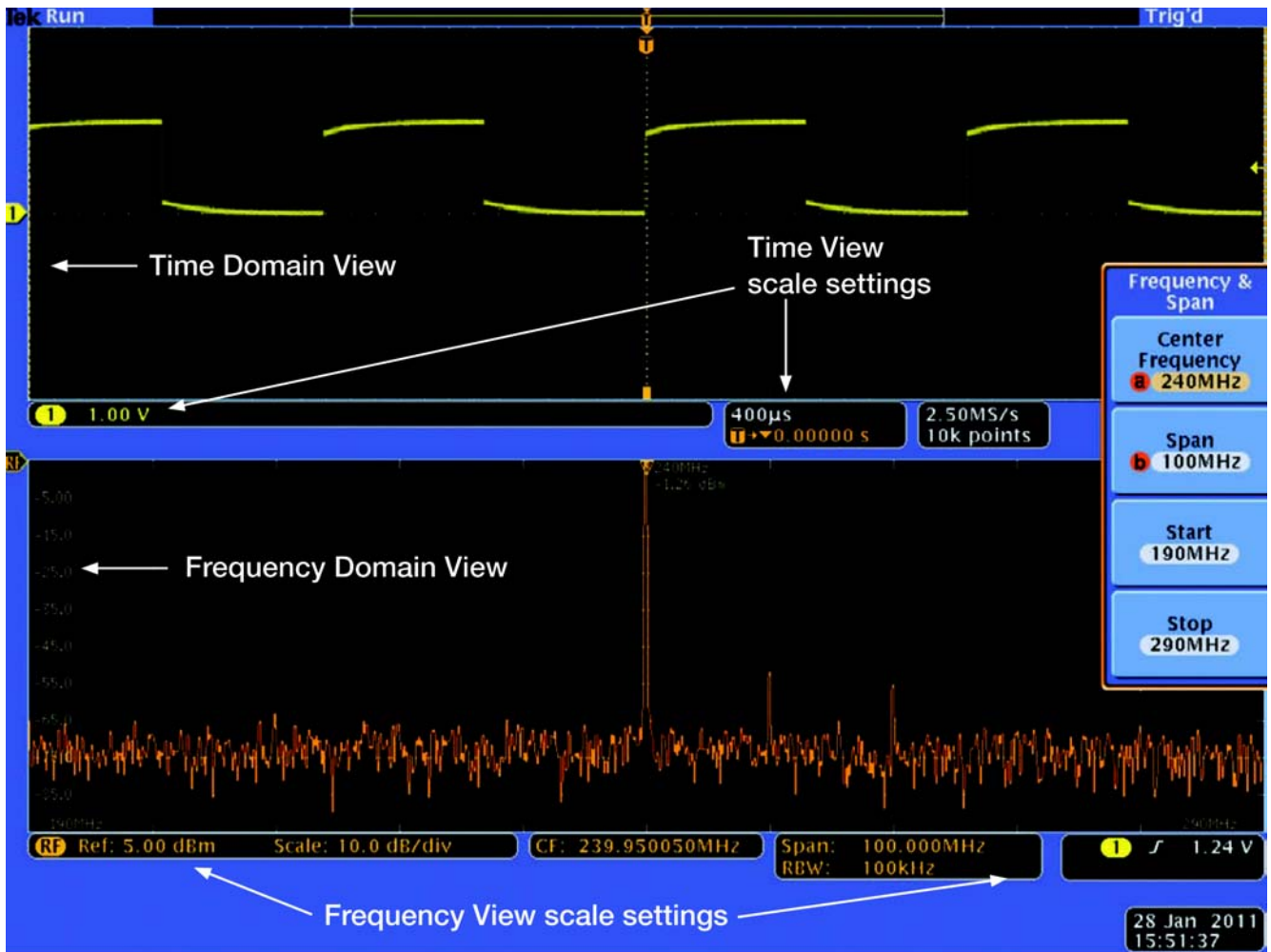


图 6. MDO4000 混合域示波器时域视图和频域视图显示概况

可能最重要的是，其用户界面还是为同时观察时域信号和频域信号优化的，提供了这些域之间交互的重要信息。下面的截图说明了用户界面和显示功能的专用特点。下面“MDO4000: 强大的功能组合”中提供了进一步细节。

注意下面几点：

- 时域数据显示在顶部的显示窗口中
- 频域数据显示在底部的显示窗口中
- 每个窗口的相应读数
- 相应的频域菜单选项

MDO：优于频谱分析仪

大多数频谱分析仪能够以“零跨度”画面的形式显示时域数据。从表面上看，这似乎为许多用户提供了充分的时域分析功能。但实际上，普通频谱分析仪(即使有零跨度功能)对进行时域测量来说也是次优方案。

与普通频谱分析仪相比，MDO 拥有多个主要优势：

- 多条输入通道，包括模拟、数字、总线等，提供系统级洞察力
- 一条专用RF输入通道，多个并发的时间相关的频域和时域视图，提供系统重要信息
- 能够观察RF信号随时间的变化，而没有传统频谱分析仪的结构限制
- 基于时间的宽频谱捕获带宽采集结构，可以简便地分析随时间变化、快速发生的RF信号

多条输入通道

第一个主要优势源于多条输入通道。MDO4000 混合域示波器利用MSO专用示波器和数字通道，得到一个能够超越普通频谱分析仪单通道功能的信号测量产品。

现代RF射频信号由复杂的嵌入式系统来生成、接收和管理。串行和并行数据总线用于不同组件之间的通信。可以由微处理器来管理电源。RF射频系统本身可以是更大的电子器件的一部分，预计提供与RF射频系统相关的进一步功能。

趋势是RF射频信号在现代电子系统中被“孤立”的可能性变成小得多。由于传统频谱分析仪只有一条输入通道，专门用来进行简单的RF射频测量，因此它不能采集嵌入式设计(RF, 模拟, 数字)的整套信号以及它们之间的交互。

MDO4000 系列混合域示波器提供了一套完整的输入通道：

- 4条模拟时域通道，500 MHz 或 1 GHz 带宽，拥有串行总线解码和触发功能
- 16条数字时域通道，高达 60.6 ps 定时分辨率，拥有串行总线解码和触发功能
- 1条RF频域通道，拥有3 GHz 或 6 GHz 输入频率范围

更重要的是，这些输入通道在时间上是相关的。混合域示波器可以显示与测量从发送给RF发射机的串行数据命到达的时刻，到RF突发脉冲被发射时刻之间的定时关系，从而了解电子系统内部多个信号之间的交互关系，这样对透视、诊断和调试设备的行为至关重要。

尽管示波器用户已经熟悉这一领域的这种多通道视图，混合域示波器使得频谱分析仪用户第一次能够轻松获得多通道同时分析的优势。

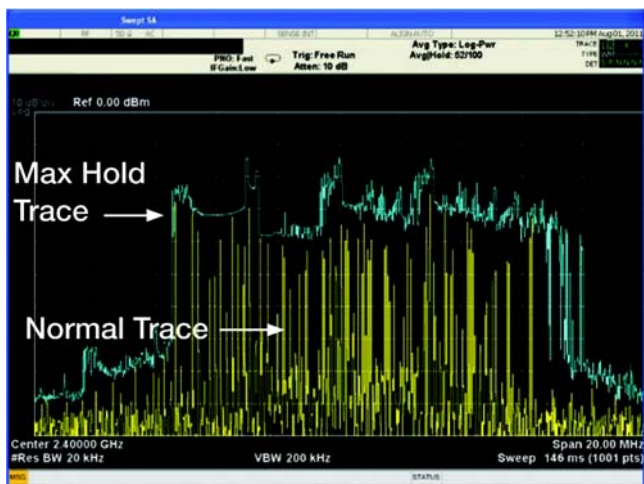


图 7. 频谱分析仪以 20 kHz 的 RBW 测量 20 MHz 频谱中的信号。

同时的 RF 信号时域与频域视图

由于能够同时观察随时间变化的信号的时域和频域，因此了解信号行为的真正特点现在要容易得多了。一些简单的射频事件，如跳频信号，使用传统的频谱分析仪很难得到概括的了解。下面的实例演示了MDO混合域示波器结构的优势。

传统的频谱分析仪会扫描用户自定义的频谱。在图 7 所示的实例中，传统频谱分析仪被设置成以 20 kHz 的分辨率带宽扫描通过 20 MHz 的频谱。在这些设置下，频谱分析仪的扫描时长默认为 146 ms。在 Max Hold 曲线(蓝色曲线)和 Normal 曲线(黄色曲线)中，很难从累积的或瞬时的频谱视图中了解信号的时域特点。使用传统频谱分析仪观察这个信号时域特点的唯一方式是采用零跨度模式；但是，频谱分析仪零跨度模式下的时域带宽受到频谱分析仪最大分辨率带宽的限制。由于这个信号的频谱

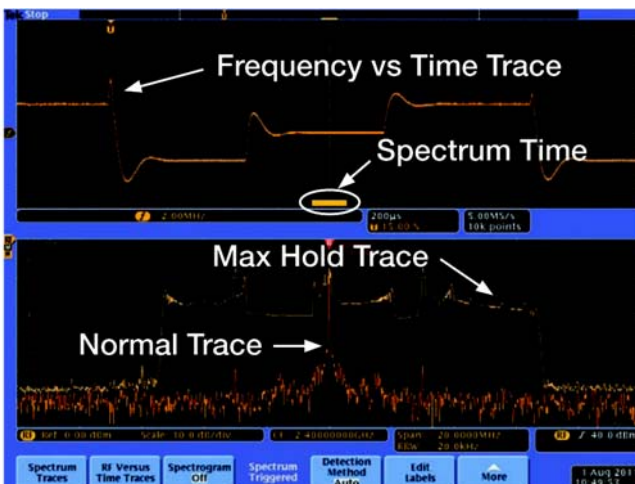


图 8. 相同的信号和设置，在 MDO 上的时域和频域视图。

特点明显超出了典型频谱分析仪的分辨率带宽的极限 (10 MHz)，因此使用传统频谱分析仪零跨度模式并不能观察这类信号。此外，在传统频谱分析仪中选择零跨度模式时，信号的频谱视图就无法提供了。

图 8 是现在在 MDO4000 上时域画面和频域画面观察的同一信号。在显示的 Max Hold 和 Normal 曲线中，现在很明显这个信号不象传统频谱分析仪看到的那样乱。Normal 曲线显示了与时域画面中显示的频谱时间相关的信号的 FFT(时域和频域相关部分将详细讨论频谱时间)。在频谱分析仪的 RBW 设置下，显示这个信号要求的采集时间称为频谱时间。这个采集时间小于 115 us，代表着图 7 中信号的相同带宽，但信号采集速度要快 1300 倍。

了解 RF 信号并发的时间和频率视图提供了必要的信息，可以了解现代信号特点，正确进行测量设置。在概括介绍频谱分析仪结构时，我们将详细讨论这个实例。

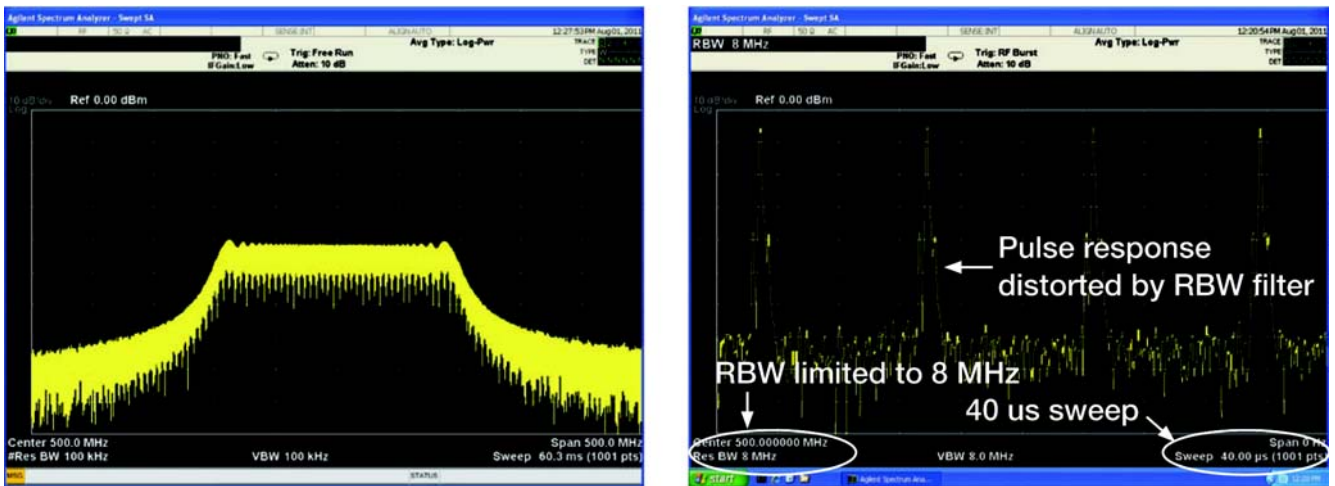


图 9 (a,b). 显示了宽带脉冲信号 (a)在零跨度时的频谱(b)它的时域视图。

RF 信号随时间变化的视图

传统频谱分析仪的时域视图只能分析信号幅度随时间变化，如前所述，传统频谱分析仪不能同时显示信号的频谱和时域视图。此外，传统频谱分析仪不能随时显示频率和相位随时间的变化。考虑到这些局限性，我们将比较 MDO4000 混合域示波器在观察脉冲式信号时与传统频谱分析仪相比的优势，其中所使用是相对重复性、不随频率变化的信号。

图 9 (a/b)显示了脉冲式信号的频谱和零跨度视图。图 9 (b)中的零跨度画面显示了幅度随时间变化的时变特点。这个信号似乎是某种脉冲式能量，占空比约为每 10 us。在 RBW 设置成频谱分析仪最大值时，传统频谱分析仪的零跨度模式可以最好地表示信号的时域视图。如果信号的上升时间比输入信号的 RBW 快，那么幅度随时间变化的画面就是一个扭曲的表达。

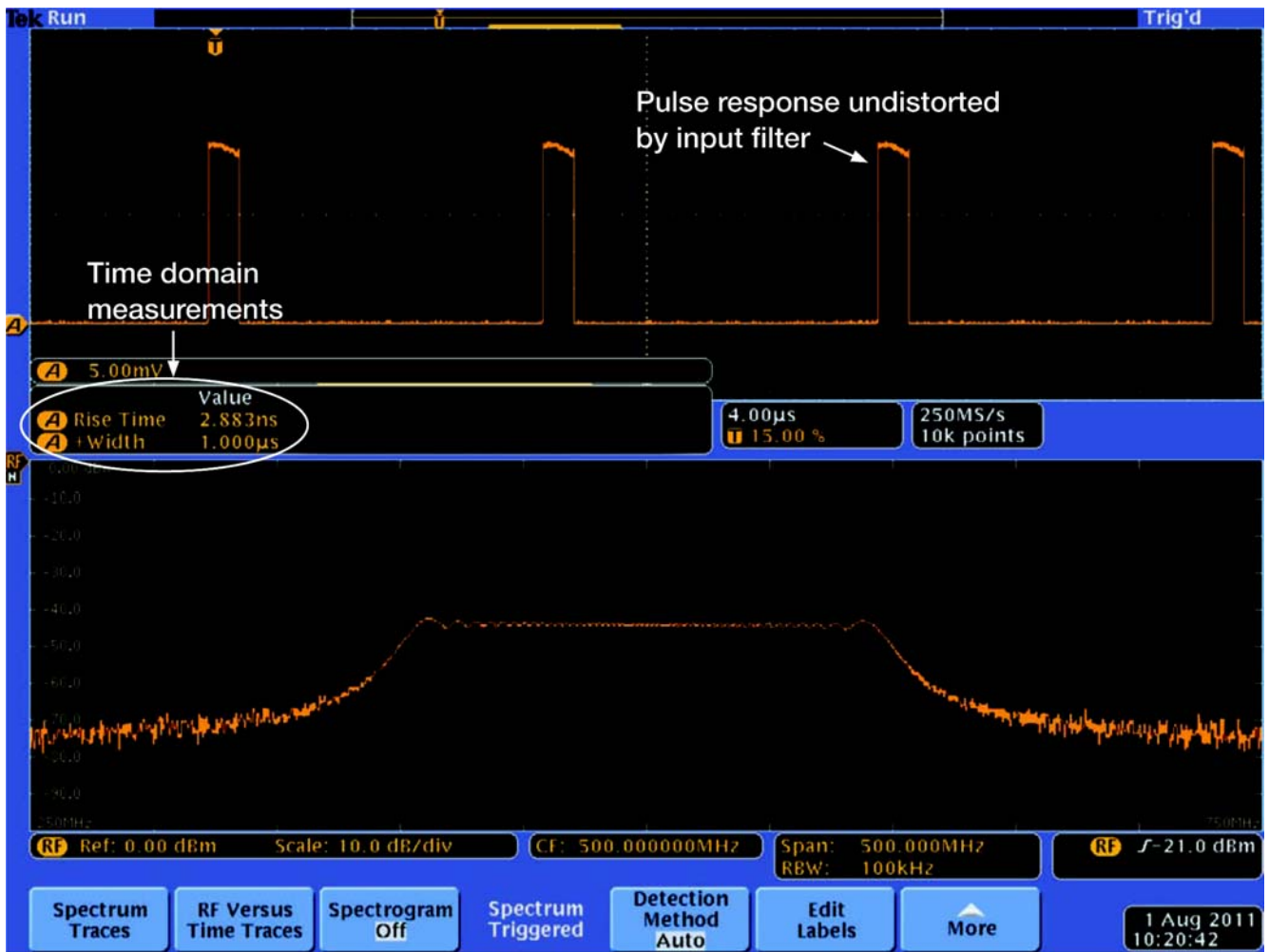


图 10. 带时域测量的脉冲式信号的时域和频域视图。

图 10 显示了同一信号的时域与频域画面同时在 MDO4000 混合域示波器被显示。注意时域画面可以立即看到幅度随时间的变化和测量。对比图 10 中的幅度随时间的变化与传统频谱分析仪图 9(b) 的零跨度画面, RBW 的限制导致的信号失真就十分明显了。幅度随时间的变化曲线中的测量中得知, 信号的上升时间为 2.883 ns, 脉冲时长为 1 µs。

传统频谱分析仪带宽和 RBW 有限, 因此不能准确地显示或测量上升时间。MDO4000 混合域示波器不仅能够观察 RF 射频信号随时间的变化(包括幅度、相位和频率随时间的变化), 而且其结构不会象传统频谱分析仪那样导致信号的时域曲线失真, 因为 MDO4000 混合域示波器的时域视图不受仪器的 RBW 设置限制。

基于时间的宽频谱捕获带宽采集技术

几十年前，当频谱分析仪刚刚面世的时候，需要进行频域分析的RF射频信号在时间上都是相当稳定的，而且所采用的都是简单的窄带调制方法，如AM调幅或FM调频等。然而，几十年过后，当前数字通信的趋势，明显是信号更多的是随时间而变化的，多采用了复杂的数字调制方法，并且采用了不少涉及突发的传输技术。这些调制方法还可能有非常宽的带宽(比方：透过采用扩频或跳频技术来降低EMI的干扰或抗干扰能力)。

