

实时频谱分析基础知识

目录

第 1 章: 简介和概述.....	3-8	数字荧光显示.....	26
RF信号的演变.....	3	DPX显示引擎.....	27
现代RF测量挑战.....	4	DPX变换引擎.....	29
简单考察仪器结构.....	5	DPX密度测量.....	29
扫频分析仪.....	5	定时和触发.....	30
矢量信号分析仪.....	7	实时触发和采集.....	31
实时频谱分析仪.....	7	系统触发和数字采集.....	32
第2章: 实时频谱分析仪的工作方式.....	9-37	触发模式和功能.....	32
RF/IF信号调节.....	9	RSA触发源.....	33
输入切换和发送段.....	10	建立频率模板.....	34
RF段和微波段.....	10	解调.....	35
频率变换 /IF 段.....	11	幅度调制、频率调制和相位调制.....	35
数字信号处理(DSP)概念.....	12	数字调制.....	36
实时频谱分析仪中的数字信号处理路径.....	12	功率测量和统计.....	37
IF数字转换器.....	13	第 3 章: 实时频谱分析仪测量.....	38-46
校正.....	13	实时频谱分析仪测量类型.....	38
数字下变频器(DDC).....	14	频域测量.....	38
IQ基带信号.....	14	DPX频谱.....	39
压缩.....	15	时域测量.....	39
压缩滤波.....	15	调制域测量.....	42
把时域波形变换到频域中.....	16	码域测量.....	44
实时频谱分析.....	17	统计域测量.....	45
发现和捕获瞬态事件.....	17	第 4 章: 实时频谱分析仪的应用.....	47-49
RSA与扫频分析仪比较.....	18	脉冲测量.....	47
实时频谱分析仪上的RBW.....	18	雷达.....	47
窗口.....	19	RFID.....	47
实时频谱分析仪中的离散傅立叶变换(DFT).....	20	频谱管理 / 监控.....	48
数字滤波.....	22	无线电通信.....	48
有限脉冲响应(FIR)滤波器.....	22	功率放大器测试.....	49
频响与脉冲响应.....	22	频噪效应和相位触发分析.....	49
数值卷积.....	23	EMI/EMC.....	49
DPX® 技术: 革命性的信号发现工具.....	25	第 5 章: 术语表.....	50-51
		词汇表.....	50
		参考缩略语.....	51

第 1 章：简介和概述

RF 信号的演变

早在 19 世纪 60 年代，James Clerk Maxwell 通过数学运算，预测出存在着能够通过空白空间传输能量的电磁波，此后，工程师和科学家一直在寻求创新方法利用 RF 技术。在 Heinrich Hertz 在 1886 年物理演示了“无线电波”之后，Nikola Tesla、Guglielmo Marconi 等人开创了利用这些波实现长途通信的方式。一个世纪以后，无线电已经成为 RF 信号第一个实际应用。过去三十年中已经启动了多个研究项目，考察信号发送和接收方法，检测和定位远距离内的目标。到第二次世界大战开始时，无线电检测和量程(也称为雷达)已经成为又一个盛行的 RF 应用。

在很大程度上，由于军事和通信领域的持续增长，RF 技术创新在 20 世纪其余时间内都一直稳定加速增长，直到今天这种增长仍在继续。为防止干扰、避免检测及改善容量，现代雷达系统和商用通信网络已经变得非常复杂，这两种系统一般都采用全面组合的 RF 技术，如复杂的自适应调制、突发和跳频。设计这些高级 RF 器件，并把它们成功地集成到工作系统中，是非常复杂的任务。

同时，越来越广泛的蜂窝技术和无线数据网络的成功，导致了基本 RF 元器件的成本大幅度下降。这使得传统军事和通信领域之外的制造商能够把相对简单的 RF 器件嵌入到各类商用产品中。RF 发射机已经深入生活，几乎在任何想得到的位置都可以发现它们的身影，如家中的消费电子，医院中的医疗器械，工厂中的工控系统，甚至植入家畜、宠物和人体皮肤下的跟踪设备。

随着 RF 信号在现代世界中变得无所不在，生成 RF 信号的器件之间的干扰问题也随之增长。在需要牌照的频谱中工作的移动电话等产品，在设计时必须不会把 RF 能量发送到相邻频率信道中，对在不同传输模式之间切换、保持到不同网元的同步链路的复杂多标准设备来说，这一点尤其具有挑战性。在没有牌照的频段中工作的比较简单的器件，也必须设计成在存在干扰信号时能够正确运行，政府法规通常规定，这些器件只允许以低功率在短突发中传输信号。这些新的数字 RF 技术需要结合使用计算机和 RF，包括无线局域网、手机、数字电视、RFID、等等。这些技术与软件定义的无线电(SDR)和认知无线电(CR)最新技术相结合，提供了新的发展道路，将从根本上改变频谱分析方法，提高最稀缺的商品之一——RF 频谱的利用效率。

为克服这些不断演变的挑战，当前工程师和科学家能够可靠地检测和检定随时间变化的 RF 信号非常关键，而使用传统测量工具并不能简便地实现这一点。为解决这些问题，泰克研制了实时频谱分析仪(RSA)，这种仪器可以发现 RF 信号中的难检效应，触发这些效应，把它们无缝捕获到存储器中，并在频域、时域、调制域、统计域和码域中分析这些效应。