为了满足现代测量的带宽要求，MDO4000混合域示波器保证提供1GHz以上的实时频谱捕获带宽。因此，在1GHz及以下的跨度设置时，MDO4000根本不必“扫描”画面，频谱从单次采集中就能生成，其时间跨度由RBW设置来确定。传统扫频分析仪或窄带FFT分析仪需要大量的时间(扫描时间)才能捕获与跨度相关的频率范围。例如：

- 在跨度设置为40MHz，RBW设置为30kHz时：
 - MDO4000 频谱时间：74.3 us
 - 普通频谱分析仪扫描时间：116.4 ms⁵

可以看到，MDO4000混合域示波器能够采集必要的数数据，速度比频谱分析仪快1000倍！这大大改善了了解快速变化信号在特定时点上频谱内容的能力。

传统扫频分析仪可以更快地进行扫描，但在扫描速度提高时，其幅度或相位精度会变差。相比之下，MDO4000混合域示波器将在没有失真的情况下，在最短时间内捕获整个跨度的数据。直接提高RBW设置会降低采集数据的时间跨度。我们将在下一节“时域和频域相关”中讨论这种关系。

如果想进一步了解这些关系，请参阅“采集原始RF时域数据记录”部分。

为了处理这些现代应用中信号随时间而变化的特性，MDO4000混合域示波器提供了一个跨域的触发采集系统，它全面集成了时域模拟、时域数字与频域的触发采集系统，用户可以在相关频域事件发生的时刻点上，精确捕获所有当前的时域模拟波形、时域数字与总线的定时、状态与编码，以及射频通道的频谱和射频信号随时间的变化。

值得一提的是，若需要时，可以关闭频域触发，当频域数据是连续的，但是与时域中所发生的事件无关的时候，这种功能非常合用。

⁵ 安捷伦 CSA



图 11. MDO4000 混合域示波器的前面板

MDO4000: 强大的功能组合

如前所述，MDO4000 混合域示波器提供了独特的功能组合，本节将重点介绍这些功能。

应该注意的是，本节所介绍的功能是除了 MSO4000 系列混合信号示波器提供的全套时域测量功能以外的，专属于 MDO4000 混合域示波器的独特功能。

专用频谱用户界面

与任何基于示波器的其它频谱分析工具不同，MDO4000 混合域示波器为进行频谱测量提供了专用前面板旋钮和优化的菜单结构：

前面板按钮可以直接进入下述菜单：

- **RF**；用来打开频域轨迹，控制频谱图画面，定义检测方法。

- **Freq / Span**；用来定义频谱画面的中心频率和跨度或开始频率和终止频率。
- **Ampl**；用来设置频谱画面的参考电平、垂直标度和位置以及垂直单位。
- **BW**；用来设置分辨率带宽和 FFT 窗口类型。
- **Marker**；用来打开峰值标记和手动标记，在相对标记读数 and 绝对标记读数之间变化，把参考标记移到中心，定义所谓峰值的垂直电平。

此外，可以使用数字键盘，简便地输入精确值。

显示画面根据需要自动管理时域和频域窗口。RF 时域数据显示在时域窗口中，一同显示的还有模拟或数字通道的其它时域数据。频谱数据一直显示在独立的频域窗口。

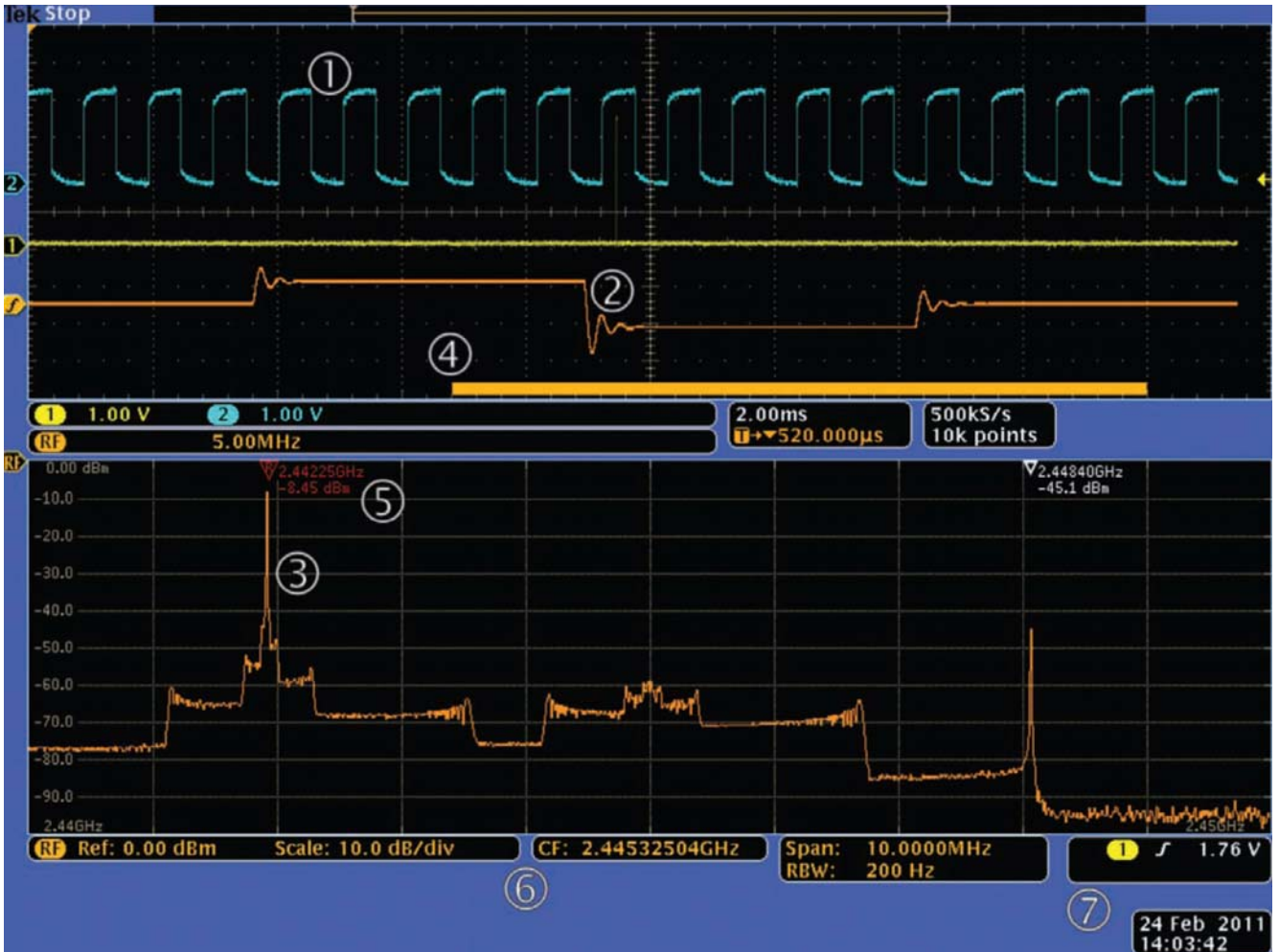


图 12. MDO4000 混合域示波器的显示要素。

这个截图显示了下述要素：

- 时域曲线：**“Normal”示波器曲线。在本例中，黄色曲线(通道 1)是控制跳频的信号(作为触发源使用)，蓝色曲线(通道 2)是系统时钟。
- RF 时域曲线：**这是一条专用时域曲线，是从 RF 输入中导出，允许用户观察 RF 输入幅度、相位或频率随时间变化的情况。橙色曲线“f”显示了频率随时间的变化，标度为 5.00 MHz/division。所有 RF 时域曲线都是从 RF 射频通道采集的时域 IQ 数据中导出的。它们与其它模拟通道和数字通道相关，代表连续的时域数据流。如需进一步了解怎样计算和显示这些 RF 时域曲线，请参阅“生成 RF 时域数据”。
- 频谱曲线：**普通频谱分析仪曲线。与传统频谱分析仪曲线一样，可以观察不同的曲线类型：Max Hold、Average、Normal 和 Min Hold。如需更多信息，请参阅“频谱曲线”部分。
- 频谱时间指示符：**指明频谱采集发生的时点位置。这条曲线是从单次的采集中导出的，它代表了一连续的时域数据流，这时域数据流与其它时域模拟和时域数字通道所采集的时局，在时间上是相关的。
- 峰值标记：**自动给出峰值的频率和幅度读数。如需更多信息，请参阅“标记”部分。
- 频域设置：**关键频域参数读数，包括 Ref Level、中心频率、跨度和 RBW 设置。
- 触发设置：**关键触发参数读数。如需更多信息，请参阅“触发”部分。

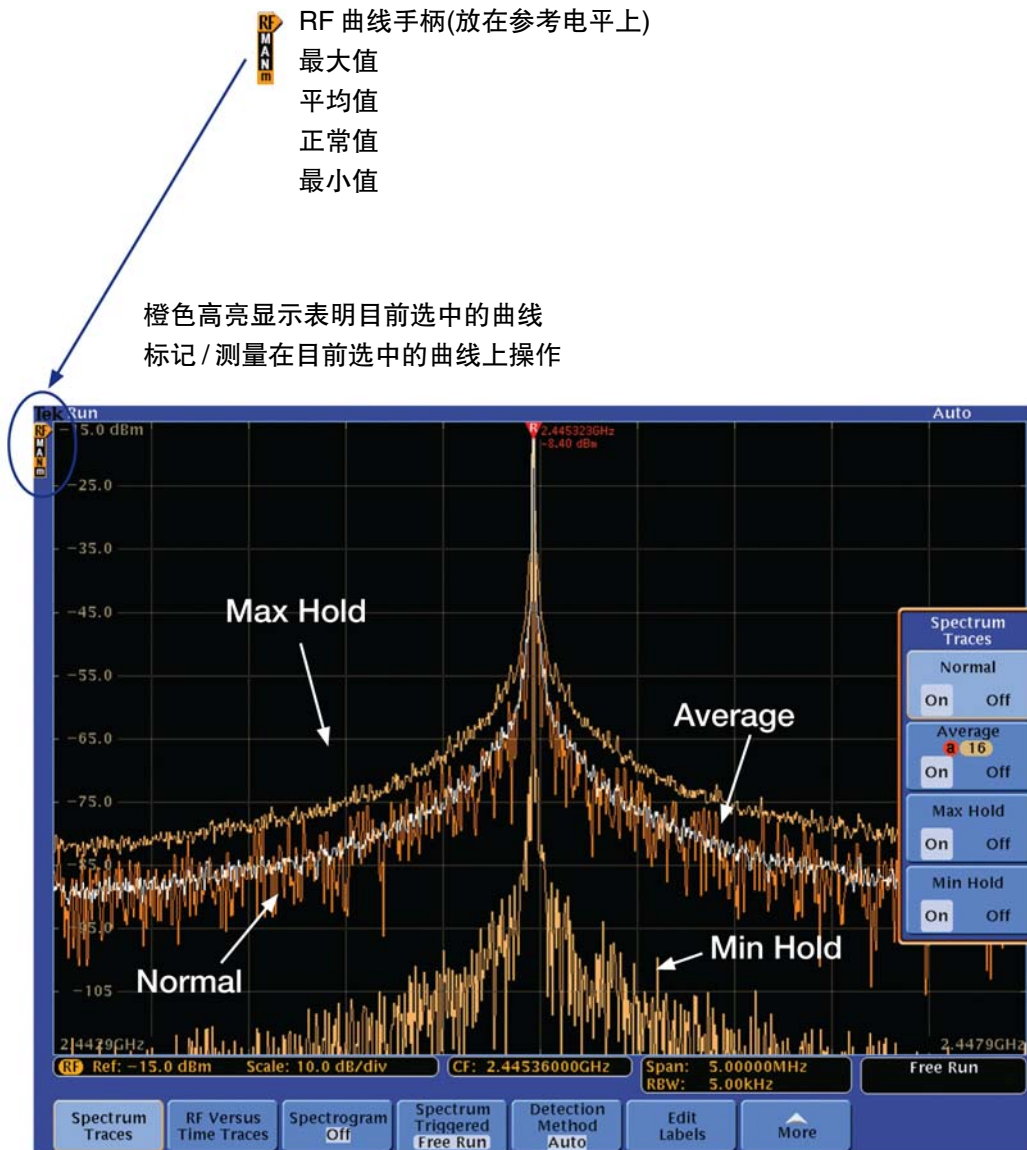


图 13. 频谱曲线

频谱曲线

频域窗口支持四种频谱曲线，包括：

- **Normal:** 每次新采集都会替换“Normal”曲线。
- **Average:** “Average”曲线代表最后 N 条“Normal”曲线的平均值。数据是在多次采集上平均的。这是真实功率平均，发生在对数转换之前。每个 2 的幂数平均都会把显示的噪声降低 3 dB。
- **Max Hold:** 多次采集累积的“Normal”曲线中的最大数据值。

- **Min Hold:** 多次采集累积的“Normal”曲线中的最小数据值。

每条曲线都可以独立打开和关闭，也可以同时显示全部四条曲线。

图 13 显示了测量 CW 信号的四条曲线。标记和测量可以参考任何曲线，因此可以使用 RF 曲线手柄指明曲线参考源。

在采集参数变化时，Max Hold、Min Hold 和 Average 曲线自动复位，消除了使用不同采集设置获得的多条曲线合成时产生的画面混淆问题。

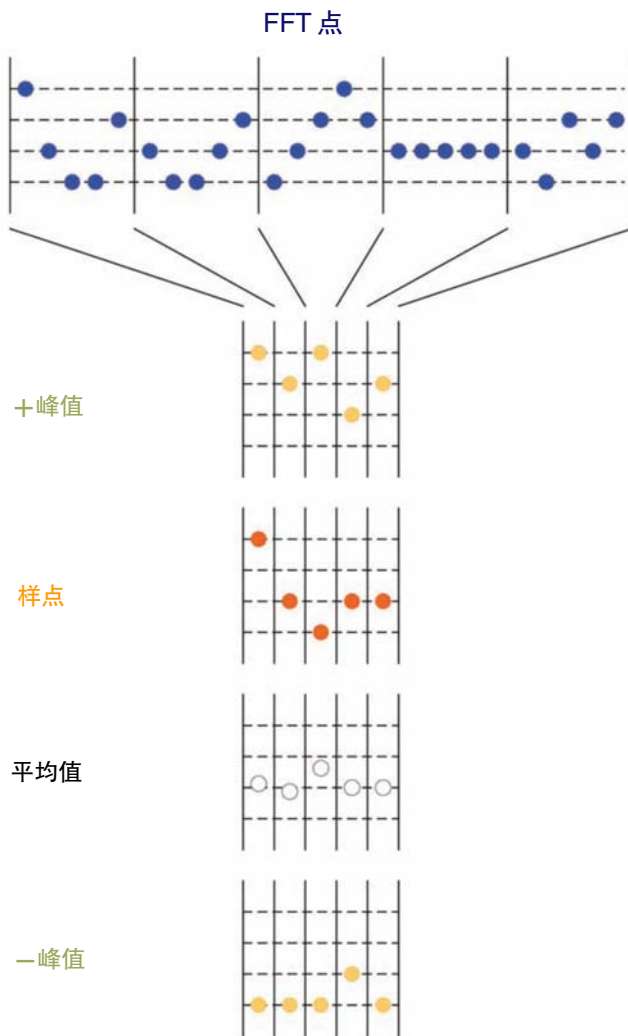


图 14. 创建曲线使用的检测方法。

检测器

检测器在输入信号分析和测量及曲线生成中发挥着重要作用。有四种基本检测方法：+Peak、Average、Sample 和 - Peak。与传统频谱分析仪不同，MDO 的频谱曲线是基于所采集的 RF 信号的时间样本数据再进行 FFT 计算而得出的。由于采集 RF 射频信号的采样率为 10 GSa/s，因此必需在计算 FFT 之前，尽量减少或压缩被采样的数据量。这个压缩过程取决于选择的检测器类型。

MDO4000 混合域示波器可以在任何地方执行 1,000 点到 ~ 2,000,000 点的 FFT 计算，具体位置视乎采集的跨度和分辨率带宽设置而定。检测方法用来确定怎样把 1,000–2,000,000 点 FFT 输出压缩到 1,000 像素宽的画面。压缩因数决定着每组数据压缩中使用多少个数据样点。压缩工作方式如下：

- + Peak — 使用一个 FFT 数据集中幅度最高的点
- Sample — 使用每组中第一个点。
- Average — 平均一组中所有点。
- - Peak — 使用一个 FFT 数据集中幅度最低点。

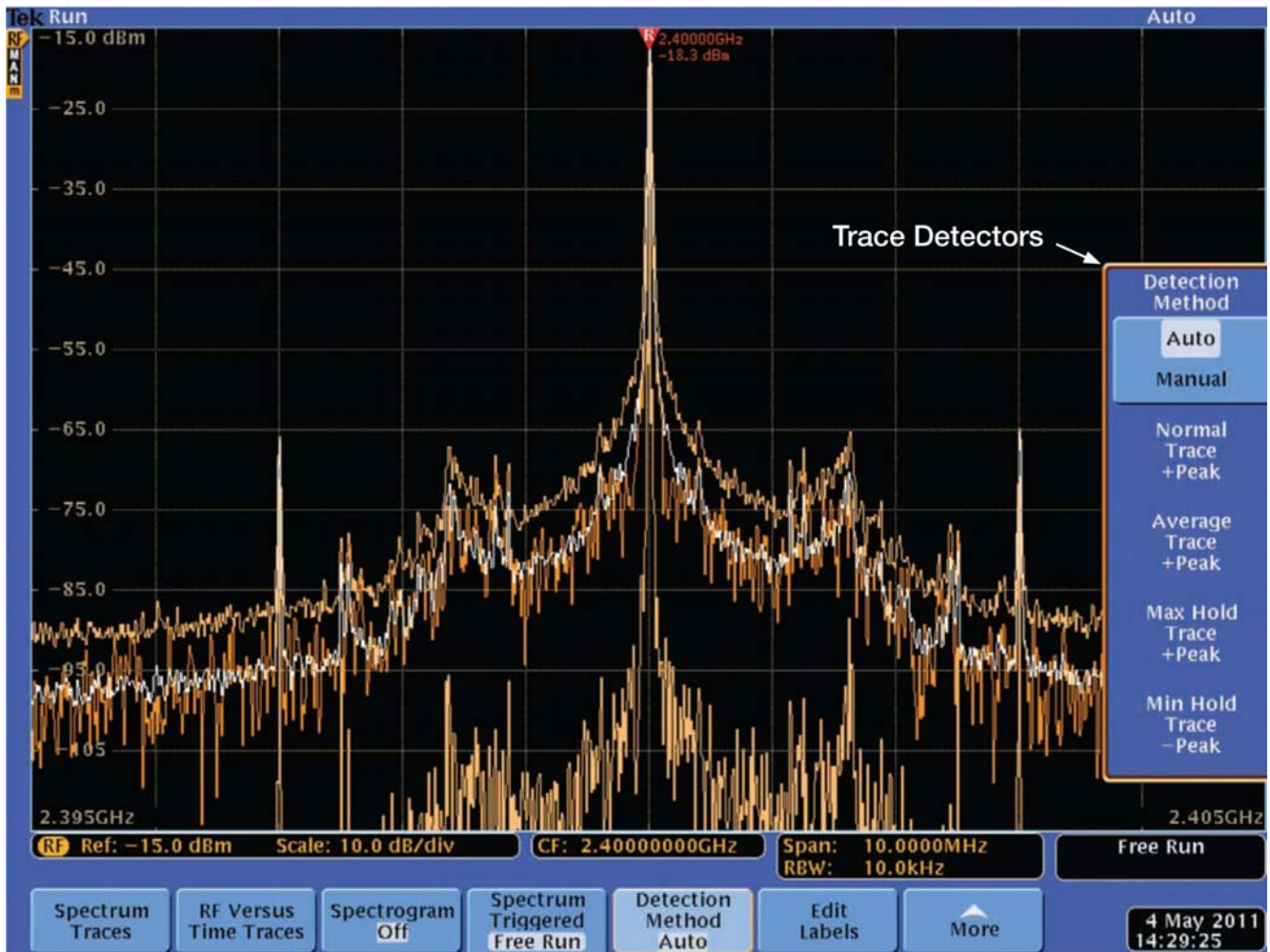


图 15. 检测方法的控制。

MDO4000混合域示波器可以灵活地手动控制检测方法，但应该指出的是，每条曲线都有设定的默认值，具体视乎RF射频测量是打开还是关闭(详情请参阅“RF射频测量”部分)。在RF射频测量关闭时，每条曲线默认的检测器如下：

- Normal: +Peak
- Average: +Peak
- Max Hold: +Peak
- Min Hold: -Peak

在RF射频测量打开时，每条曲线默认的检测器如下：

- Normal: Average
- Average: Average
- Max Hold: Average
- Min Hold: Average

- 在所有情况下，用户需要时都可以使用手动控制功能。

RF 时域曲线

除所有普通模拟通道和数字通道外，时域窗口还支持三种RF时域曲线，这些曲线从RF输入的底层时域IQ数据中导出，可以分析RF射频输入的关键参数，包括：

- Amplitude 幅度；输入信号在当前频率范围(由中心频率和跨度设置所确定)经过带通滤波后的瞬时幅度。
- Frequency 频率；输入信号相对于中心频率的瞬时频率。
- Phase 相位；输入信号相对于中心频率的瞬时相位。

每条曲线都可以独立打开和关闭，可以同时显示三条曲线。

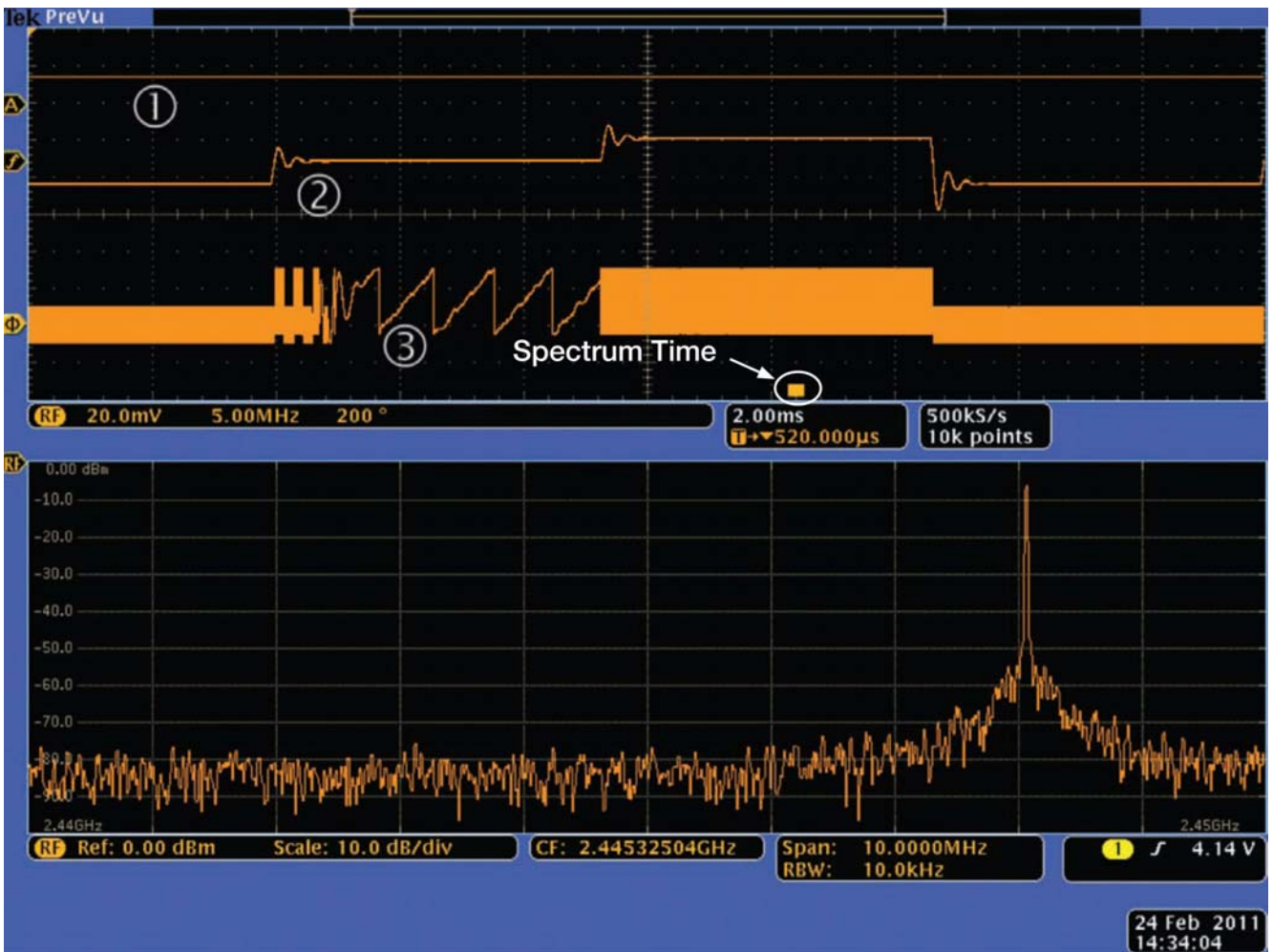


图 16. RF 时域曲线。

图 16. RF 时域曲线这个截图(带有频率振铃的跳频信号)中显示了下述几种曲线:

1. **幅度随时间变化的曲线:** 注意在信号在不同频率之间跳动时, 幅度基本不变。
2. **频率随时间变化的曲线:** 纵轴是相对于中心频率的频率。信号从低于中心频率的频率(屏幕左边边缘上的信号)跳到大体位于中心频率的频率, 再跳到高于中心频率的频率, 然后再跳回来(屏幕右边边缘上的信号)。注意使用这条曲线, 可以很容易看到信号在不同频率之间跳动时出现严重的频率振铃。

3. **相位随时间变化的曲线:** 纵轴是相位, 以大约 $\pm 180^\circ$ 包起。注意中间跳频与中心频率之间略微不匹配, 因此在跳频期间, 相对于中心频率的相位缓慢变化。为分析相位随时间变化, 最好在被测器件与MDO之间采用锁相参考。在余下的跳频期间, 频率不匹配非常大, 相位变化表现为实心边带。

所有这些曲线都是从 RF 射频通道所采集的时域 IQ 数据中导出的, 它与其它模拟通道和数字通道所采集的数据是时间相关的, 也代表了 this RF 射频信号在时域连续数据流。

如需进一步了解怎样计算和显示这些 RF 时域曲线, 请参阅“生成 RF 时域数据”。



图 17. 频谱时间指示符。

时域和频域相关

如前所述，所有时域数据和频域数据都时间相关。所有模拟通道、数字通道和RF时域曲线都一起显示在上方的时域窗口中。与任何 DPO/MSO4000 系列示波器一样，这些曲线在时间上都是相关的，可以使用 Wave Inspector、多功能标记、测量和光标等进行分析。

我们在画面中增加了一个新的指示符，指明生成频谱画面使用的数据的时间位置。这个橙色条称为频谱时间指示符，在下面的截图中的时域窗口底部可以看到这个指示符：

从频率随时间变化曲线(时域窗口中的橙色曲线“f”)中可以看到，这是图 16 RF 时域曲线中显示的相同的跳频信号。

注意下面几点：

- 在频率随时间变化画面和频谱画面中可以清楚地看到信号从一个频率跳到另一个频率时的频率振铃，两个圈选的曲线段突出显示了这一点。
- 在频谱时间上(用橙色条显示),信号在大多数时间位于最低频率。在①处可以看出这一点，其在④处导致了一个高幅度峰值。
- 信号位于中间频率(接近中心频率)的时间最短(由于振铃)。在②处可以看出这一点，其在⑤处导致了一个低幅度峰值(超过振铃看不到)。
- 信号有相当一部分时间位于最低频率点，这在③处可以看出这一点，其在⑥处导致了一个中等幅度的峰值。另外注意，在这个频率上没有表现出任何振铃。这是因为信号进入频谱时间区间后开始变得稳定。由中频跳变到高频所引起的相关振铃超出了频谱时间的范围。

当我们对比图 16 与图 17，我们会发现图 16 的时基比图 17 的时基要快 10 倍(由 2ms/div 加快到 200ns/div)。这是一个快得多的跳频信号。在图 17 中，RBW 分辨率带宽是 2KHz，频谱时间比任何一个频率点上所停留的时间都要长。希望看到某一个跳频点上的频谱，必须更宽的分辨率带宽来缩短总体的采集时间。

Wave Inspector 旋钮控制着频谱时间(用橙色条指明)相对于其它时域曲线的位置：

- 频谱的默认位置在时域窗口中心。
- 在放大时，频谱跟随放大窗口。
- 在关闭缩放时，如上图所示，可以使用卷动旋钮，移动频谱数据的相对位置。

频谱时间指示符有助于精确测量瞬态和短时长 RF 射频信号的功率。通过保证信号在整个频谱时间中是稳定的，在频谱画面上的幅度将是准确的。这个可以在时域窗口中简便地被检验。本应用指南附录一中更详细地阐述了 RBW 与窗口函数的关系。

触发

由于 MDO4000 混合域示波器把频谱分析仪集成到基于时域的采集系统中，因此整个采集过程可以启动于一个被满足的跨域触发条件。在上面的实例中，跳频信号在画面中是稳定的，因为示波器是由跳频的控制信号所触发的(黄色曲线 CH1 上的窄脉冲，图 17 中频谱时间指示符)。

MDO4000 混合域示波器在 DPO/MSO4000 系列触发系统中增加了下述功能：

- 能够在下变频后，基于 RF 输入的整体功率电平进行边沿触发(详情请参阅下面的“模块下变频”)。
- 能够在下面的触发类型中使用 RF 输入作为触发源：
 - 边沿
 - 顺序(B 触发)
 - 脉冲宽度
 - 欠幅脉冲
 - 逻辑，结合其它模拟和数字输入

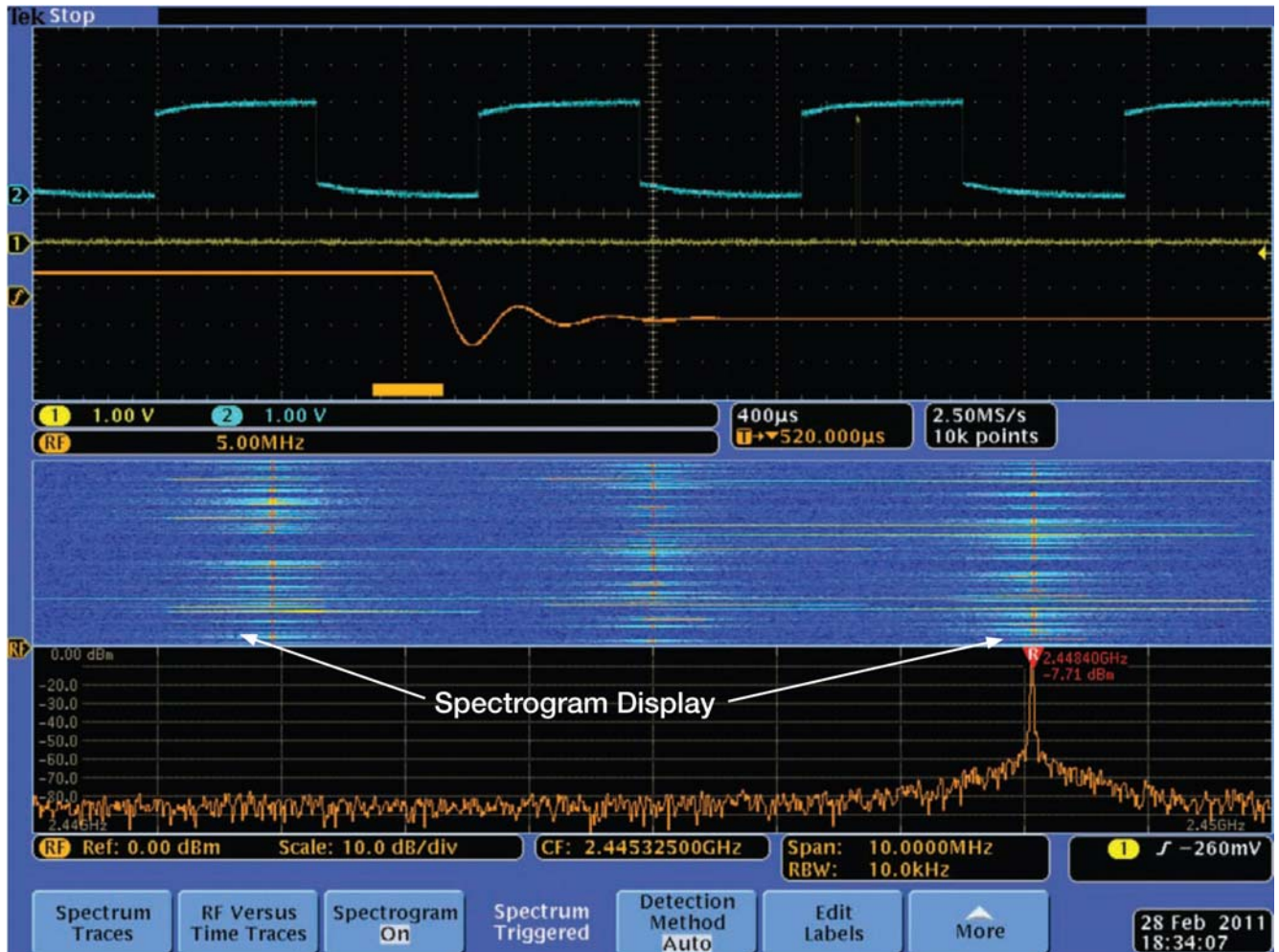


图 18. 频谱瀑布图

频谱图

MDO4000 混合域示波器提供了频谱瀑布图画面。这个画面可以提供以相对较低速率改变频率的RF信号中有关频率随时间变化的重要信息。

频谱瀑布图是一系列“被垂直竖立起来”的频谱曲线“片段”的堆叠，并使用颜色对应信号的幅度进行编码。在单独的“片段”中，若信号幅度低时，用蓝色来表达，在信号幅度高时，用红色来表达。然后，将这些“片段”都

垂直被堆叠起来，最新的频谱位于频谱图的底部。如需进一步了解这一画面是怎样生成的，请参阅“生成频谱图”。

上面的截图显示了频谱瀑布图的画面：

注意即使没有任何一条频谱曲线显示所有跳频，但频谱瀑布图仍清楚地表达了信号的跳频特点。一旦停止采集，通过滚动所捕获的频谱曲线数据历史，可以观察以前发生的频谱。

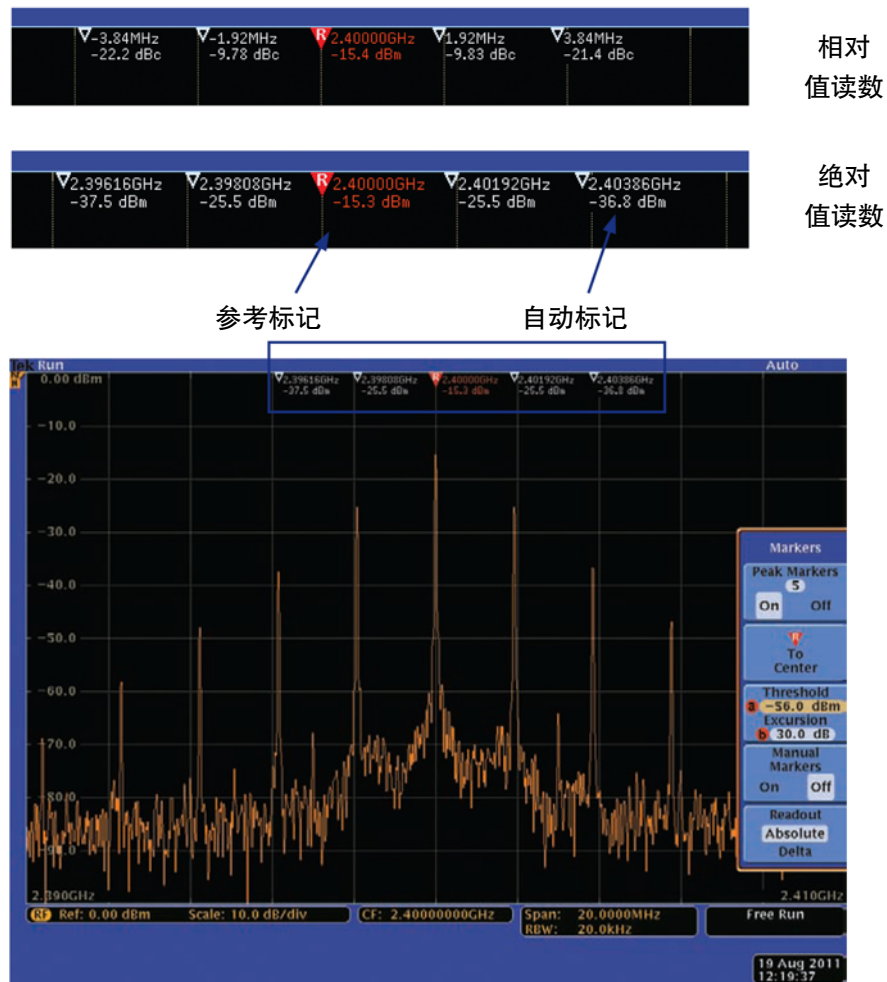


图 19. 自动峰值标记。

标记

MDO4000 混合域示波器同时利用频谱分析仪和示波器的最佳模式，在频域窗口中实现了标记功能。

它利用 DPO/MSO4000 系列示波器强大的搜索功能，提供自动峰值标记功能。这种功能在默认情况下打开，不仅自动识别单个最高峰值，还识别满足用户指定标准的另外 10 个峰值，如下面的截图所示：