本文介绍了 RSA 的工作方式，您可以基本了解怎样使用 RSA，解决与捕获和分析现代 RF 信号有关的许多测量问题。

实时频谱分析基础知识

入门手册

现代 RF 测量挑战

鉴于检定当前RF器件行为特点的挑战,必需了解频率、幅度和调制参数在短期和长期内的行为方式。在这些情况下,使用传统工具如扫频分析仪(SA)和矢量信号分析仪(VSA)可能会在频域和调制域内提供信号概况,但其通常不能提供足够的信息,让用户满怀信心地描述器件生成的动态 RF 信号。

考虑一下下面挑战性的测量任务:

- 发现罕见的短时间周期事件
- 查看较强的信号掩盖的较弱信号
- 观察噪声掩盖的信号
- 查找和分析瞬态信号和动态信号

- 捕获突发传输、毛刺、开关瞬态事件
- 检定 PLL 稳定时间、频率漂移、微音扩大
- 捕获扩频信号和跳频信号
- 监测频谱使用情况,检测游荡传输
- 测试和诊断瞬态 EMI 效应
- 检定随时间变化的调制方案
- 隔离软件和硬件交互

每种测量都涉及随时间变化的 RF 信号,这些信号通常是不可预测的。为有效检定这些信号的特点,工程师需要一种工具,这种工具要能够发现难检事件,有效触发这些事件,把事件隔离到存储器中,以便能够在频域、时域、调制域、统计域和码域中分析信号行为。

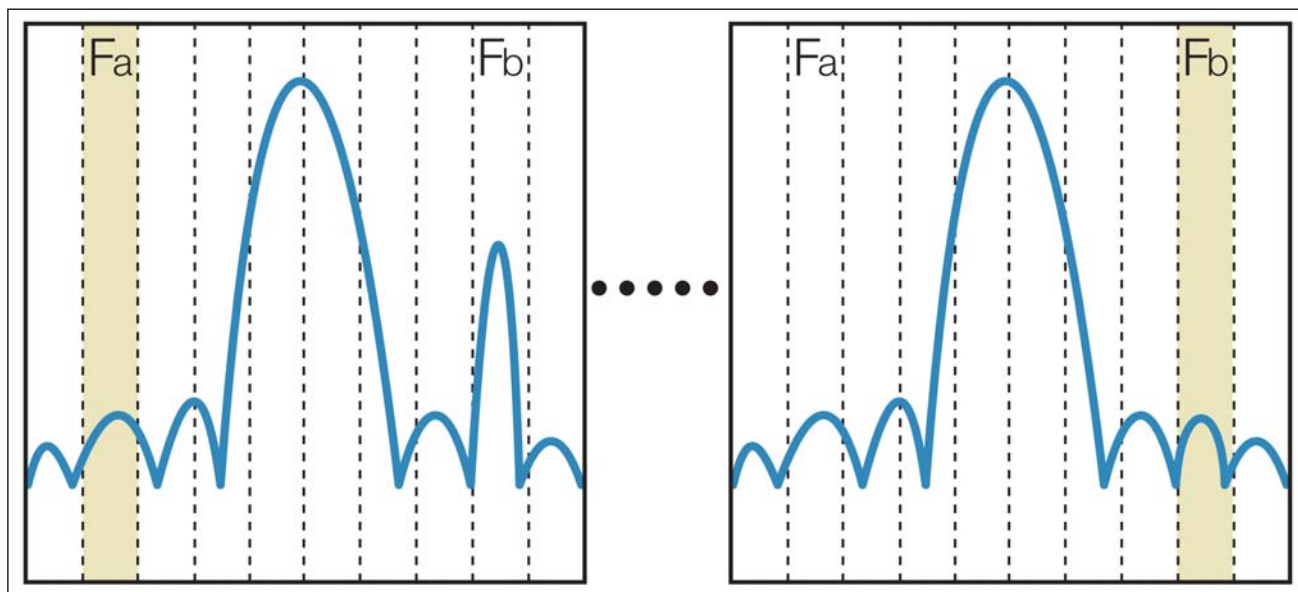


图1-1. 扫频分析仪步进通过一系列频段,通常会漏掉当前扫描频段之外发生的重要瞬态事件,如右面突出显示的棕褐色段Fb。

简单考察仪器结构

为了解 RSA 的工作方式及理解其提供的测量价值,有必要先考察两类其它的传统 RF 信号分析仪:扫频分析仪(SA)和矢量信号分析仪(VSA)。

扫频分析仪

扫描调试的超外差是几十年前第一个使工程师能够进行频域测量的传统结构。扫频分析仪最初是使用纯模拟器件构建的,之后一直随着其服务的应用不断发展。当前一代扫频分析仪包括各种数字单元,如 ADC、DSP 和微处理器。但是,基本扫描方法在很大程度上保持不变,其最适合观测受控的静态信号。扫频分析仪通过把关心的信号向下变频,并扫描通过解析带宽(RBW)滤波器的传输频带,来测量功率随频率变化。RBW 滤波器后面跟有一个检测器,检测器计算选择的频宽内每个频