“参考标记”自动设置成最高峰值。参考标记在上面的截图中用红色表示，之后的四个标记自动设置成后面四个最高峰值。

峰值读数可以设置成绝对值或增量(相对值)。在设置为相对值时，其相对于参考标记测得。

在提供相同数据前提下，我们把 MDO4000 混合域示波器的标记功能与传统的频谱分析仪的操作作一下比较：在传统的频谱分析仪上，你需要

- 打开标记。
- 使用标记到峰值导航控制功能(如有),移动到相应的峰值。
- 对其它标记重复这一过程。

另外注意峰值标记会持续自动更新。如果信号频率变化，峰值标记会一直附着在峰值上。这与某些频谱分析仪上的追踪功能类似，但同时适用于所有峰值标记。

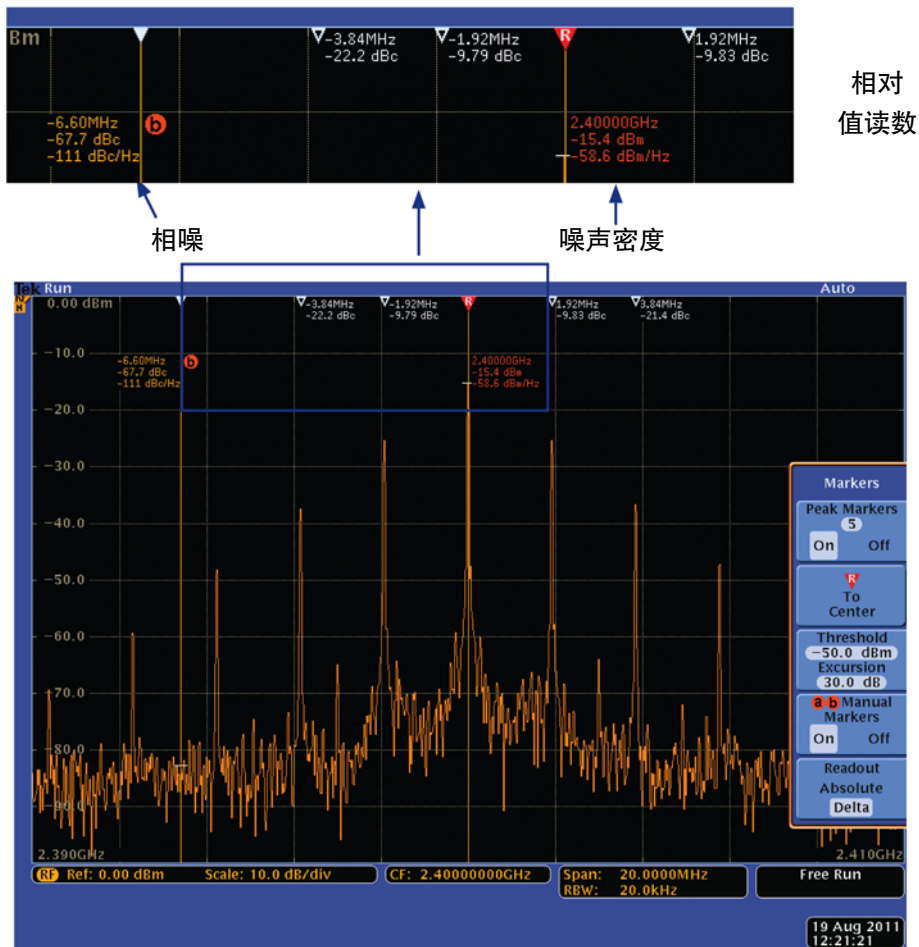


图 20. 手动标记

通过增加手动标记，用户可以手动测量偏离信号峰值的频谱成分。下图说明了这一功能。

注意已经打开两个手动标记。参考标记自动变成 **a** 标记。

与峰值标记一样，手动标记可以读出绝对值数据或相对值数据。在这个截图中，其设置成相对值。注意参考标记幅度为正的峰值读数，它测量的是频谱幅度相对较低的部分。

此外，**a** 标记和 **b** 标记都为进行噪声密度测量(绝对值读数)和相位噪声测量(相对值读数)提供了频谱密度读数。

提供了 Marker to Center 功能，以调节中心频率，把参考标记带到屏幕中心。

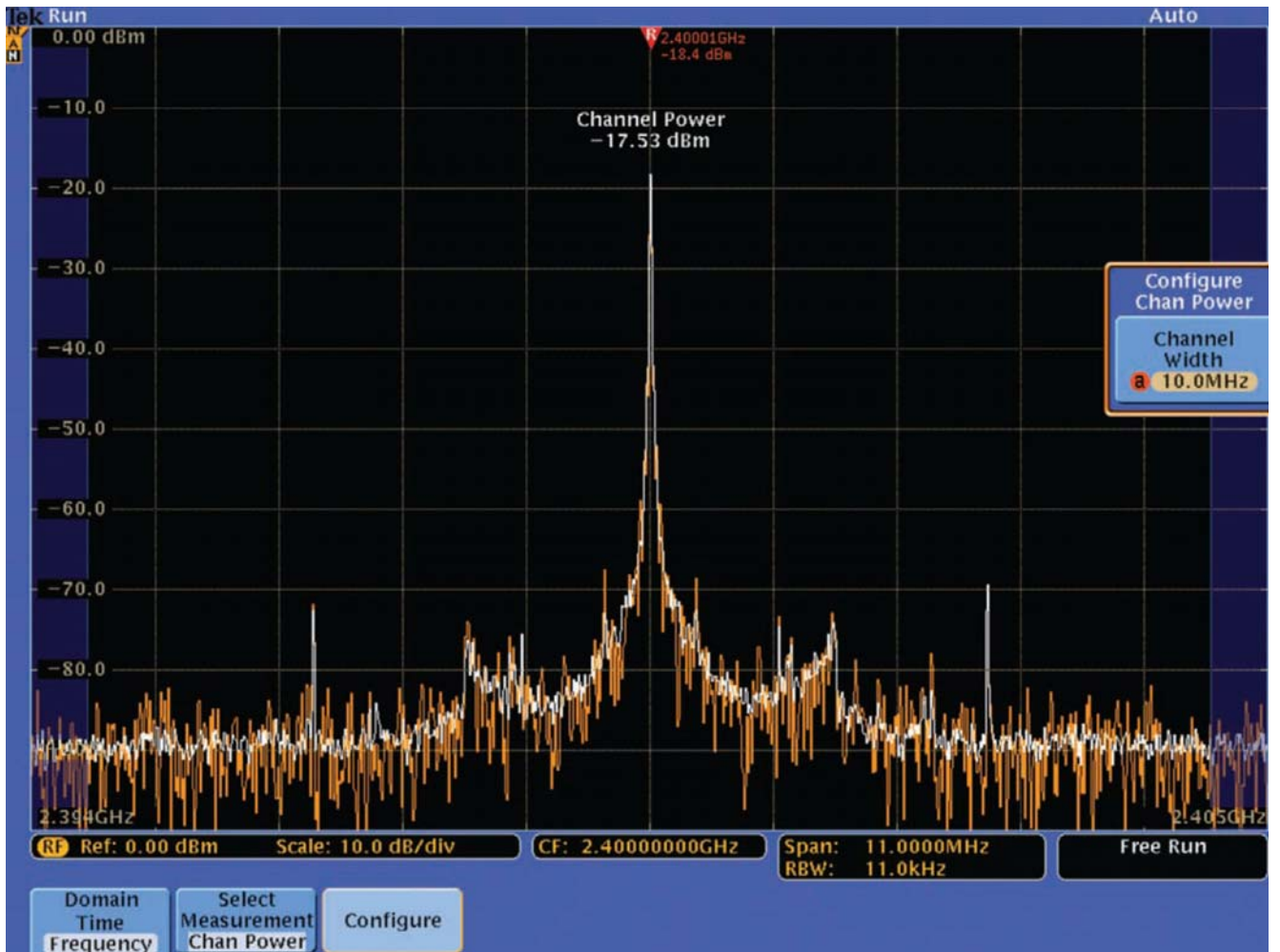


图 21. 通道功率测量

RF 测量

MDO4000 混合域示波器支持大量的专用 RF 射频测量，包括通道功率、邻道功率比和占用带宽测量。

通道功率

通道功率能够在用户定义的带宽范围内测量总功率。图 21 画面中不带阴影的部分表明了通道宽度。在这一测量激活时，跨度自动设置成比通道宽度宽 10%。

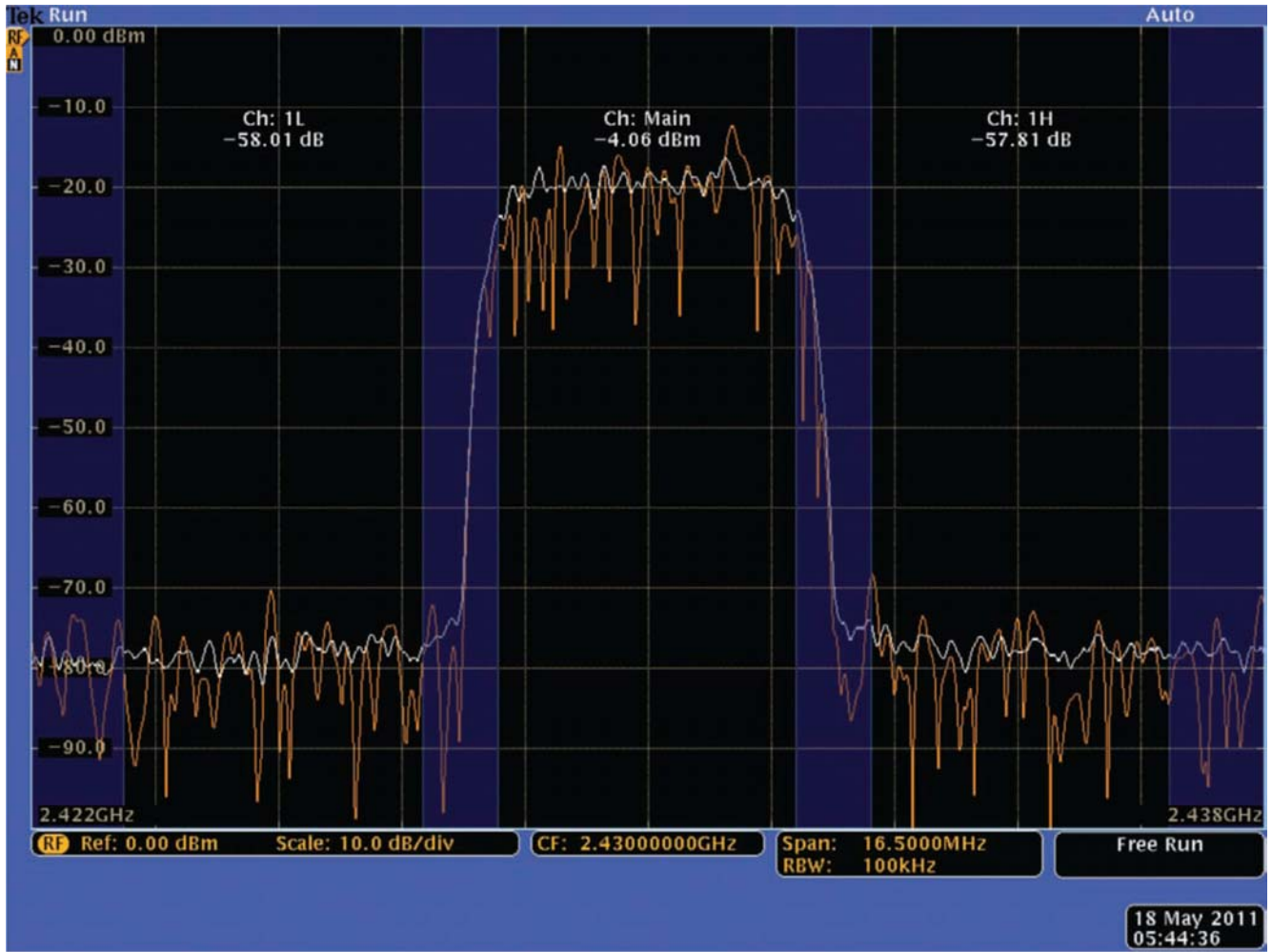


图 22. ACPR 测量

邻道功率比

邻道功率比或 ACPR 测量返回主通道中的功率及通道功率与主通道相邻的上方通道和下方通道的主功率之比。

用户可以定义通道,用画面中不带阴影的部分指明通道。在这一测量激活时,跨度自动设置成比捕获所有通道要求的跨度大 10%。

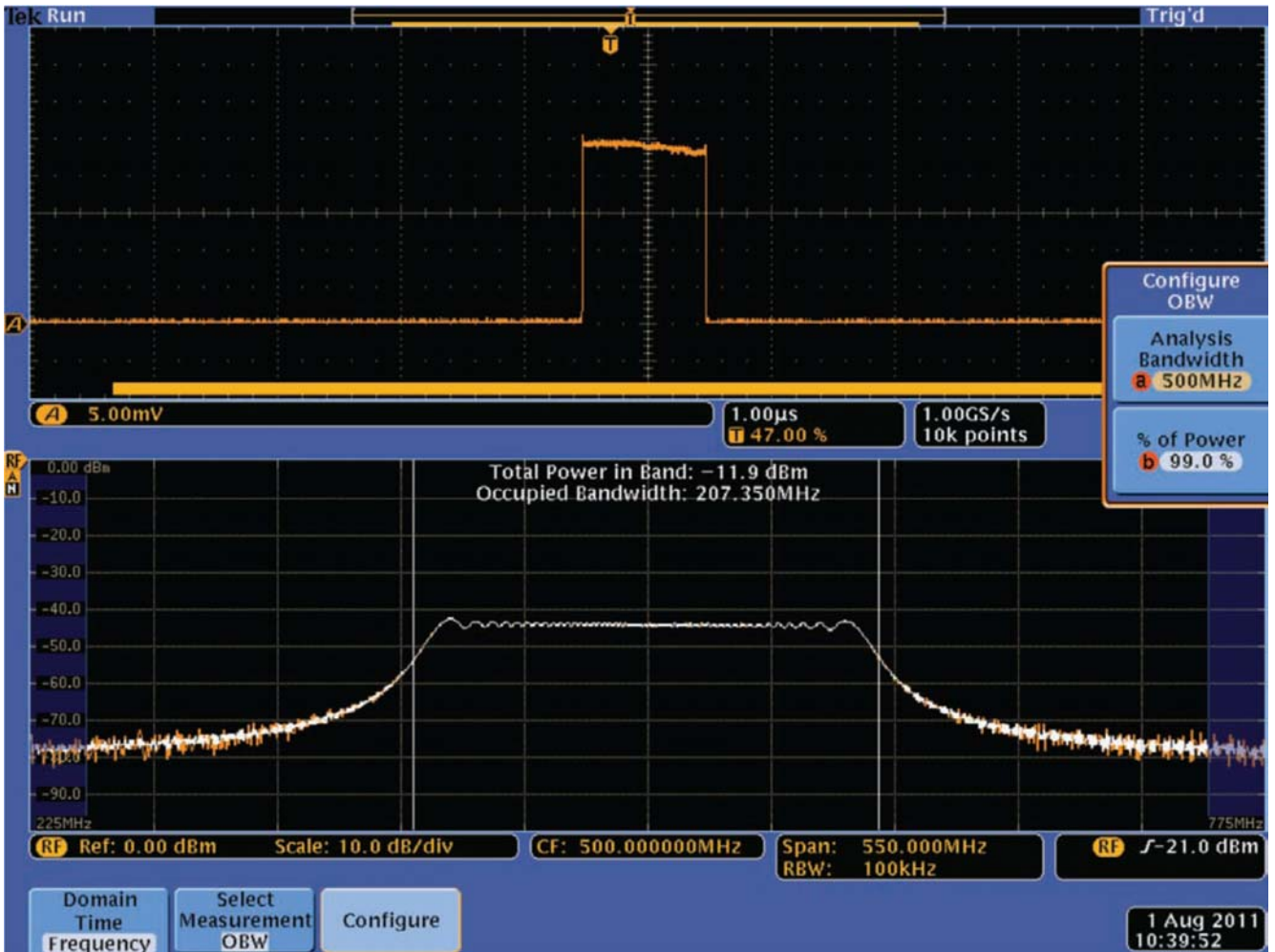


图 23. OBW 测量。

占用带宽

占用带宽或 OBW 能够测量用户定义的分析带宽内包含指定功率百分比的带宽。

在 OBW 测量激活时，跨度自动设置成比分析带宽宽 10%，分析带宽用频谱画面中不带阴影的部分表明。

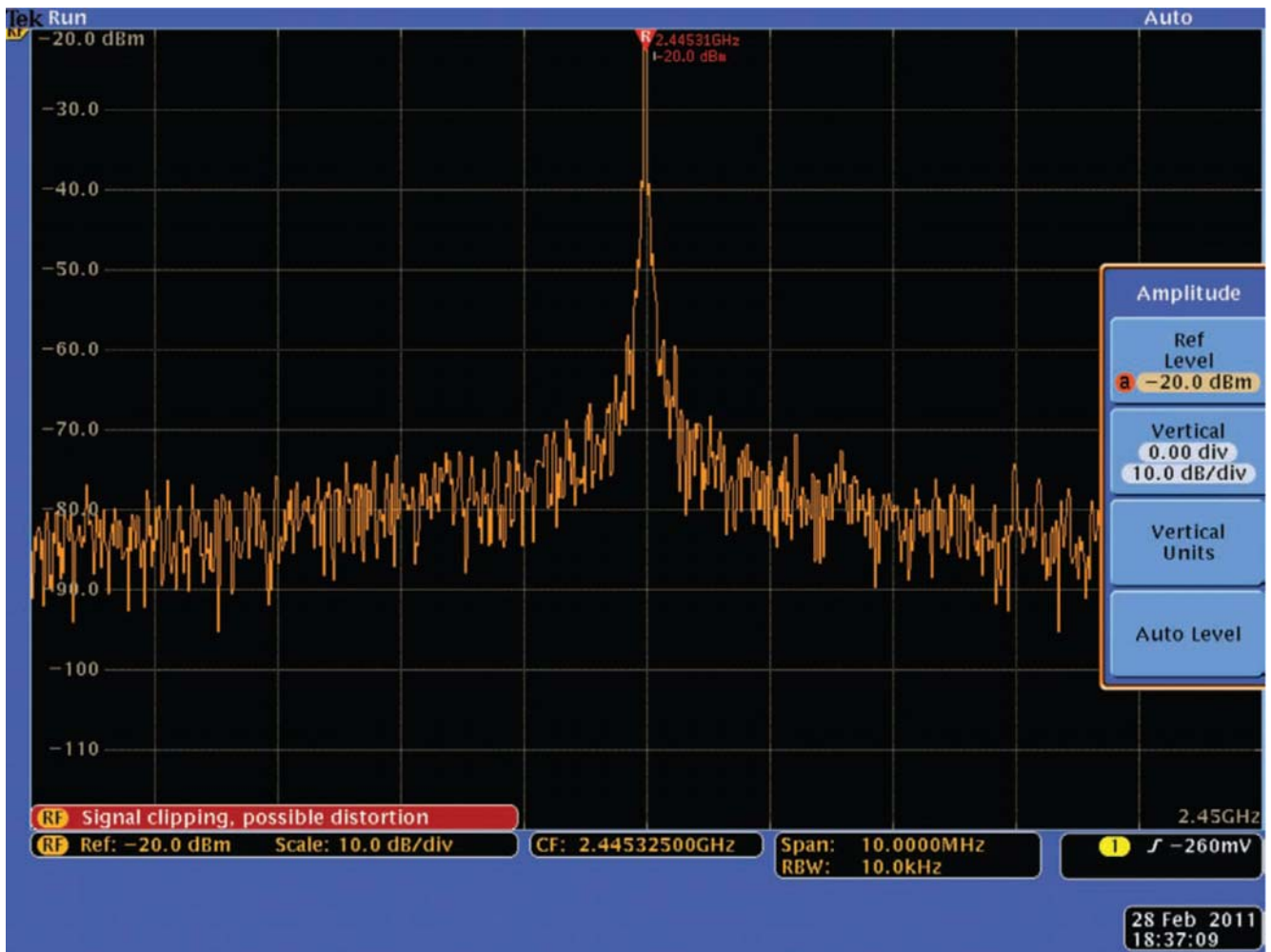


图 24. 限幅指示符。

限幅指示符

由于频谱分析仪上的画面显示了多个频率上的功率电平，因此很难区分什么时候采集系统会限幅、进而导致失真。查找超过参考电平的峰值，并不足以检测到这一情况，因为每个峰值只包含模数转换器看到的部分功率。多个峰值汇聚在一起，可能会导致模数转换限幅，即使没有任何一个峰值超过参考电平。

由于 MDO4000 混合域示波器采用基于示波器的采集结构，因此在 RF 射频通道上可以简便地提供一个限幅指示符。该仪器查找模数转换器上的任何限幅，在检测到时指明可能发生的失真。

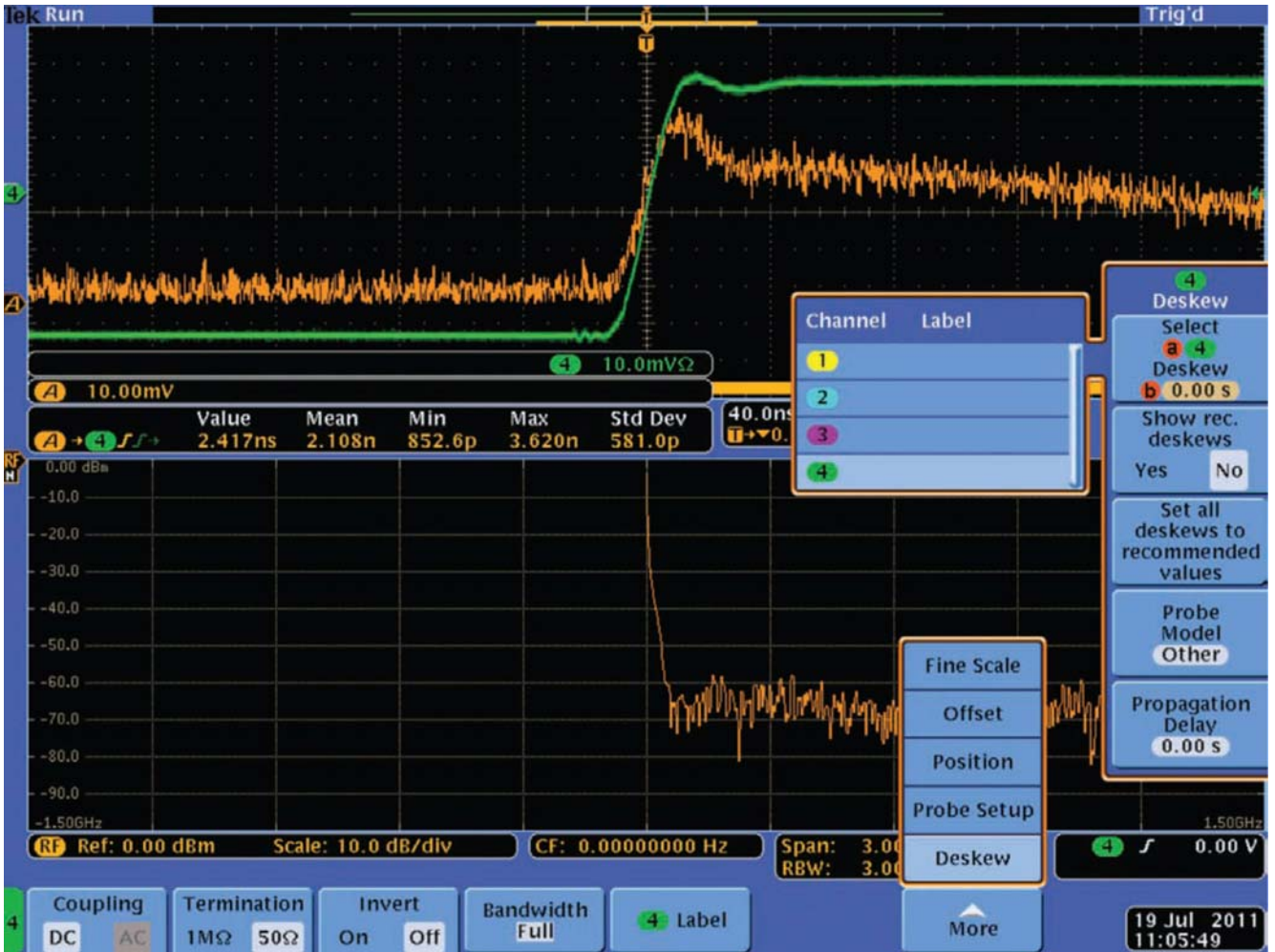


图 25. RF 到模拟通道偏移校正。

RF 到模拟通道对准

在 RF to Analog Channel Skew (RF 到模拟通道的偏移) 指定数值远低于 5 ns 时，MDO4000 混合域示波器允许

用户在 RF 射频通道与任意模拟通道之间执行偏移校正调节，以更精确地进行对准。

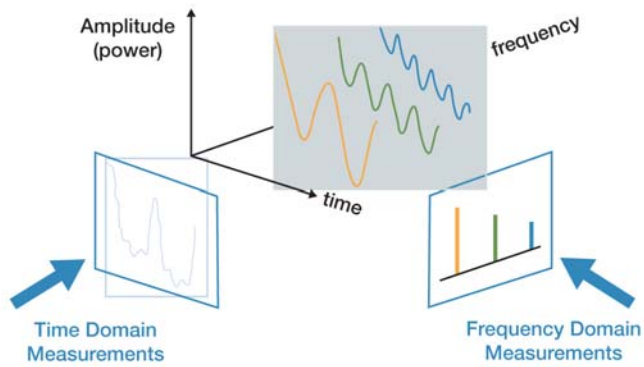


图 26. 时域和频域。

频谱分析基础

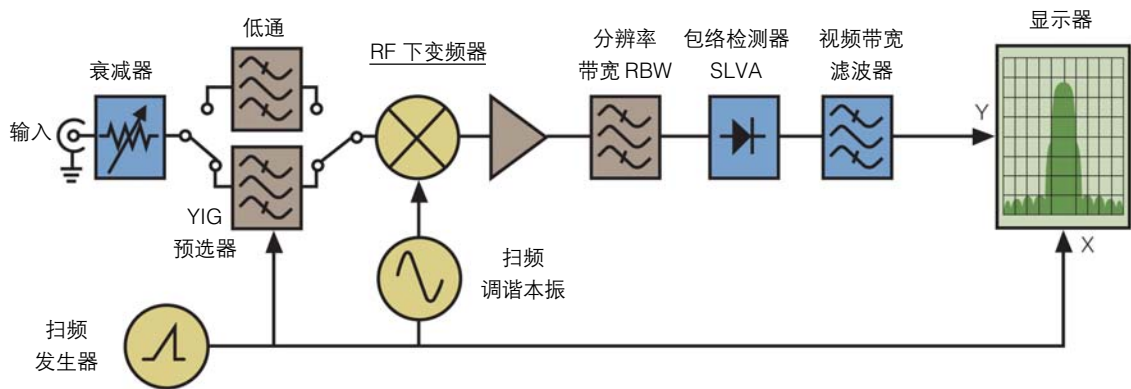
如图 26 所示，可以在时域或频域中观察信号：

在时域中，传统上示波器被用作观测幅度随时间变化的仪器。在频域中，传统上频谱分析仪被用作观测幅度随频率变化的仪器。

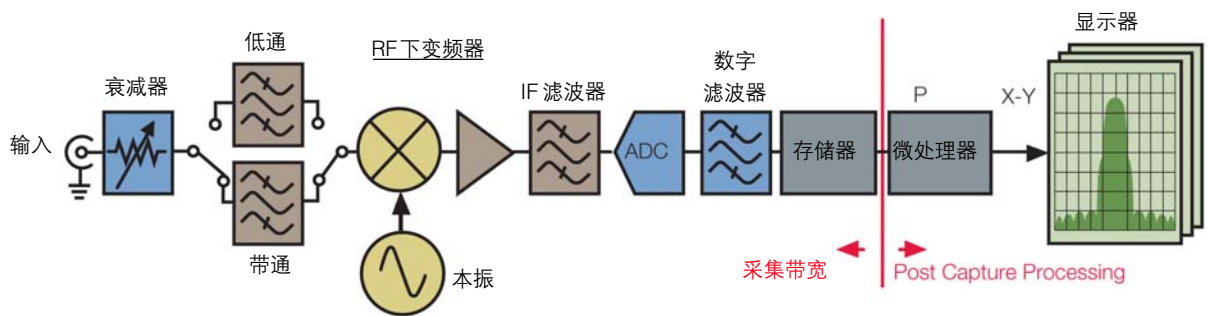
我们可以看出，在这两种情况下，信号是相同的。时域信号是大量离散的正弦波的复合体，每个正弦波都有自己的幅度和相对相位。频谱分析仪中显示的“频谱”只是简单地把信号分解成构成的频率成分。

第三章：深入了解相关知识

为了提供上述功能，MDO4000 混合域示波器拥有独特的结构，传统频谱分析仪或示波器用户可能并不熟悉这一结构。本章将阐述 MDO4000 混合域示波器的技术基础。



a) 扫频分析仪(SA)



(b) 矢量信号分析仪(VSA)

图 27. 频谱分析仪结构概况: (a)扫频分析仪; (b) 矢量信号分析仪。

上面的图 27(a)是传统扫频分析仪简化的方框图。

扫频超外差频谱分析仪是几十年前第一次使得工程师能够进行频域测量的传统结构。频谱分析仪最初是使用纯模拟器件构建的，之后与所应对的应用一起不断演变。当前一代频谱分析仪包括各种数字元器件，如 ADC、DSP 和微处理器。但是，基本扫频方法仍大体相同，最适合观察受控的静态信号。扫频式频谱分析仪通过下变频所输入的射频信号，在分辨率带宽 (RBW) 滤波器的通带范围内扫描，来测量功率随频率的变化。RBW 滤波器后面有一个检测器，检测器计算选定跨度中每个频率点上的幅度。尽管这种方法可以提供高动态范围，但它的

缺点是每一次只能计算一个频率点的幅度数据。这种方法基于的假设是，分析仪在完成至少一次扫描的时间内，被测信号在此其间没有明显的变化。结果，测量只对相对稳定不变的输入信号有效。如果信号快速变化，那么在统计概率上说，部分变化极可能会被漏掉。

本应用指南前面的“同时的时域和频域视图”简单讨论了这些局限性。在该节中，图 7 讨论了由于不能同时看到时域和频域视图，而给正确了解随时间变化的信号带来的限制。本节将进一步考察为什么传统频谱分析仪和矢量信号分析仪会以不同方式观察随时间变化的快速信号。

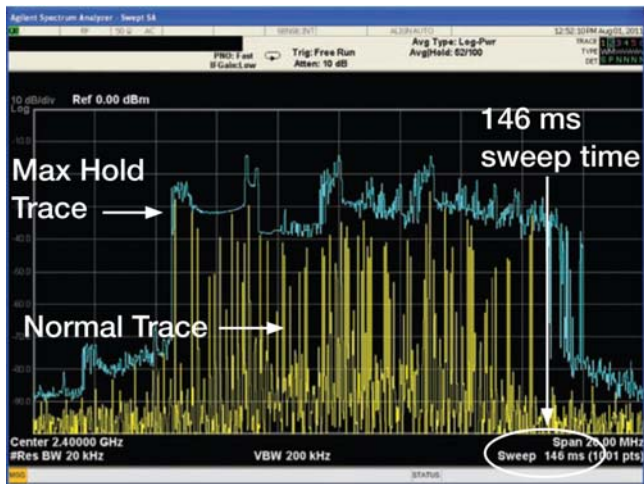


图28. 频谱分析仪以20 kHz RBW测量20 MHz频谱中的信号。

传统频谱分析仪扫描通过预定义的频段。在图28所示的实例中，传统频谱分析仪设置成以20 kHz RBW扫描通过20 MHz的频谱。默认扫描时长为146 ms，我们打开Max Hold曲线(蓝色曲线)和Normal曲线(黄色曲线)，观察频谱响应。

图29是使用时域画面和频域画面观察的相同的信号。在显示Max Hold曲线和Normal曲线时，信号Normal曲线显示的信号看上去要干净得多。Normal曲线显示了随时间变化的信号非常简短的部分的FFT。在20 kHz RBW下，频谱时间不到115 us。

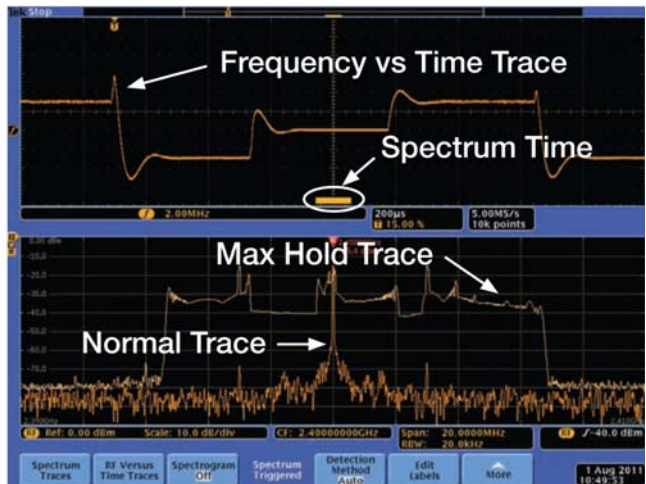


图29. 应用到MDO的相同信号和设置及时域视图和频域视图。

时域画面显示了标为“f”的橙色曲线代表的信号的频率随时间变化。频率标度设置为2.00 MHz/格。频率随时间变化画面的粗略视图显示了这个信号在大约1.4 ms时间周期上似乎在三个不同的频率之间跳动。每个频率似乎稳定了大约400 us，而频率之间的跳变用了大约100 us。这些事件要比传统扫频分析仪的扫描时间快得多。根据图28中选择的设置，频谱分析仪每个扫描期间(146 ms扫描时间)已经有100多个这样的事件集合发生。



图 30. 正常曲线现在位于跳频信号较高频率上。

通过使用MDO4000混合域示波器前面板上的Wave Inspector 旋钮，可以考察整个时间内捕获的事件。图 30 是捕获的相同信号，但现在，频谱画面视图表示的是频

率随时间变化的不同时点。现在，频谱时间移动到这个 RF 信号三个跳频顺序中较高的频率，已经重新计算FFT，以显示与这个新时点相关的频谱。



图 31. 在跳频期间显示信号的宽频谱能量。

在图31中，频谱时间被移动到阶跃顺序中最高频率与最低频率之间的跳变。使用宽带频谱分析仪可以清楚地看到这么宽的频谱，而使用传统频谱分析仪很难分辨这一频谱，后者在扫描关心的频谱时采用了窄带检测器。

对图28中传统扫频分析仪上显示的信号，宽频谱在扫频分析时会表现为结构性的假信号，因为它缓慢扫描快速移动的信号。我们在前面确定，在传统频谱分析仪的扫描时间(146 ms)期间，发生了100多个跳频集合。在持续时间大约1.4 ms的跳频集合期间，由于三次频率跳

变，共有三个宽带频谱事件。传统频谱分析仪的窄带检测器只把事件表示为检测器频率上扫描期间接收的能量，因此除300个稳定的频率事件之外，还发生了多达300个噪声事件。从图28中的曲线可以看出，不可能了解这个信号的特点。传统分析仪频谱视图显示的噪声尖峰不代表实际宽带噪声，而只是使用了错误的工具(即传统的扫频频谱分析仪)考察宽频谱事件时所产生的假信号而已。

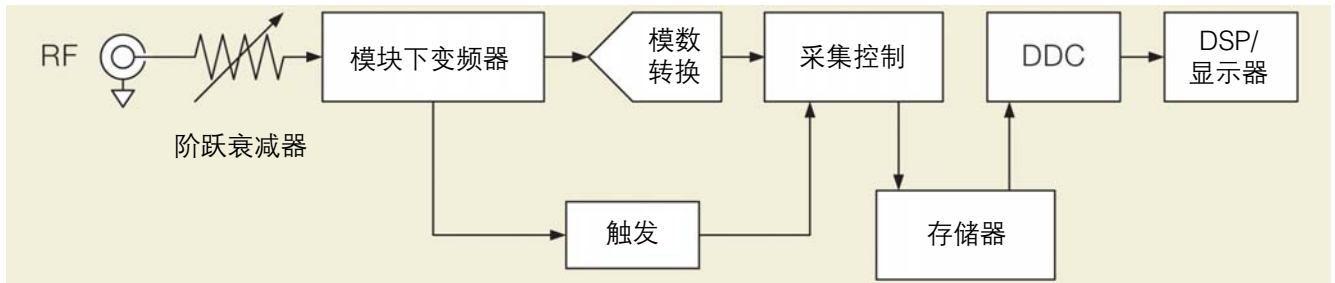


图 32. 简化的 MDO4000 混合域示波器的方框图。

图 27(b)是矢量信号分析仪(VSA)结构，图 32 是 MDO4000 混合域示波器简化的方框图。它代表着更加现代的频谱分析仪，本振是阶跃的，而不是扫描的。得到的信号被滤波，然后被数字化。这会产生频段受限的时域信号，通过使用 DFT (离散傅立叶变换)，可以把信号从时域转换到频域。在这些变换中，最著名的变换是 FFT (快速傅立叶变换)。然后把所得到的频域信息显示在画面上，在本振频率周围画出频谱的一小部分。然后本振阶跃到下一个更高的频率，重复上述过程，直到画出整个频谱。阶跃分析仪在处理随时间变化的 RF 射频时至少要优于扫频分析仪，但因其范围有限，关心的跨度位于通常很窄的阶跃内。

MDO4000 系列混合域示波器的频谱分析仪功能的核心也采用这一过程，即在时域中采集信号，然后使用 DFT 把信号转换到频域。MDO 混合域示波器的独特之处在于，其拥有非常宽的采集带宽和多通道时间相关结构。普通阶跃频谱分析仪的频谱捕获带宽在 10 MHz 左右，而 MDO4000 系列混合域示波器保证提供 >1 GHz (在某些情