率点的幅度。尽管这种方法可以提供很高的动态范围,但其缺点在于,它一次只能计算一个频率点的幅度数据。这种方法基于这样一个假设,即分析仪能够完成多次扫描,而被测信号没有明显变化。结果,这种方法要求输入信号相对稳定及不变。如果信号迅速变化,那么在统计上可能会漏掉变化。如图 1-1 所示,扫描查看频段 Fa,而在 Fb (左图)上发生了一个瞬时频谱事件。在扫描到达频段 Fb 时,事件已经消失,没有检测到事件(右图)。扫频分析仪结构没有提供一种可靠的方式,发现这类瞬态信号的存在,因此调试许多现代 RF 信号要求非常长的时间和大量的工作。除漏掉瞬时信号外,现代通信和雷达中使用的脉冲信号的频谱还可能会被错误地表示。如果不进行重复扫描,那么扫频分析仪结构不能表示脉冲占用的频谱。另外还要特别注意扫描速率和解析带宽。

实时频谱分析基础知识

入门手册

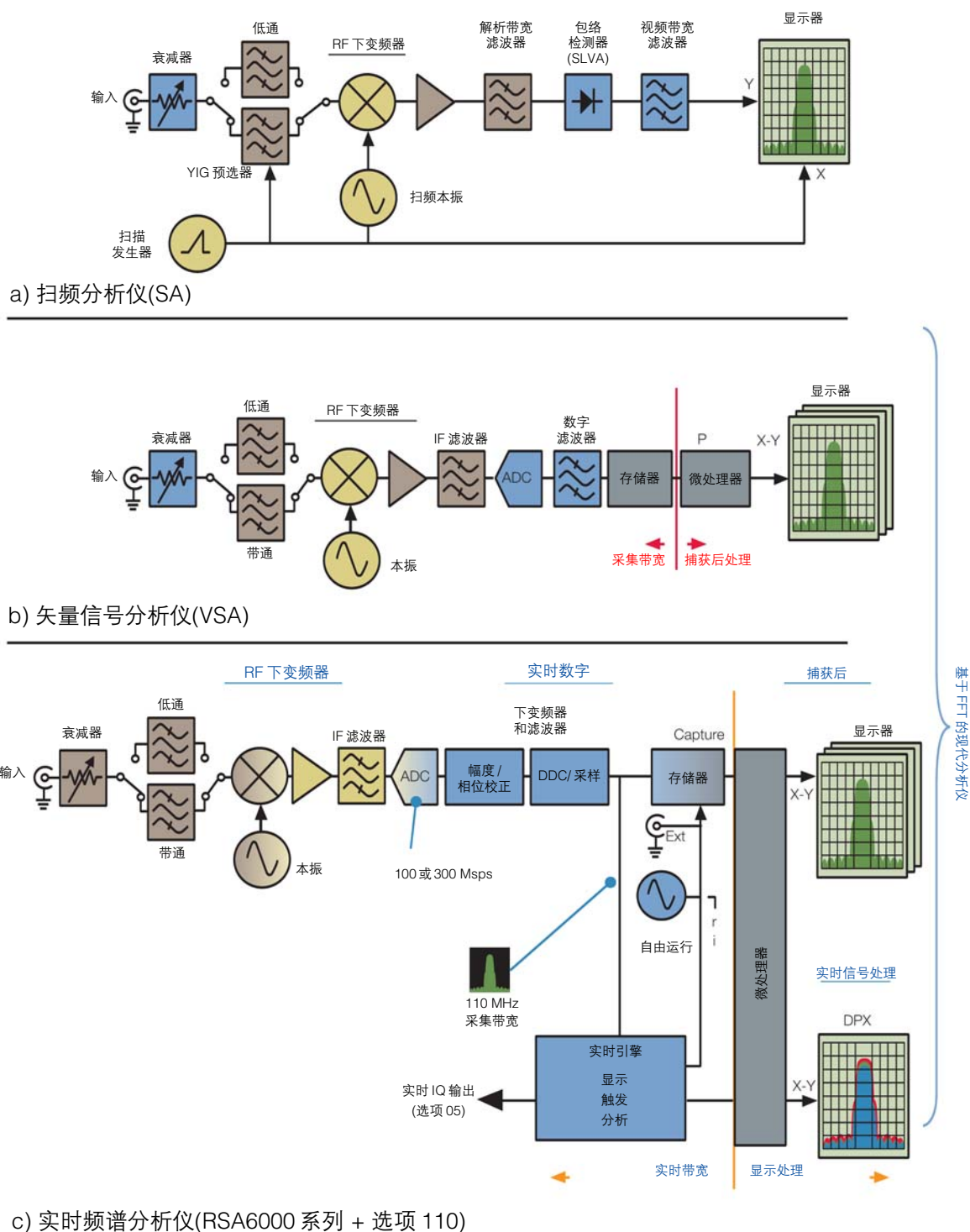


图 1-2 a, b, c: 扫频分析仪(a)、矢量信号分析仪(b)和实时频谱分析仪(c)简化的方框图。

图1-2说明了典型的现代扫频分析仪结构。尽管现代扫频分析仪已经用数字信号处理(DSP)代替了模拟功能,但基础结构和限制保持不变。

矢量信号分析仪

分析传送信号的数字调制要求进行矢量测量,以同时提供幅度信息和相位信息。图1-2b是简化的VSA方框图。

VSA 数字化仪器传输频带内部的所有 RF 功率,把数字化的波形放到存储器中。存储器中的波形同时包含幅度信息和相位信息,DSP可以使用这些信息进行解调、测量或显示处理。在VSA内部,ADC数字化宽带IF信号,下变频、滤波和检测以数字方式完成。从时域到频域的变换使用FFT算法完成。VSA 测量调制参数,如FM 偏差、码域功率和误差矢量幅度(EVM和星座图)。它还提供其它显示画面,如信道功率、功率随时间变化和频谱图。