况下可以高达 3.75 GHz) 的实时频谱捕获带宽，是一般的 VSA 10 MHz 频谱捕获带宽的 100 到 300 倍！

图 32 是 MDO4000 混合域示波器上 RF 射频通道简化的方框图。

与传统的扫频频谱分析仪和矢量信号分析仪的结构不一样，MDO4000 混合域示波器采用了高采样率(10GS/s)的模数转换器，允许 RF 射频输入信号，在下变频时不需要变频到一个窄带的中频(IF 频率)，在 MDO4000 混合域示波器的前端采用了宽带的模块下变频器，并宽带的触发检测器，在满足触发条件时(触发条件可以是射频事件或任何时域的事件)，MDO4000 混合域示波器就开始采集各通道上的信号，从而得到所有通道上各信号的时域数据记录，将这些数据都记录到存储器上。

然后，数字下变频器 (DDC) 从存储器中读取数据，其基本上会把信号边带限制在与当前跨度和中心频率设置对应的频率范围内。然后得到的数据输送到 DSP/显示系统中，进一步进行处理和显示。

下面将更详细地讨论这个方框图的各个要素。

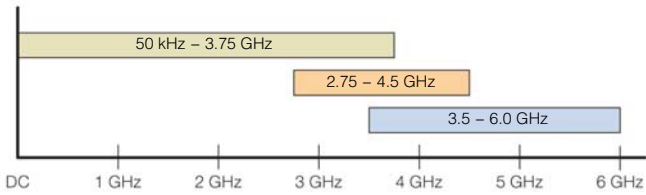
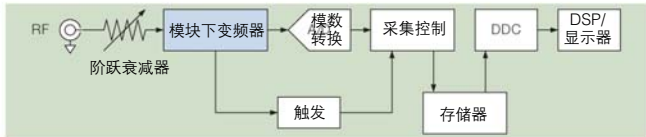


图 33. 模块下变频器

模块下变频



由于 MDO4000 混合域示波器采用基于示波器的采集系统，因此直接使用宽带的模块下变频器，就可以把所关心的频率跨度带到模数转换器可以接收的范围内。

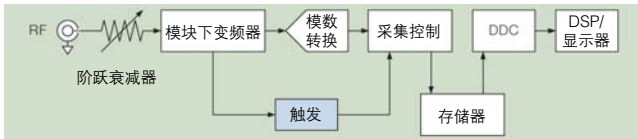
模块下变频器在下图所示的多个范围之间切换：

注意三个频段重合 1 GHz，使得 MDO4000 混合域示波器能够在任何中心频率设置下提供不少于 1 GHz 的单次频谱捕获带宽。这大大超过了普通现代频谱分析仪 10 MHz 的捕获频谱带宽。与(一些非常昂贵的频谱分析仪选项)把这些分析仪中的频谱捕获带宽扩展到 40 MHz、80 MHz、甚至 140 MHz 的选项相比，MDO4000 混合域示波器的宽频谱捕获带宽仍有非常大的优势，是当今没有一台频谱分析仪可以做到的。

另外注意，频谱捕获带宽经常会超过 1 GHz 这个最小值(这个是保证值)。事实上，在 3.0 GHz 频率范围的 MDO4054-3 与 MDO4104-3 中，仪器一直在任何跨度设置下，保证在单次采集中，都能捕获全带宽(即 3GHz)的频谱。

在显示的跨度超过一个下变频器频段的限制时，可以把两个频段无缝地缝合在一起，从两条记录中构建一个频谱。

RF 域触发

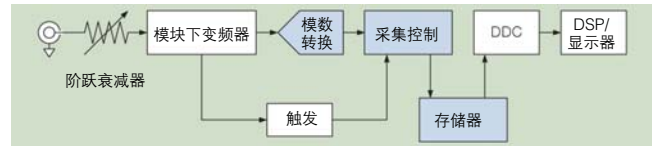


基于示波器采集系统的 MDO4000 内置了一个跨域的触发采集系统，在一次的捕获中，同时采集各通道上的信号，形成一个连续的时域数据记录。然后这个记录以数字方式下变频(下面进行了详细介绍)到希望的跨度，然后通过 DFT 运行，把它转换到频域。结果，在一次采集中所得到的整套频域数据可以与其他模拟与数字数据在时间上对准以及相关的，因为这些数据都来自于同一套的触发系统所采集的数据记录。

这一过程与传统频谱分析仪中典型的选通扫描形成了鲜明的对比。门信号可以“触发”扫描，但观察的信号在扫描时间内仍可能会变化。结果，显示的频率信息在时间上一致的确定性很低。通过更加完善的时间选通功能，可以从多个触发事件中累积测量期间的频谱，但结果仍不能表示一次连续时间周期中的数据，而后者对诊断嵌入式系统中的间歇性漏洞通常至关重要。因此，这种传统扫描与触发技术只能用于重复事件。

MDO4000 混合域示波器还为频谱显示提供了一个自由运行选项，避免显示同步到 DUT 中某个事件的频谱。这种模式仍是“已触发”模式，显示的频谱仍从相邻数据记录中提取，因此在时间上是一致的。不同之处在于，触发事件在内部以最快速度生成，避免了与 DUT 中的事件相关。

采集原始的 RF 时域数据记录



为了了解采集时域数据、然后转换到频域的过程，我们有必要简单讨论一下这两个域中数据之间的关系。

首先，创建单个频谱所采样的时间量取决于 RBW 分辨率带宽的设置和窗口选项。这个采集时间称为频谱时间。为简化起见(忽略窗口项)，频谱时间的公式如下：

$$\text{频谱时间} = 1 / \text{RBW}$$

RBW 分辨率带宽的设置表示频率轴上可以区分的最小的频率差异。例如，把 RBW 分辨率带宽设置成 1 Hz，要求采集分析 1 秒(1/1Hz)的数据。如果有人指出，需要 1 秒的时间区分 1000 Hz 和 999 Hz 信号之间的差异，这理解起来就很简单。这需要很长时间“数”第一个信号中完整的 1000 个周期及第二个信号中 999 个周期。在这个时间间隔上，将不能区分低于 1 Hz 的差异。

窗口	窗口因数	频谱时间
Kaiser (默认值)	2.23	223 us
矩	0.89	89 us
Hamming	1.30	130 us
Hanning	1.44	144 us
Blackman-Harris	1.90	190 us
Flat-Top	3.77	377 us

表 4. 10 kHz RBW 的窗口因数和频谱时间。

窗口函数(如需进一步了解窗口函数, 请参阅“生成频谱”)本身的滤波形状会影响 FFT 转换过程的带宽, 把能量涂抹到相邻二元组中。窗口因数用 FFT 二元组数量指明窗口的 -3dB 带宽。窗口因数的影响是通过窗口因数扩展要求的采集时间, 公式如下:

$$\text{频谱时间} = \text{窗口因数} \times (1 / \text{RBW})$$

MDO4000 混合域示波器中各种 FFT 窗口的窗口因数如下:

第二, 最低采样率取决于跨度和中心频率设置。奈奎斯特定理指出, 采样率最低必须是数字化信号中最高频率成分的两倍。如果采样率不足, 会发生假信号, 导致信号中不存在的假频率指示。

为了避免这个假信号, 在关心的最高频率之上, 必须对输入信号进行低通滤波, 如图 34 所示。

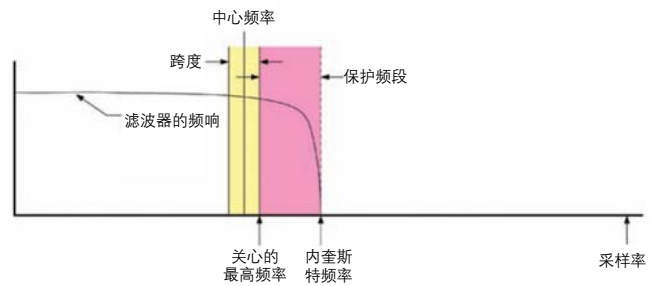


图 34. 低通滤波内奈奎斯特频段。

因此, 要求的最低采样率如下:

$$\text{采样率} = \text{滤波因数} \times (\text{中心频率} + 1/2 \times \text{跨度})$$

滤波因数(FF)是相对于关心的最高频率的一个项, 定义了一个保护频段, 保证信号衰减到仪器在奈奎斯特频率上的无杂散动态范围 SFDR 以下。

与许多新的矢量信号分析仪不同, MDO4000 混合域示波器不需要提供可变输入滤波或调节采集采样率, 因为模数转换器以 10 GS/s 恒定速率采样。这对提供模块下变频器所需的 3.75 GHz 输入带宽已经足够高了。

以快速采样率采样, 在考察一定跨度内信号的噪声功率时提供了数字处理增益。处理增益会降低噪声功率, 降低幅度是奈奎斯特带宽除以分辨率带宽之比的对数乘以 10。

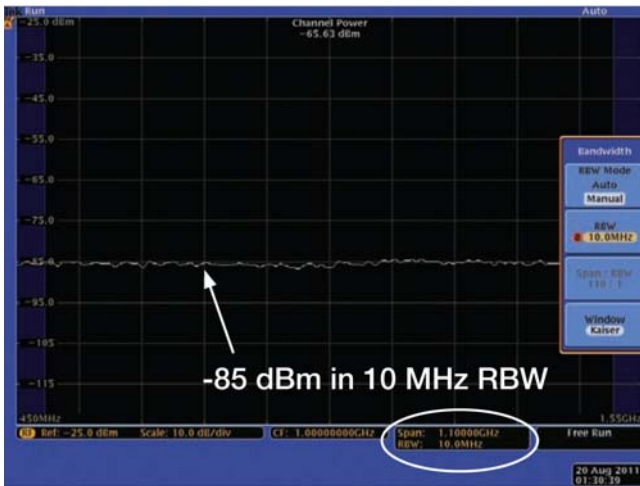


图 35. 1 GHz 通道，10MHz RBW 的噪声功率与频谱曲线。

例如，图 35 所示的 1 GHz 通道的噪声功率测得为 -65.3dBm 。在测量关心的信号时，必须把噪声功率视为测量不确定性的一个组成部分。理论上，以恒定采样率采样一固定的带宽时，减小 RBW 分辨率带宽可以增加数字处理增益。图 35 显示了 1 GHz 跨度 10 MHz RBW 的噪声层电平大概是 -85dBm 。在图 36 中，所使用的 RBW 是 10KHz，是图 35 中的 RBW 的 $1/1000$ ，虽然在 1 GHz 通道中的噪声总功率测仍为 -65.3dBm ，但是在 1 GHz 跨度 10 KHz RBW 的噪声层电平却降低为 -115dBm 。

与传统示波器不同，在特定的频率点上能够选择所关心的跨度也可以降低测量中的总噪声功率，进而降低测量低电平信号时的不确定性。

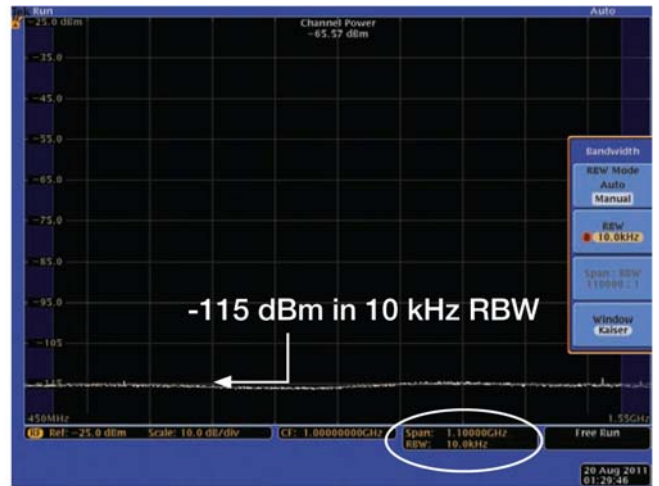


图 36. 1 MHz 通道的噪声功率。

最后，为 RF 射频通道所采集的数据记录的时间长度定义为 RF 采集时间。RF 采集时间与采样率和存储容量有关。由于采样率固定在 10GS/s ，在 RF 射频通道中拥有 1 GB 存储容量，理论上能够在 RF 通道中实现 100ms 的捕获时间。但是，除了存储 RF 采样的数据外，存储器还用来为采集计算 RF 随时间变化，包括计算幅度、频率和相位随时间变化以及复杂的 IQ 数据。频率跨度越宽，这些时域记录的样本抽取(数据压缩)越小，因此这会影响 RF 采集可以使用的时间量。

RF 射频跨度	RF 射频采集时间
>2 GHz	2.5ms
>1 GHz–2 GHz	5ms
>800 MHz–1 GHz	10ms
>500 MHz–800 MHz	12.5ms
>400 MHz–500 MHz	20ms
>250 MHz–400 MHz	25ms
>200 MHz–250 MHz	40ms
>160 MHz–200 MHz	50ms
>125 MHz–160 MHz	62.5ms
<125 MHz	79ms (最大值)

表 5. RF 射频采集时间对比 RF 射频跨度。

表 5 提供了 MDO4000 中的 RF 射频采集时间与 RF 射频跨度的关系。明显窄跨度加上更多的样本抽取(可以实现最长的时间记录)。当瞬时带宽提高时，分配给 RF 时域曲线的数据将主导了存储器的空间分配。

RF 射频采集时间长度至少要 and 频谱时间相同，在大多数情况下，RF 射频采集时间要长得多。还应知道的是，可以把频谱时间卷动通过 RF 射频采集时间，然后将在频域视图中重新计算和显示 FFT。

要考虑的另一个重要变量是模拟时间。模拟时间是模拟通道和数字通道采集的时间长度，通过水平标度旋钮来直接控制。由于模拟通道和数字通道上采集的时间量完全独立于 RF 射频采集系统，因此有必要了解这两个功能之间的相互关系。

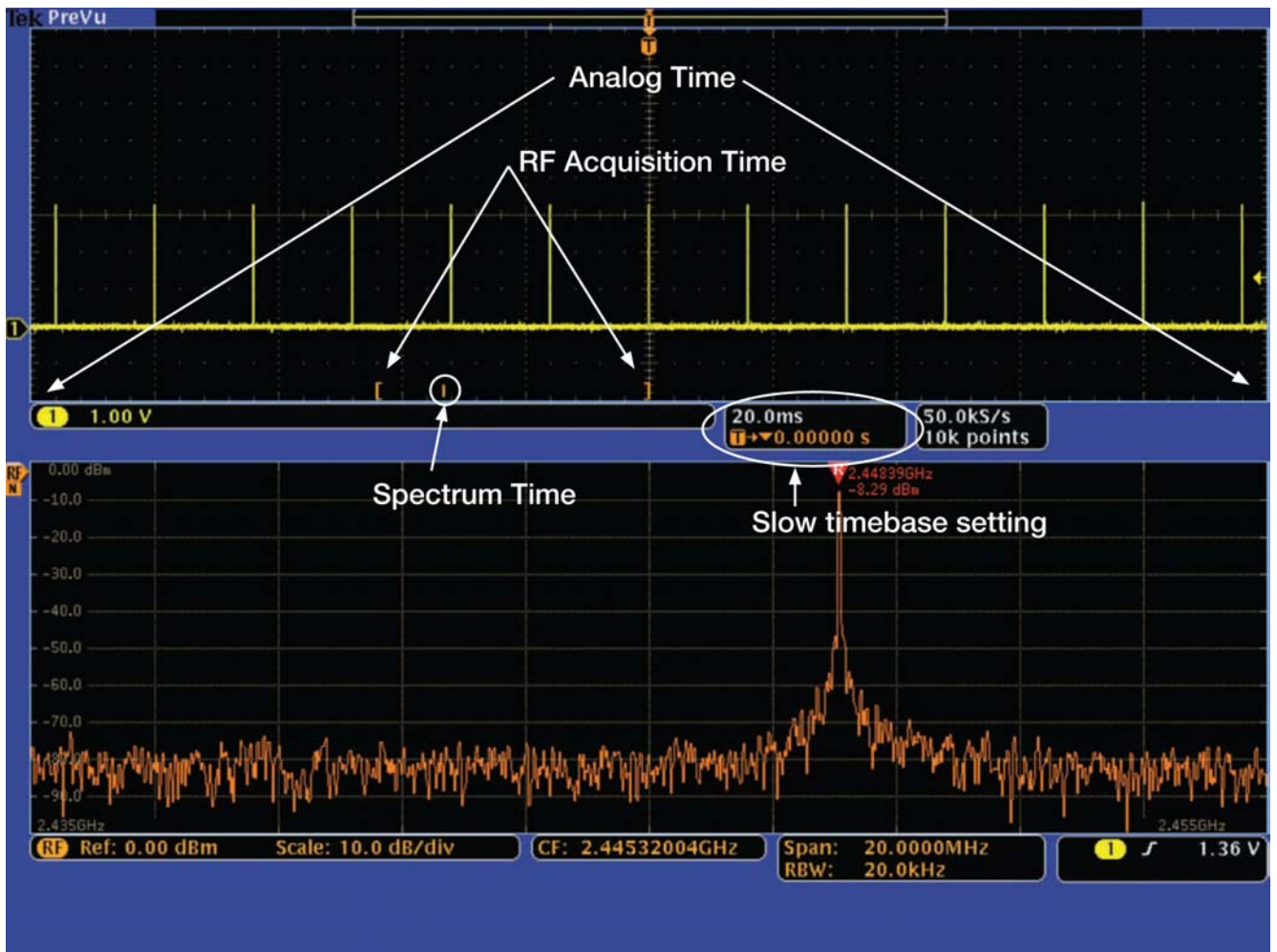


图 37. 模拟时间、RF 采集时间和频谱时间。

对中速及快速时基设置, RF 射频采集时间和模拟时间相等, 用户可以在整个采集中移动频谱时间。但是, 在使用较慢的时基设置, 模拟通道的有效采样率下降时, 模拟时间可能会超过 RF 射频采集时间。在这些情况下, 用户有必要了解哪个部分的模拟时间正代表着 RF 射频采集时间。图 37 显示了时域视图中超低时基设置时的模拟时

间、RF 射频采集时间和频谱时间之间的关系。

应了解 RF 射频采集必须有一个触发事件, 把频率视图与时域视图关联起来。触发事件可以发生在 RF 射频采集最后, 如图 37 所示。RF 射频采集也可以发生在触发后的任意时间。

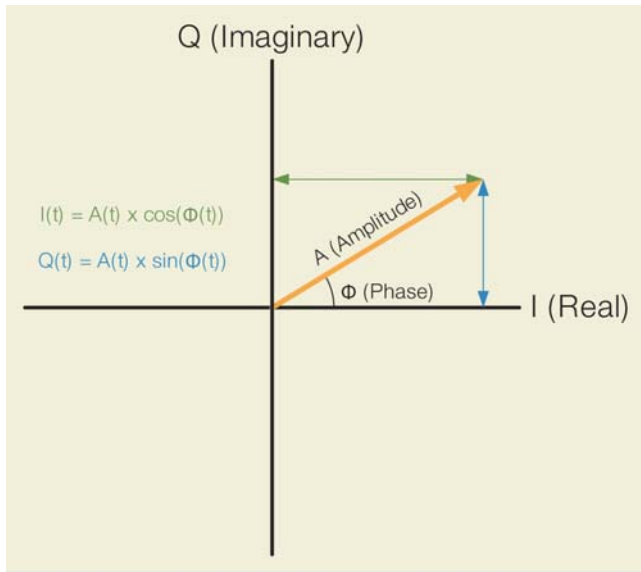
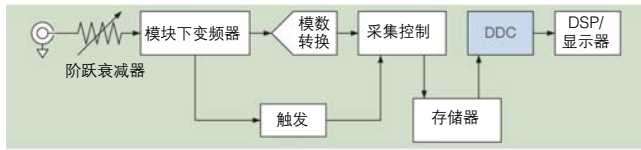