- 尽管 VSA 增加了在存储器中存储波形的功能,但其分析瞬态事件的能力有限。在典型的 VSA 自由运行模式下,采集的信号必须存储在存储器中,然后才能进行处理。这种批处理的串行特点意味着仪器对采集之间发生的事件是看不见的。它不能可靠地发现单次事件或偶发事件。可以使用偶发事件触发功能,在存储器中隔离这些事件。遗憾的是,VSA的触发功能有限。外部触发要求事先了解有问题的事件,这可能是不现实的。IF 电平触发要求总 IF 功率必须出现可度量的变化,而在存在大的信号或信号频率变化、但幅度不变时,则不能隔离微弱的信号。而在当前的动态 RF 环境中,经常会发生这两种情况。

实时频谱分析仪

“实时”一词源于早期的物理系统数字仿真工作。如果其工作速度与被仿真的实际系统一致,那么我们就说数字系统仿真是实时工作的。

实时分析信号意味着必须以足够快的速度执行分析操作,以准确地处理关心的频段中的所有信号成分。这一定义表明,我们必须:

- 以足够快的速度对输入信号采样,以满足内奎斯特标准。这意味着采样频率必须超过关心的带宽的两倍。
- 连续地足够快地执行所有计算,以便分析输出跟上输入信号的变化。

发现,触发,捕获,分析

实时频谱分析仪(RSA)旨在解决与上一节中介绍的瞬时动态 RF 信号有关的测量挑战。RSA 使用实时数字信号处理(DSP)执行信号分析,DSP在存储器存储之前完成,而VSA结构则通常采用采集后处理。实时处理允许用户发现其它结构看不到事件,并触发这些事件,可以选择性地把事件捕获到存储器中。然后可以使用批处理在多个域中全面分析存储器内的数据。另外还可以使用实时DSP引擎,执行信号调节、校准和某些类型的分析。

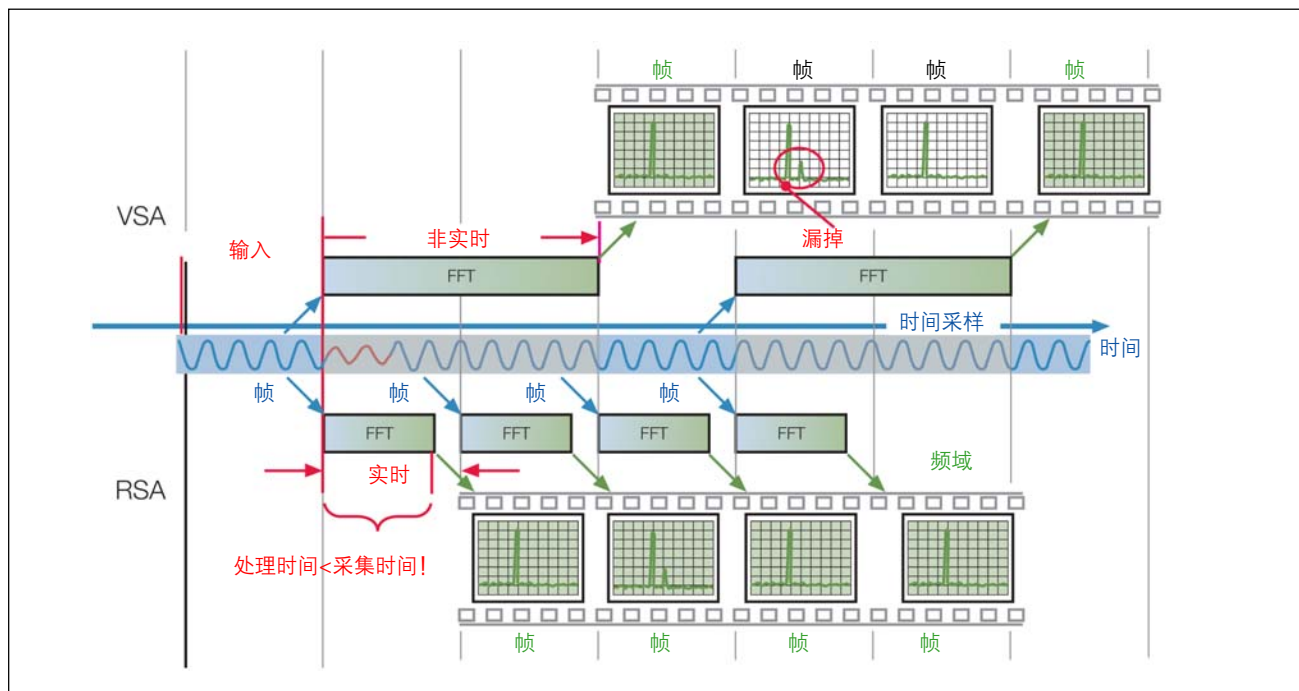


图 1-3. VSA 处理与实时频谱分析仪实时引擎处理比较。

RSA 的核心是实时处理模块，如图 1-2c 所示(第 6 页)。与 VSA 一样，它数字化宽捕获带宽。与 VSA 不同的是，实时引擎工作速度足够快，可以处理每个样点，而不会有空白，如图 1-3 所示。可以连续应用幅度和相位校正，补偿模拟 IF 和 RF 响应。不仅可以全面校正存储器中存储的数据，还可以执行所有后续实时处理，在校正的数据上操作。实时引擎支持下述功能，满足了现代 RF 分析的需求：

- 实时校正，改善模拟信号路径
- DPX® 实时 RF 显示，可以发现扫频分析仪和 VSA 漏掉的事件
- 信号发生的持续性确定的 DPX Density™ 测量和触发
- 高级时间判定触发，如欠幅脉冲触发，通用在高性能示波器中提供

- 频域触发，支持频率模板触发(FMT)
- 触发用户指定带宽，支持滤波功率触发
- 实时解调，允许用户“收听”繁忙频段中的特定信号
- 数字化数据的数字 IQ 流，允许不间断地输出信号，进行外部存储和处理

实时引擎不仅可以发现和触发信号，还可以执行许多重复的信号处理任务，释放基于软件的宝贵资源。与 VSA 一样，RSA 可以使用 DSP 进行采集后分析。它可以在时间相关的多个域中执行测量，并可以同时显示这些测量。

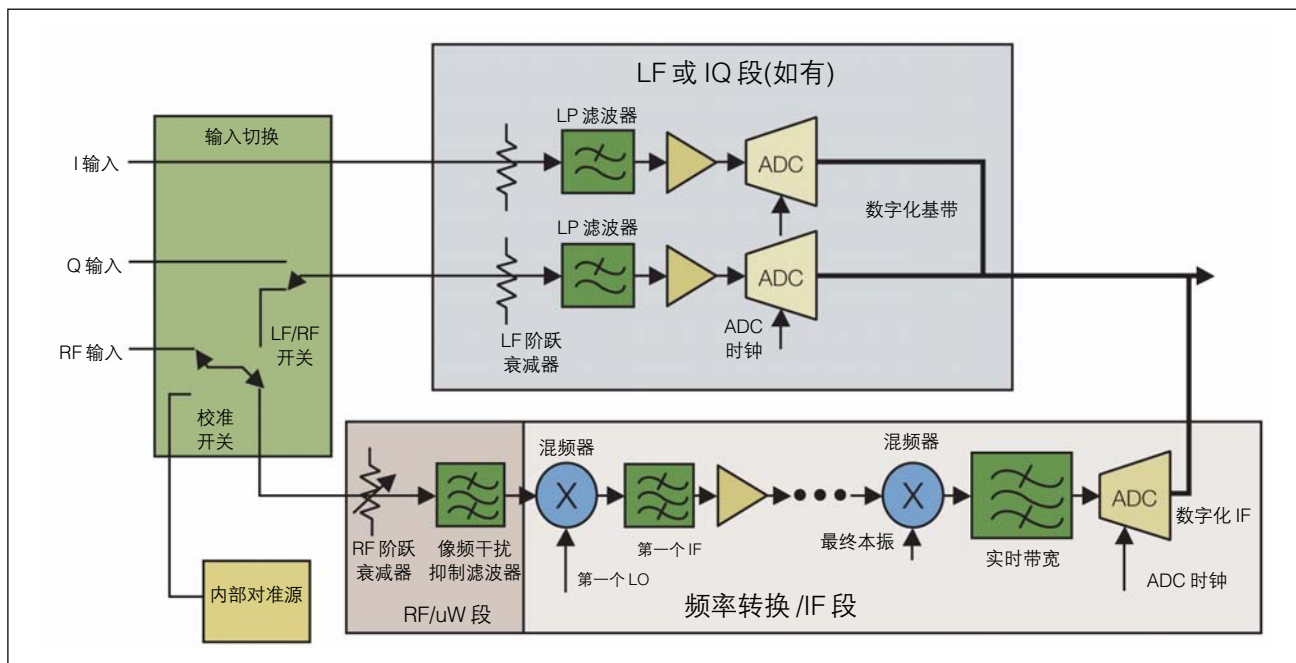


图 2-1. 实时频谱分析仪 RF/IF 方框图。

第 2 章：实时频谱分析仪的工作方式

本章提供了泰克实时频谱分析仪(RSA)的多个主要采集结构图和分析方框图。为便于讨论，其中省去了部分辅助功能。

现代实时频谱分析仪可以采集分析仪输入频率范围内任何地方的传输频带或频宽。这一功能的核心是 RF 下变频器，后面跟有一个宽带中间频率(IF)段。ADC 数字化 IF 信号，系统以数字方式执行所有进一步的步骤。DSP 算法执行所有信号调节和分析功能。

可以通过几个关键特点区分实时结构是否成功：

- RF 信号调节，提供宽带宽 IF 路径和高动态范围。
- 使用带通滤波器，而不是 YIG 预选滤波器，在每种产品的整个输入频率上同时实现无像频干扰频率转换和宽带测量。
- ADC 系统能够数字化整个实时带宽，并具有足够的保真度，支持所需的测量。

- 实时数字信号处理(DSP)引擎，实现无空白处理。
- 足够的捕获存储器和 DSP 能力，在所需的时间测量周期上实现连续实时采集。
- 集成信号分析系统，对被测信号提供多个分析视图，并在时间上相关。

RF/IF 信号调节

图 2-1 是简化的 RSA RF/IF 方框图。带有 RSA 频率范围内任何频率内容的信号都被应用到输入连接器上。一旦信号进入仪器，它们将根据用户选择的分析需求发送和调节。将应用可变衰减和增益。调谐使用多阶段频率转换及组合使用可调谐本振和固定本振(LO)实现。模拟滤波在各种 IF 频率上完成。最后的 IF 使用模数转换器数字化。所有进一步处理都使用 DSP 技术执行。某些 RSA 型号可以选配基带模式，其中直接数字化输入信号，而无需进行任何频率转换。基带信号使用的 DSP 采用的方法与 RF 信号采用的方法类似。