图 38. IQ 数据平面。

数字下变频



表示带通信号的一种常用的、计算高效的方式是采用波形的复数基带表示。转换到频域的第一步，是在原始 RF 时域记录上执行数字下变频。这一过程完成了三件事：

- 数据记录被转换成复数 I (同相)和 Q (正交)数据格式。
- 中心频率移动到 DC，这种中心频率的转移允许把 IQ 采样率降低到没有转移前的一半速率。
- 数据被滤波和压缩到足以覆盖跨度的采样率。

为生成 IQ 数据及把中心频率(CF)移到 DC，把 RF 射频时域数据乘以正弦项和余弦项，如下面的公式所示：

$$I = RF(t) \times \cos(CF)$$

$$Q = RF(t) \times \sin(CF)$$

得到的 IQ 数据是复数，表示 RF 射频信号在测量期间怎样偏离中心频率，如图 38 所示。

在任意时间点下变频的信号可以视为 IQ 平面中画出的矢量。信号的瞬时幅度确定了矢量的长度。信号相对于中心频率的瞬时相位确定了矢量的极角。I 值和 Q 值是这个矢量投射到 I (实数)轴和 Q (虚数)轴上的投影。

必须理解信号的相位是相对于当前中心频率设置的值。为更全面地了解这一点，我们看一下下面的实例：

- 如果输入是连续波或 CW 信号，其频率与中心频率设置完全相同，得到的矢量在 IQ 平面中将是固定的。矢量的相位只是信号与中心频率之间的相位偏差。
- 如果输入信号是幅度调制 CW 信号，频率与中心频率设置完全相同，那么得到的矢量也有一个恒定的相角，但长度会随着幅度变化而变化。
- 如果输入信号是 CW 信号，频率与中心频率设置不同，那么得到的矢量将围绕 IQ 平面中心旋转，旋转速率表示 CW 信号与中心频率之间的频率差。

一旦完成到 IQ 数据的这种转换，那么关心的跨度将以 DC 为中心。然后可以滤波 IQ 数据，消除落在跨度以外的任何频率成分，进行压缩(基于 MAX, MIN, AVERAGE 等方式进行样本抽取)，减少数据成分。与上面的采样过程类似，希望的跨度设置决定着得到的最低采样率：

$$\text{采样率} = \text{滤波因数} \times (1/2 \times \text{跨度})$$

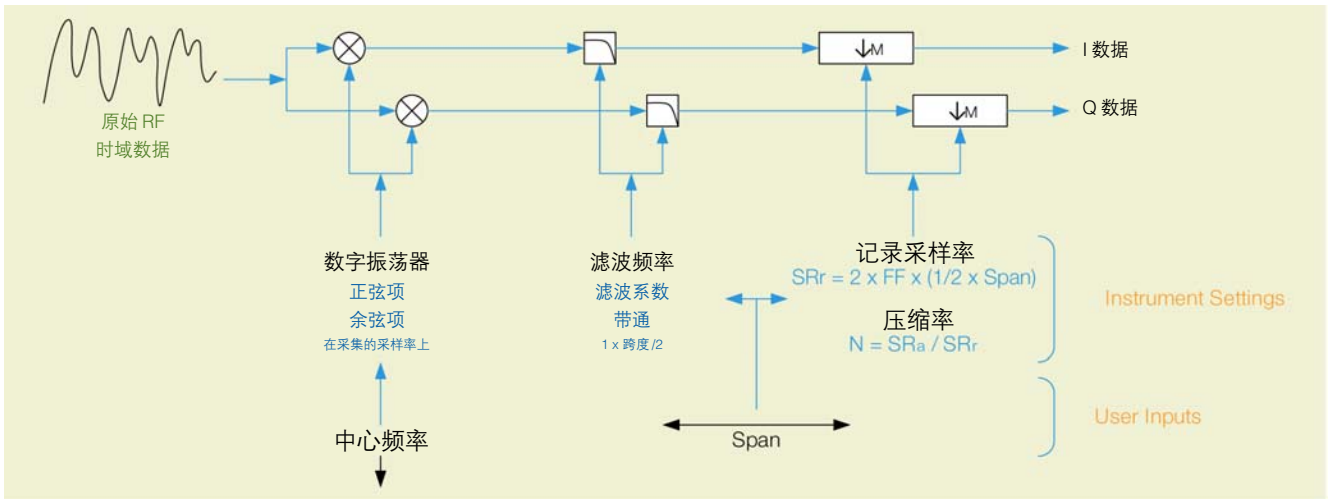


图 39. 生成 IQ 数据。



图 40. 生成频谱数据

由于中心频率现在是零，因此它从公式中取消。采样率只需基于跨度的 1/2，因为复数 IQ 数据是作为实数数据有效承载频率信息的数据的两倍。在 IQ 数据中，内奎斯特频率等于采样率。

在 MDO4000 混合域示波器中，滤波因数一般约等于 3。图 39 说明了这种下变频过程。

生成频谱

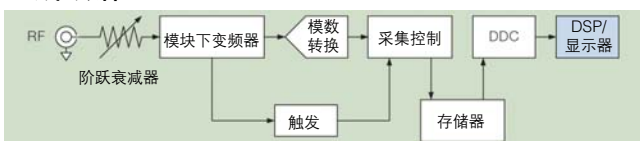


图 40 说明了生成显示频谱曲线的过程。

在这个过程中，首先把数据乘以窗口函数。由于 FFT 假设信号在整个期间不变，因此采样间隔最后的不连续点将在得到的频谱中表现为频谱泄漏。窗口函数是为了减少这些不连续点。如需进一步了解各种窗口函数及其使用，请参阅附录一。

信号在整个期间不变的假设的其中一个含义，在 RF 时域

数据覆盖的时间间隔期间内，若信号改变幅度的话，它将以降低的功率电平显现在所得到的频谱中。避免这种结果的唯一途径是调节 RBW 分辨率带宽设置，保证信号在整个时间间隔期间是稳定的。

由于 FFT 处理在 2 的幂数的数据长度中更加有效，因此输入数据会加上零衬垫，直到最近的 2 的幂数。零衬垫增加了频谱分辨率，而不会改变频率成分。

应该指出的是，使用的 FFT 长度完全取于跨度 / RBW 之比。上面的公式中可以很容易看出：

$$\text{FFT 长度} = (\text{窗口因数} * \text{滤波因数} * (1/2 * \text{跨度})) / \text{RBW}$$

对 MDO4000 混合域示波器，默认 Kaiser 窗口的窗口因数是 2.23。如上所述，滤波因数约等于 3。默认的跨度 / RBW 之比为 1000:1。在这些默认设置下，得到的 FFT 长度约为 3345 点。这将零衬垫直到 4096 点 FFT。

每个变换帧中样点数越多，变换完成后频率分辨率越好。遗憾的是，这也意味着变换帧所需的数据计算数量越多。FFT 这个变换过程也因密集计算要求而闻名。

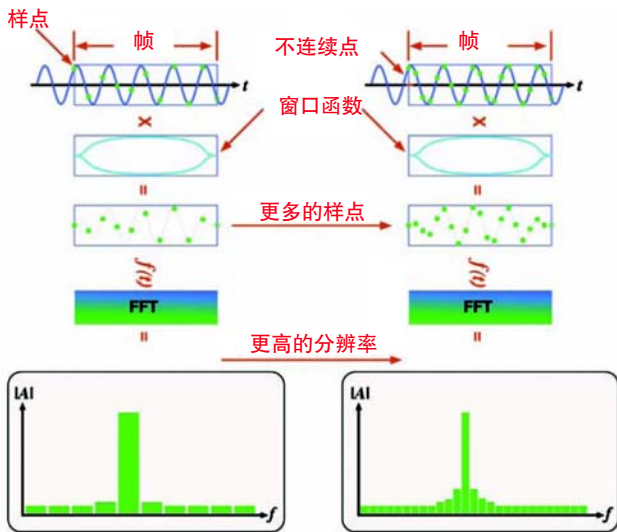


图 41. 提高时间样点数改善了频域分辨率。

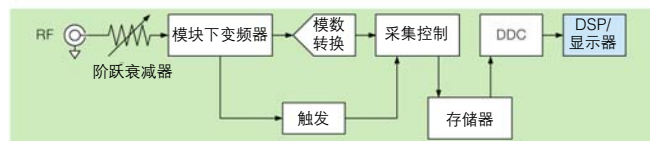
然后我们使用FFT，以频谱形式把RF时域数据转换成频域数据。然后进一步修改这个频谱：

- 整个频谱乘以一套调节平坦度的系数。这些系数在出厂校准时确定。MDO4000 混合域示波器中没有相位校准。
- 如前所述，FFT 过程可以涉及 1,000 – 2,000,000 点。可以压缩频谱记录，以适应 1000 点画面。这种数据压缩（样本抽取）过程称为检测，用来把多个 FFT 二元组汇聚成一个显示的二元组。用户可以控制选择的检测方法，压缩方式如下：
 - + Peak：保留压缩间隔中最大的数据点
 - -Peak：保留压缩间隔中最小的数据点
 - Average：平均整个压缩间隔中的数据
 - Sample：保留压缩间隔中最后一个数据点
- 然后可以对最终频谱求对数，得到最终画面。



图 42. 生成 RF 时域数据

生成 RF 时域数据



IQ 数据的另一个用途是生成 RF 时域数据。回忆一下，在上面的数字下变频中，IQ 数据只是在虚数 IQ 数据平面中作为矢量绘制的信号的卡笛尔表示。因此，IQ 数据可以作如下变换：

可以在时域格线中，与其它时域曲线一起绘制得到 RF 时域数据图。所有时域数据(包括模拟数据、数字数据和 RF 射频通道)在格线中都时间对准，允许用户评价各条通道之间的定时关系。

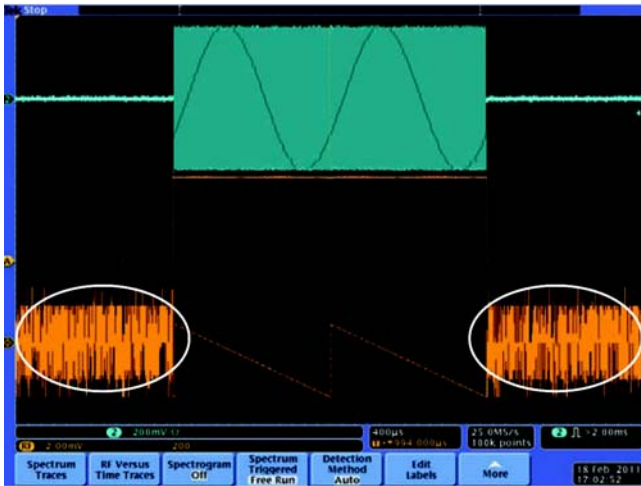


图 43. 没有消隐的相位随时间变化。

注意相位计算和频率计算都独立于幅度计算。如果幅度低，那么 IQ 数据会越来越以噪声为主。图 43 中显示了这种效应。

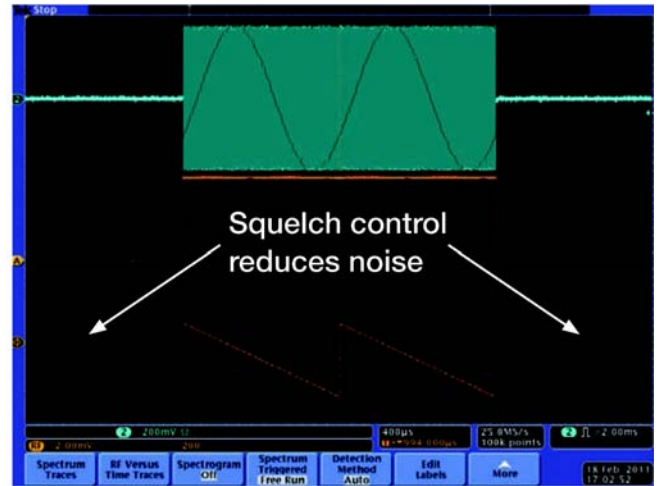


图 44. 消隐的相位随时间变化。

为了避免这个问题，MDO4000 混合域示波器拥有静噪控制功能，允许用户在幅度降到用户自定义门限以下时消隐相位和频率曲线。下面截图显示了这一结果。

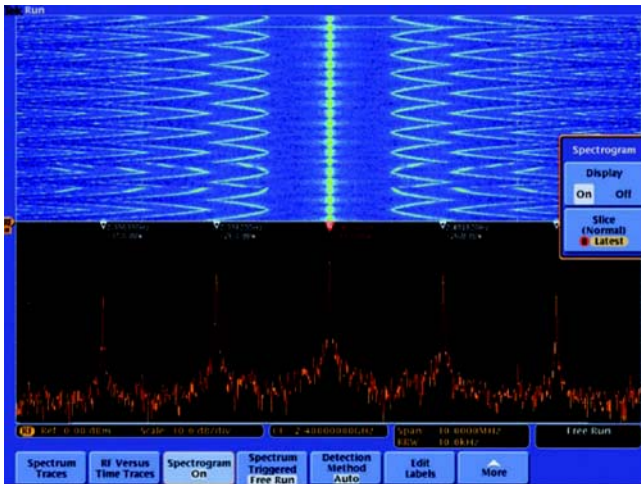


图 45. 频谱瀑布图画面显示了信号记录的频谱历史。

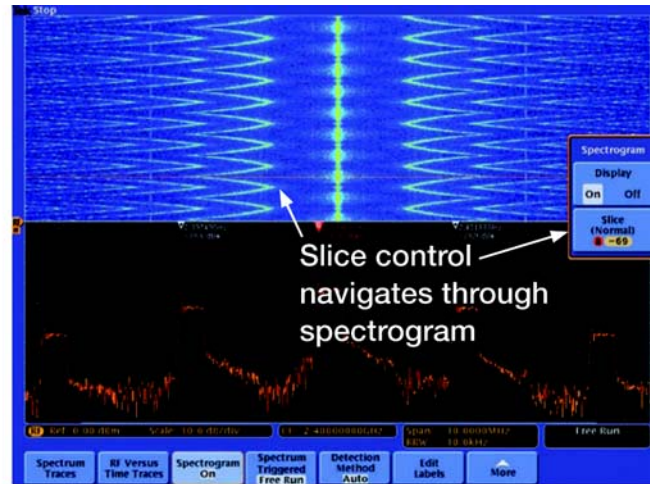
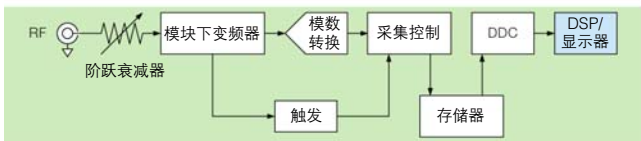


图 46. “片段”显示了以前记录的信号。

生成频谱图



频谱的另一个用途是绘制频谱瀑布图。

这个过程相对简单，它用颜色对频谱幅度编码，在频谱瀑布图画面中作为多个像素组成的一条直线绘制结果。每个新的“片段”会把画面中现有的数据向上推，直到画面最上面的数据被丢弃。一个“片段”表示已经根据频谱画面中的跨度和 RBW 设置所处理的一个 FFT 帧。

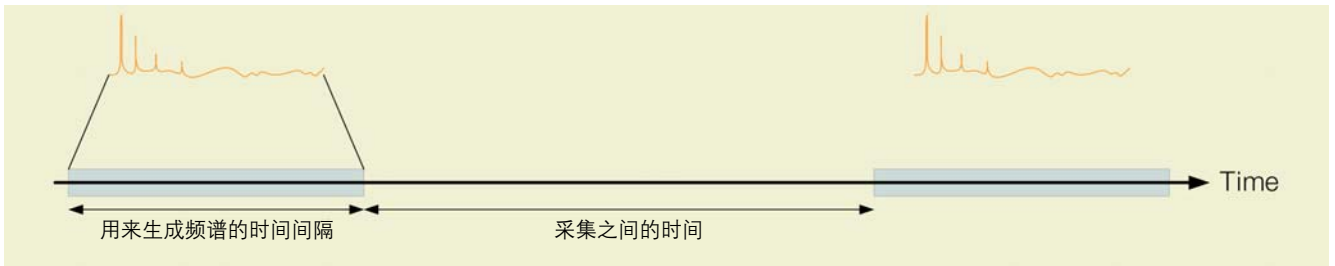


图 47. 时间分辨率

时间分辨率

要讨论的最后一个议题是数据的时间分辨率。

频谱的时间分辨率相对较差，下图中可以看出其原因。

首先，如上面“生成频谱”所述，FFT 是从覆盖 RBW 设置定义的时间间隔的数据中生成的。因此不能区分信号频谱成分在这个时间间隔内的变化，而是汇聚成一个频谱。

第二，从图中可以看出，在采集事件之间有延迟。采集事件之间发生的变化将看不到。

为了缩短计算频谱的时间，应提高 RBW。由于默认设置把 RBW 与跨度关联起来，提高跨度可以得到想要的效

果。此外，这还会缩短采集之间的时间，因为进行数字下变频要求的时间被缩短了。

为进一步缩短采集之间的时间，应降低跨度/RBW 之比，从而可以加快 FFT 处理时间。

与频谱相比，RF 时域数据的时间分辨率相对较好。如前面“数字下变频”中所述，IQ 数据的采样率取决于跨度设置，因此比频谱时间分辨率精细得多。这是 RF 时域曲线的主要优势之一。

为改善幅度、相位或频率随时间变化曲线的时间分辨率，应提高跨度。

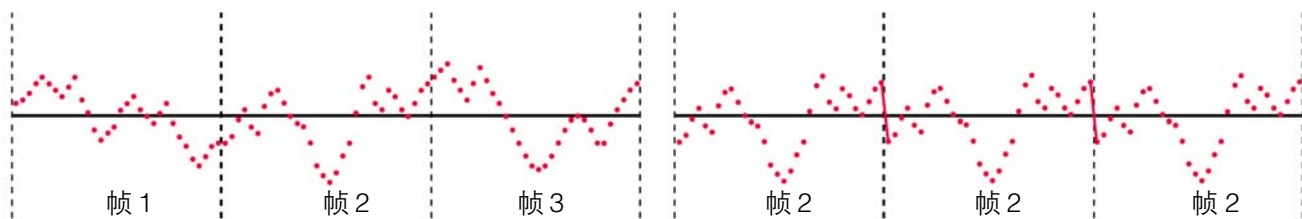


图 A1/A2. 被采样的时域信号的两个帧(a)和一个帧中定期扩展样点导致的不连续点(b)。

窗口	窗口因数	最适合用于:
Kaiser (默认值)	2.23	最佳边瓣电平, 形状因数最接近传统高斯 RBW. Gaussian RBW.
矩形	0.89	测量突发的瞬态信号, 其中事件前的信号电平与事件后的信号电平接近相等
Hamming	1.30	测量正弦、定期或窄带随机噪声, 其中事件前的信号电平与事件后的信号电平明显不同
Hanning	1.44	测量幅度精度(低于解析频率), 其中事件前和事件后的瞬态信号或突发信号电平明显不同
Blackman-Harris	1.90	测量频率幅度, 测量以单频率为主的波形, 查找高阶谐波
Flat-Top	3.77	测量在时域数据帧开头或结尾附近捕获的简短事件的幅度精度, 频率分辨率差