实时频谱分析基础知识

入门手册

输入切换和发送段

输入切换和发送段把输入波形分发到仪器内部的各种信号路径。某些RSA型号包括一条单独的DC耦合基带路径，在分析低频信号及DC耦合IQ基带路径时提高了动态范围和精度。RSA还包括内部对准源。这些对准源生成的信号带有为RSA专门订制的属性(PRBS、校准的正弦曲线、调制参考、等等)，这些信号用于自行对准程序，校正系统参数温度变化，如：

- 增益
- 所有采集带宽中的幅度平坦度
- 采集带宽中的相位线性度
- 时间对准
- 触发延迟校准

自行对准流程与采用外部设备在工厂或服务中心进行的校准相结合，构成了RSA所有关键测量指标的核心。

RF段和微波段

RF/微波段包含着宽带电路，调节输入信号，以便其拥有适当的电平和频率成分，实现最优下行处理。

阶跃衰减器

阶跃衰减器是由电阻衰减器连接盘和RF/uW开关组成的器件，用来降低宽带信号电平，降低幅度是编程确定的数量。

1. 它把输入上的RF和微波信号电平降低到最优的处理电平。阶跃衰减器还可以防止因吸收过多RF功率、导致非常高的信号而破坏输入。
2. 它在仪器的整个频率范围中提供了宽带阻抗匹配。这种阻抗匹配对保持RF信号测量精度至关重要。为此，大多数仪器指标适用于10 dB以上的输入衰减条件。

RSA使用的阶跃衰减器因设计型号不同而不同。它们一般可以编程，以5 dB或10 dB步长衰减0 dB到50 dB以上。

像频干扰抑制滤波器与YIG预选滤波器比较

RSA提供了无像频干扰的频率转换功能，可以从输入上的RF和微波信号转换到最终IF。这通过把各种滤波器放在第一个混频器前面实现。各种RSA型号使用多阶段混频方案，采用宽带滤波器，允许对整个采集带宽进行无像频干扰转换，实现可重复的指定的幅度平坦度和相位线性度。

RSA可以把输入上的RF和微波信号以无像频干扰的方式变频到最终IF上。这通过在第一个混频器前放置各种滤波器实现。多种RSA型号采用多阶段混频方案，其中采用宽带滤波器，以可重复的、指定的幅度平坦度和相位线性度，对整个采集带宽实现无像频干扰转换。在测量宽带信号时，YIG预选器滤波器引入了明显失真。在测量此类信号时，如果必须实现准确测量(特别是相位测量)，那么必须绕开窄带预选器。

这些可调谐滤波器本身是窄带滤波器。滤波通带中有明显的相位变化，在信号接近滤波器边缘时，这种情况会进一步恶化。即使我们可以通过校准来校正这些变化，但调谐机制本身在一定程度上会抵消校准。调谐通过在YIG晶体上放置一个磁场来实现，在把这个磁场调谐到不同频率，然后返回第一个频率时，磁性结构中的磁滞效应会导致其不能返回第一次调谐变化前调谐的精确频率。

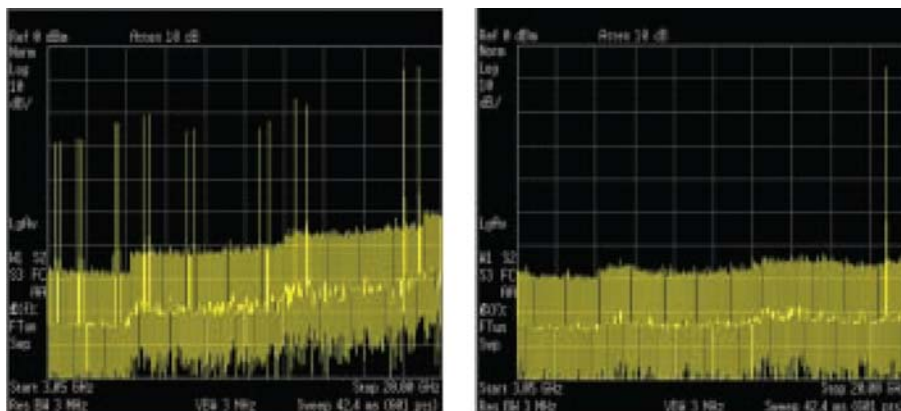


图 2-2. (左) 这是在去掉 YIG 预选滤波器时传统频谱分析仪微波频率范围内可以表示的典型单个信号。(右) 恢复预选滤波器，然后可以显示单个信号。

在每次调谐变化时，这都会导致相位校准变化。如果这还不够，那么扫描通过通带时还会出现小的幅度和相位变化，因为调谐要扫描大的频段。这些小的变化通常会随着温度一起变动。

通常情况下，为避免失真和带宽限制，采用谐波混频结构实现扫频和基于 FFT 的分析技术的频谱分析仪必需绕过 YIG 预选滤波器。图 2-2 演示了无像频干扰频率转换在微波频率上扫频操作过程中去掉预选器滤波器时可能发生的潜在问题。宽频谱中可能会出现多个响应，屏蔽真正想要的关心的信号。恢复 YIG 预选滤波器可以消除这些响应。传统频谱分析仪不能在不使响应失真的情况下显示宽带信号和无像频干扰频率转换信号。