表 A1. MDO4000 混合域示波器中提供的不同的窗口函数。

附录 A 窗口函数

窗口

离散傅立叶变换(DFT)分析的数学计算本身有一个假设, 即要处理的数据是周期性重复的信号的一个周期。

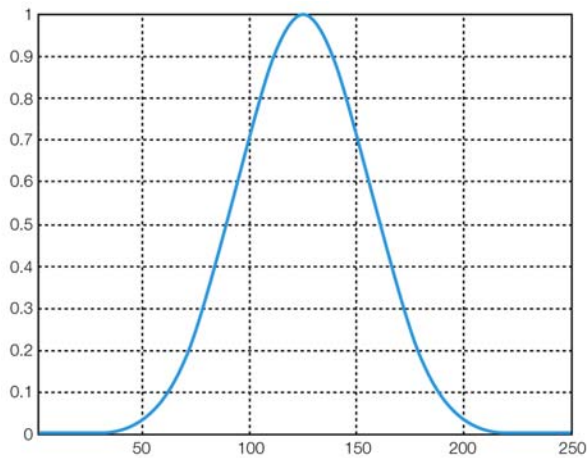
图 A1 描绘了一系列时域样点。例如, 在对图 A1 中的第二个帧应用 DFT 处理时, 将对信号进行周期性扩展。多个连续帧之间一般会发生不连续点, 如图 A2 所示。

这些假信号不连续点生成原始信号中不存在的频谱假信号。这一效应会产生信号的不准确表示结果, 称为频谱泄漏。频谱泄漏不仅在输入中产生输入中不存在的信号, 还会降低附近有大信号时观察小信号的能力。

MDO4000 系列频谱分析仪功能应用窗口技术, 降低频谱泄漏的影响。在执行 DFT 之前, 先逐个样点以相同长度把 DFT 帧乘以窗口函数。窗口函数通常呈钟形, 减少或消除了 DFT 帧尾的不连续点。

窗口函数的选择取决于频响特点, 如边瓣电平、等效噪声带宽和幅度误差。窗口形状还决定着有效的 RBW 分辨率带宽滤波。

与其它频谱分析仪一样, MDO 混合域示波器允许用户选择 RBW 分辨率带宽滤波器。MDO 混合域示波器还允许用户在多个常用窗口类型之间进行选择。它增加了直接指定窗口形状的灵活能力, 用户可以优化特定测量。例如, 应特别注意脉冲或瞬态 RF 信号的频谱分析。表 A1 就不同的窗口函数的使用提供了部分建议。

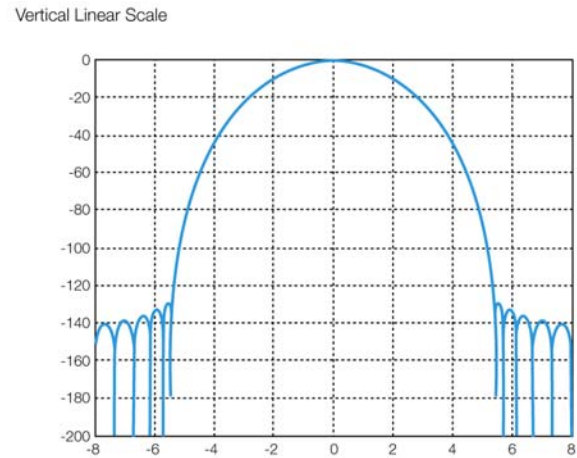


图A3. 时域中的Kaiser窗口，水平方向是时间样点，垂直方向是线性标度值。

窗口函数的频响幅度决定着 RBW 分辨率带宽形状。例如，MDO 混合域示波器上的 RBW 分辨率带宽定义为 3 dB 带宽，与 DFT 中采样频率和样点数的相对关系如下：

$$RBW = \frac{k * F_s}{N} \quad \text{Equation 1}$$

$$N = \frac{k * F_s}{RBW} \quad \text{Equation 2}$$



图A4. Kaiser窗口的频谱。水平标度单位是频率二元组(F8/N)，垂直标度是 dB。

其中 k 是与窗口有关的系数，N 是 DFT 计算中使用的时域样点数，Fs 是采样频率。对 Kaiser 窗口，k 约为 2.23。RBW 分辨率带宽形状因数定义为 60 dB 和 3 dB 时的频谱幅度的频率比，约为 4:1。在 MDO 混合域示波器上，频谱分析测量使用公式 2，根据输入跨度和 RBW 设置计算 DFT 要求的样点数量。

A3和图A4显示了MDO混合域示波器频谱分析中使用的 Kaiser 窗口的时域和频谱。这是 MDO4000 混合域示波器在频谱分析中使用的默认窗口。

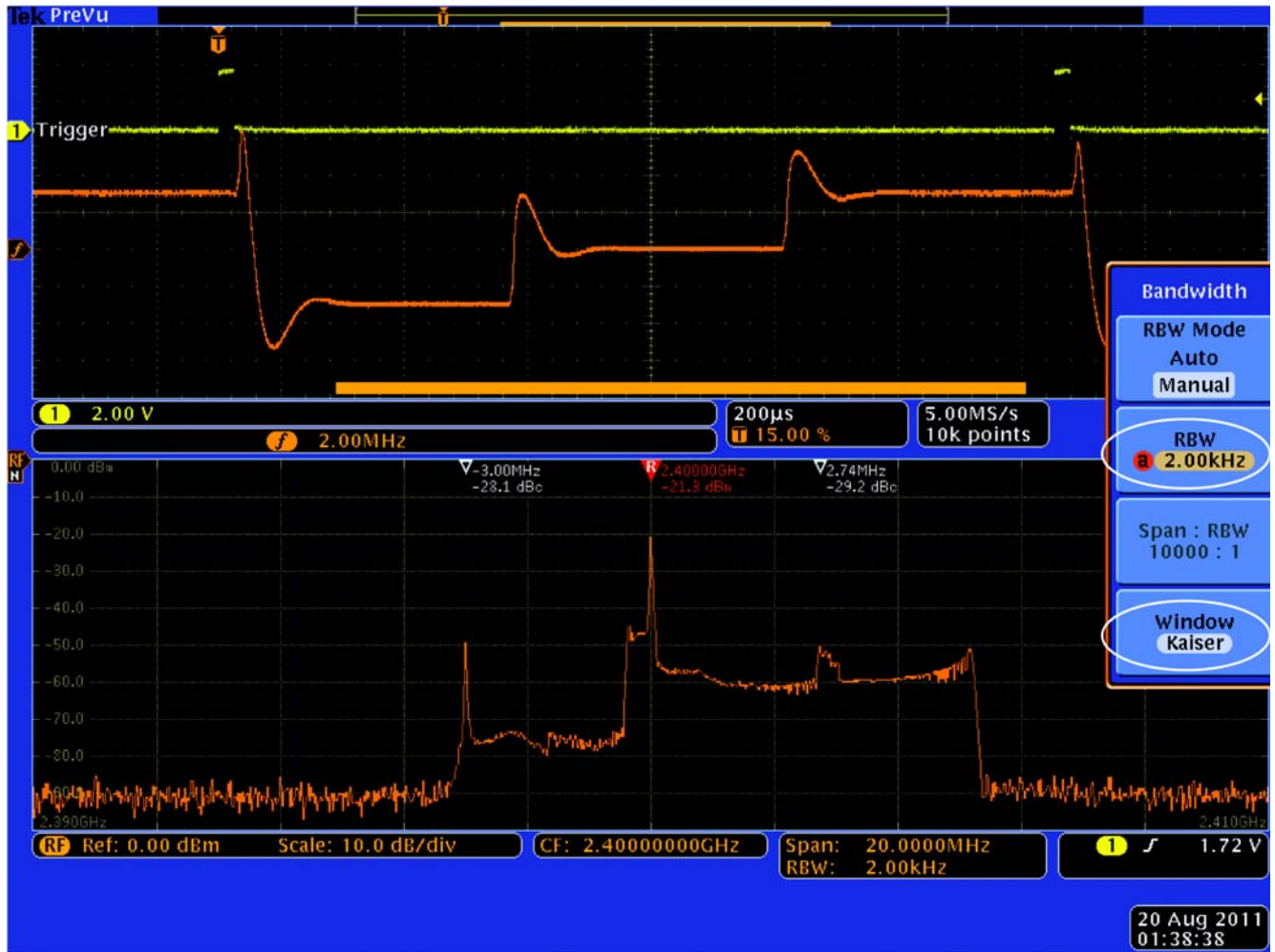


图 A5. 2 kHz RBW 时的 Kaiser 窗口。

图A5中的跳频信号实例说明了不同的窗口怎样影响随时间变化的信号的频谱表示。在使用默认的Kaiser窗口时，与这一采集有关的频谱时间为 1.12 ms。频率随时间变化画面显示了在跳频大多数时间内，频谱时间以三个跳频顺序的中间频率为中心。上方频率和下方频率“开点

频率”周期相关的时间大体相等，图A3中描述的窗口函数显示，采集开头和边缘附近的时间样点水平下降，因为窗口函数在采集中心使用的样点呈高斯分布。看一下频域画面中四个峰值的幅度(中心频率、高频、低频和最大过冲峰值)，中心峰值超过其它信号近 30 dB。

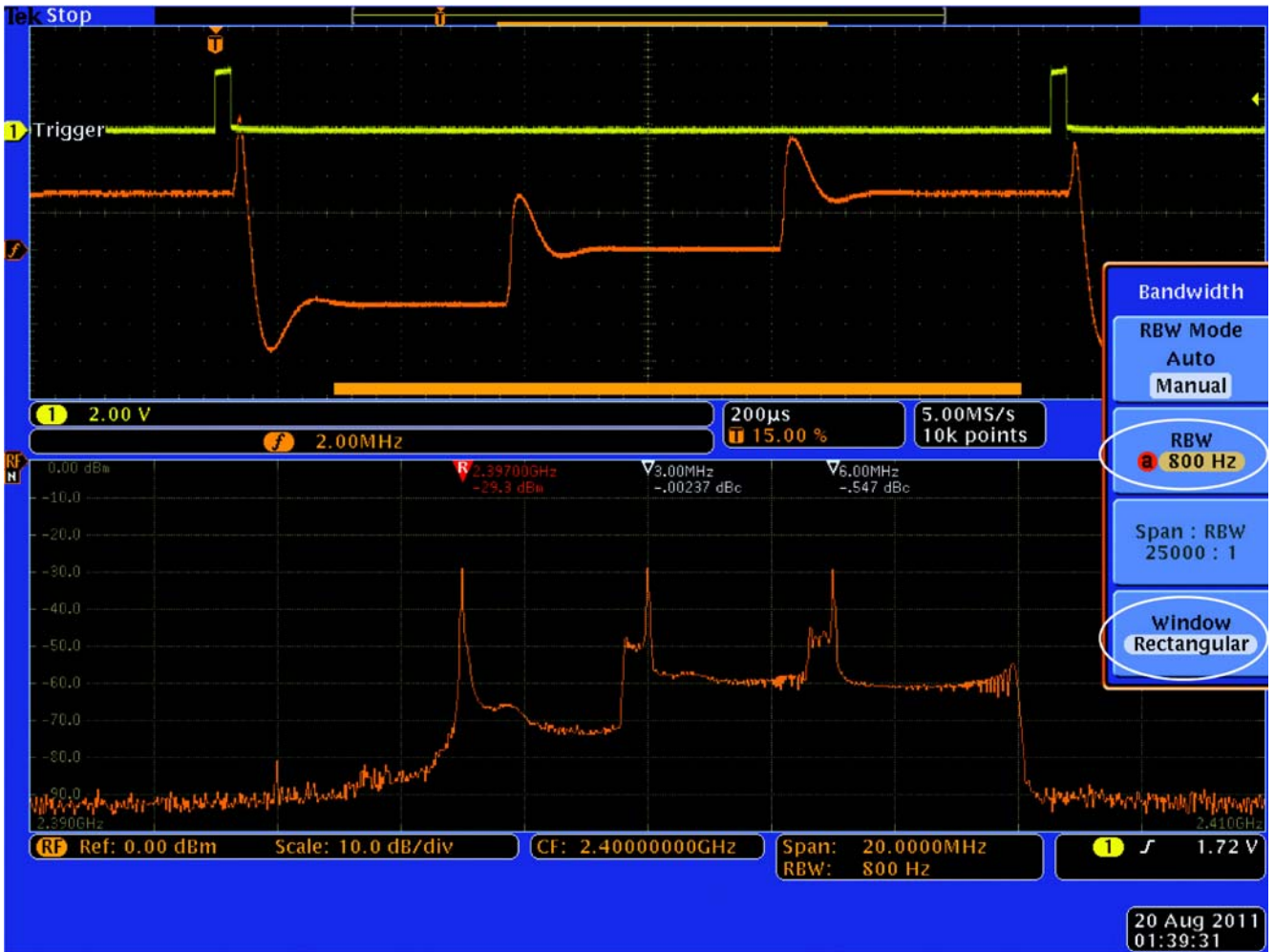


图 A6. 750 Hz RBW 时的矩形窗口。

在图 A6 中，现在选择的窗口类型是矩形。由于矩形窗口的窗口函数不同于 Kaiser 窗口，RBW 变成了 750 Hz，因此频谱时间与上一个实例中的采集时间大体相等。

频谱时间再次与三个跳频顺序中相同的点对准，但频谱表示有很大的差别。

由于矩形窗口函数基本上在采集时间中不滤波时间样点，且在三个频率每个频率上的驻留时间大体相等，因此采

用矩形窗口的频谱显示三个峰值信号的频谱幅度大体相等。

用户还可以选择其它窗口(如 Blackman-Harris、矩形、Hanning)，满足特殊的测量要求，在执行仪器中提供的部分测量时，仪器也可以使用这些窗口。

附录 B: 术语表

词汇表

采集— 整数数量的时间相邻样点。

幅度— 电信号的量级。

幅度调制(AM)— 正弦波(载波)的幅度根据第二个电信号(调制信号)的瞬时电压变化的过程。

模拟时间— 水平标度旋钮直接控制的模拟通道和数字通道采集的时间数量。

分析时间— 来自一个模块的时间相邻样点的子集, 作为分析视图的输入使用。

载波— 调制驻留的 RF 信号。

载频— 载波信号 CW 成分的频率。

中心频率— 与分析仪显示的频谱的频率跨度中心对应的频率。

CW 信号— 连续波信号, 一种正弦波。

dBfs — 一种单位, 使用参考满刻度的分贝表示功率电平。根据上下文, 这可以是显示屏满刻度, 或 ADC 的满刻度。

dBm — 使用参考一毫瓦的分贝表示功率电平的单位。

dBmV — 使用参考一毫伏的分贝表示电压电平的单位。

分贝(dB)— 一个电力功率与另一个电力功率之比的对数乘以 10。

DFT— 离散傅立叶变换— 计算采样的时域信号的频率频谱的数学运算过程。

显示线— 波形画面上的横线或竖线, 作为参考源使用, 用来与给定电平、时间或频率进行目视(或自动)比较。

失真— 信号劣化, 通常是由非线性操作引起的, 会导致不想要的频率成分。谐波失真和互调制失真是常见的失真类型。

动态范围— 可以以指定精度测量、输入上同时存在的两个信号的电平的最大比。

FFT— 快速傅立叶变换— 一种计算离散傅立叶变换(DFT)的高效计算方法。常用的 FFT 算法要求输入样点数与输出样点数相等以及 2 的幂数(2,4,8,16,……)。

频率— 信号振荡速率, 用赫兹或每秒周期数表示。

频域视图— 表示信号频谱成分功率随频率变化; 或信号的频谱。

频率漂移— 在其它条件保持不变的情况下, 信号频率在指定时间内的逐渐位移或变化。用每秒赫兹表示。

频率模板触发— 一种基于频域中发生的特定事件的灵活的实时触发技术。触发参数由图形模板定义。

频率调制(FM)— 电信号(载波)的频率根据第二个电信号(调制信号)的瞬时电压变化的过程。

频率范围— 设备工作的频率范围, 带有上限和下限。

频率跨度— 在两个频率极限之间扩展的连续的频率范围。

标记— 波形曲线上可以目视识别的一个点, 用来提取该点表示的域和范围值读数。

调制— 改变信号特点, 一般是为了传送信息。

噪声— 叠加在信号上的不想要的随机干扰, 一般会该信号变得模糊。

噪底— 系统本身的噪声电平, 代表着输入信号可以观察的最低极限, 最终受到热噪声(kTB)限制。

噪声带宽(NBW)— 用来计算噪声或噪声类信号绝对功率的滤波器的具体带宽, 单位为 dBm/Hz。

参考电平— 分析仪画面最上面的格线表示的信号电平。

解析带宽(RBW)— 频谱分析仪画面中可以测量的最窄频段的宽度。RBW 决定着分析仪解析相距很近的多个信号成分的能力。

RF 射频采集时间—RF通道中一个采集代表的时间长度。时间长度会随着跨度变化。

灵敏度—这个指标用来衡量频谱分析仪显示最低电平信号的能力，通常表示为显示的平均噪声电平(DANL)。

频谱图—频率随时间和幅度变化画面，其中频率用 x 轴表示，时间用 y 轴表示，功率用颜色表示。

频谱—信号的频域表示，表明其频谱成分随频率分布情况。

频谱分析—确定 RF 信号频率成分的一种测量技术。

频谱时间—为频域视图执行 FFT 所要求的时间量。频谱时间取决于 RBW 和窗口因数。

矢量信号分析—检定RF信号的时域特点使用的一种测量技术。矢量分析同时考虑幅度和相位。

请立即联系泰克授权一级分销商：

北京东方中科集成科技股份有限公司
 服务电话：400-650-5566
 网 址：www.jicheng.net.cn

参考缩略语

ACP: 邻道功率

ADC: 模数转换器

AM: 幅度调制

BW: 带宽

CW: 连续波

dB: 分贝

dBfs: dB 满刻度

DDC: 数字下变频器

DFT: 离散傅立叶变换

DSP: 数字信号处理

FFT: 快速傅立叶变换

FM: 频率调制

FSK: 频移键控

IF: 中间频率

IQ: 同相正交

LO: 本振

NBW: 噪声带宽

RBW: 解析带宽

RF: 无线电频率

RMS: 均方根

SA: 频谱分析仪

VSA: 矢量信号分析仪