更重要的是，像频干扰频率的存在可能会把频谱能量转换到仪器的中间频率(IF)上。这种像频干扰作为频谱窗口，不仅允许一个转换窗口，还会由于传统频谱分析仪采用的谐波混频技术而打开多个窗口。

前置放大器

某些 RSA 型号包括可以选择的前置放大器选项，在像频干扰抑制滤波器前面，在信号路径中增加增益。这种选项改善了 RSA 的噪声系数，用来分析非常弱的信号。当然，在输入上增加增益限制了可以分析的最大信号。把这个放大器切换出信号路径，会把分析仪的范围恢复到正常范围。

频率转换 /IF 段

所有 RSA 型号都可以分析中心位于分析仪频率范围内任何地方的很宽的频段。这通过把关心的频段转抱成固定 IF 实现，然后进行滤波、放大和定标。然后数字化这个 IF 信号。然后使用实时和批处理，在关心的信号上执行多域分析。

多阶段频率转换

频率转换段的目标是把所需频段中的信号真实地转换成适合模数转换的 IF。通过在多个转换差频

结构中选择本振(LO)频率，可以实现调谐，如图 2-1(第 9 页)所示。每个频率转换阶段都包含一个混频器(模拟复用器)，后面是 IF 滤波和放大。IF 频率、滤波形状、增益和电平的选择视 RSA 型号而定，实际上在每种型号内部也会变化，这与仪器设置有关，以便从以下几个方面优化性能：

- 由于混频器和滤波器不理想导致的杂散响应
- 动态范围(可以无差错地同时查看的最小信号和最大信号)
- 实时带宽中的幅度平坦度
- 实时带宽中的相位线性度
- 信号和触发路径之间的延迟匹配

内部对准源

对上面列出的部分特点，RSA 实现的性能要远远超过模拟器件实现的性能。滤波响应、延迟和增益随着温度变化，对不同仪器会有所不同。RSA 性能通过实际测量增益、滤波形状和延迟及使用 DSP 补偿测得的性能实现。宽带 RF 元件的频响和增益变化在出厂时使用校准后的设备测得，可以溯源国家计量学会，如 NIST、NPL、PTB。这种设备还用来校准内部对准源，内部校准源提供针对

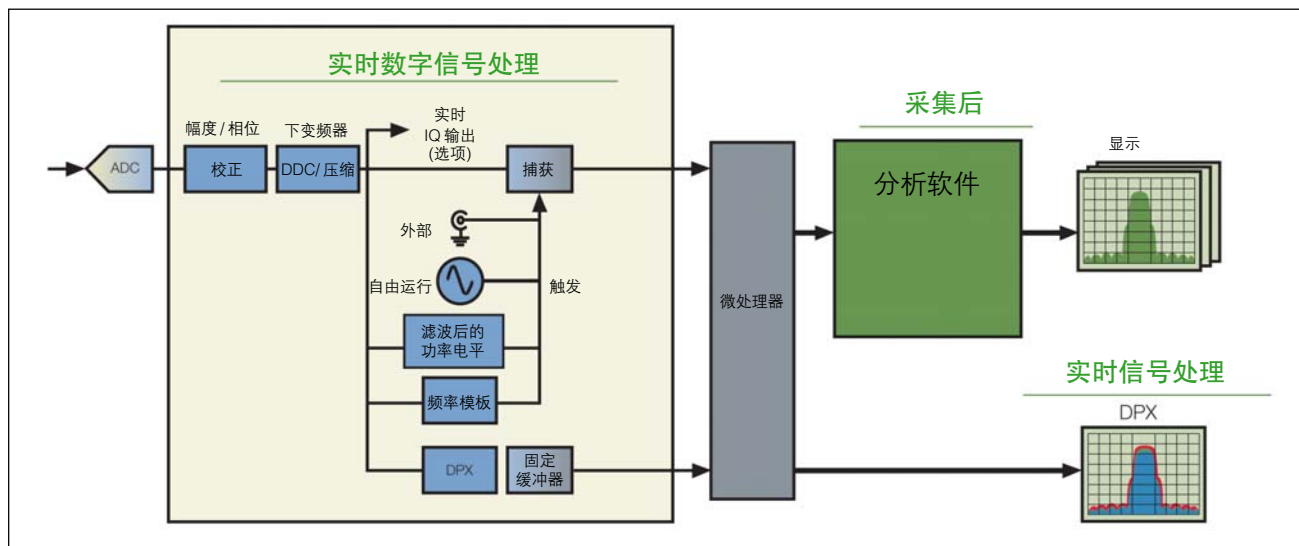


图 2-3：实时频谱分析仪数字信号处理方框图。

RSA 使用的时间和地点的信号路径条件调节的信号。
RSA 使用两种内部信号：

- 使用异常准确、温度稳定的正弦曲线信号，在参考频率(一般是100 MHz)上设置信号路径增益。这个信号是内部RF电平参考。它在采集带宽的中心设置RF功率测量精度。
- 使用校准后的宽带信号，测量实时采集带宽中的幅度和相位响应。这个信号是内部信道响应参考。它提供信息，允许 DSP 补偿采集带宽中的幅度、相位和延迟变化。

数字信号处理(DSP)概念

本节包含泰克 RSA 典型主要采集和分析模块的多个结构图。具体实现方案视型号及特定测量功能变化。为讨论清楚起见，其中省略了部分辅助功能。

实时频谱分析仪中的数字信号处理路径

泰克RSA结合使用模拟信号处理和数字信号处理(DSP)技术，把 RF 信号转换成校准的时间相关多域测量。本节将介绍 RSA 信号处理流程的数字部分。

图 2-3 显示了泰克 RSA 系列中使用的主要数字信号处理模块。来自 RF 输入的频段被转换成模拟 IF 信号，然后进行通带滤波和数字化。然后对采样的数据进行校正，校正信号路径的幅度平坦度、相位线性度和其它不理想特点。某些校正实时进行，其它校正则在信号处理路径较远的下行方向进行。

数字下变频和压缩过程把A/D样点转换成同相(I)和正交(Q)基带信号流，如下一页中的图 2-3 所示。所需信号的这个 IQ 表示方式是所有 RSA 表示信号的基本形式。然后使用 DSP，执行所有进一步的信号调节和测量。RSA 同时使用实时 DSP 和批处理模式 DSP。

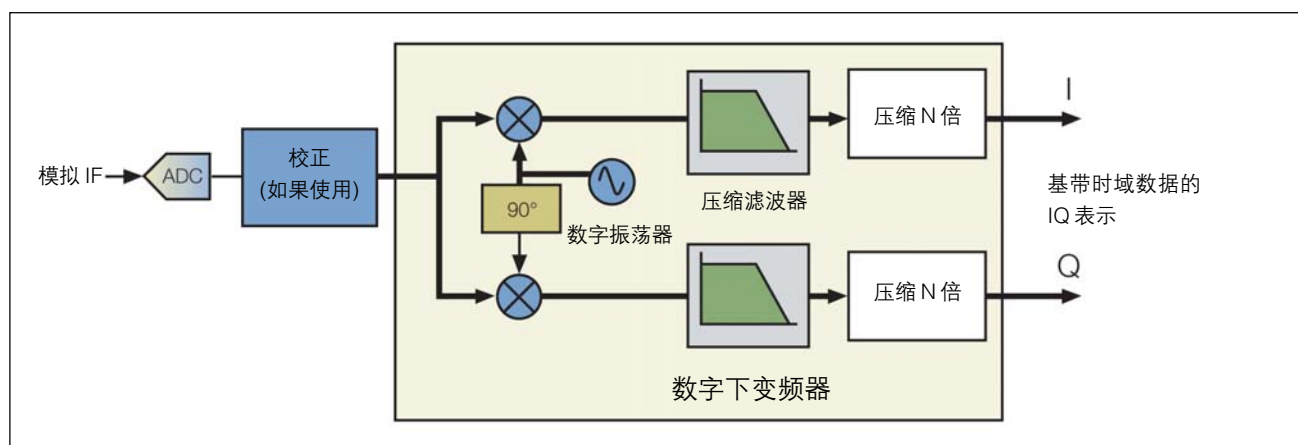


图 2-4：实时频谱分析仪中的 IF 到 IQ 转换。

IF 数字转换器

泰克 RSA 一般会数字化以中间频率 (IF) 为中心的一个频段。这个频段是可以进行实时分析的最宽的频率范围。在高 IF 上进行数字转换、而不是在 DC 或基带上进行数字转换，具有多种信号处理优势 (杂散性能、DC 抑制、动态范围等)。选择的采样率应使所需的 IF 带宽落在内奎斯特区域内，如图 2-5 所示。采样率必须至少是 IF 带宽的两倍。如果整个带宽落在 0 与 $1/2$ 、 $1\ 1/2$ 、 $2\ 3/2$ 的采样频率之间，那么可以实现采样，而没有人工信号。IF 滤波器的实际实现方式要求典型的采样率至少是 IF 带宽的 2.5 倍。

校正

RSA 幅度平坦度、相位线性和电平精度等指标远远超过构成信号路径模拟 RF 和 IF 信号调节部分的元件的性能。泰克 RSA 结合使用工厂校准和内部自行校准，补偿信号路径中的模拟元件变化 (温度、容限、老化等等)。

出厂校准

RSA 在输入频率范围内的频响在出厂时测量。采集带宽中心的 RF 行为在某个温度范围内是可以预测的，在仪器老化时变化不大。在出厂测量后，RF 响应存储在校正表中，校正表装在非易失性存储器中。

内部对准

采集带宽中的响应受到构成 IF 处理路径的混频器、滤波器和放大器组成的影响。这些组件在 RSA 采集的宽带宽上可能会有细颗粒的幅度和相位波纹。内部对准过程测量相对于中心频率偏置的幅度和相位响应。对准在使用仪器的时间和地点完成，可以手动触发或相对于温度触发。这个响应存储在存储器中。

校正流程

RSA 校正过程把工厂中测量的 RF 响应与内部对准过程中测量的 IF 响应结合在一起，为一套校正滤波器生成 FIR 系数，补偿输入连接器和 ADC 之间整个路径的幅度平坦度和相位响应。这些校正滤波器在实时数字硬件中实现，或在基于软件的 DSP 中实现，具体视 RSA 型号而定，并应用到数字化 IQ 流中。

数字下变频器 (DDC)

表示通带信号常用的、计算效率高的方式是使用波形的复数基带表示方式。

RSA 使用 Cartesian 复数形式，把时间采样的数据表示为信号的 I (同相) 和 Q (正交) 基带成分。这使用数字下变频器 (DDC) 实现，如图 2-3 所示。

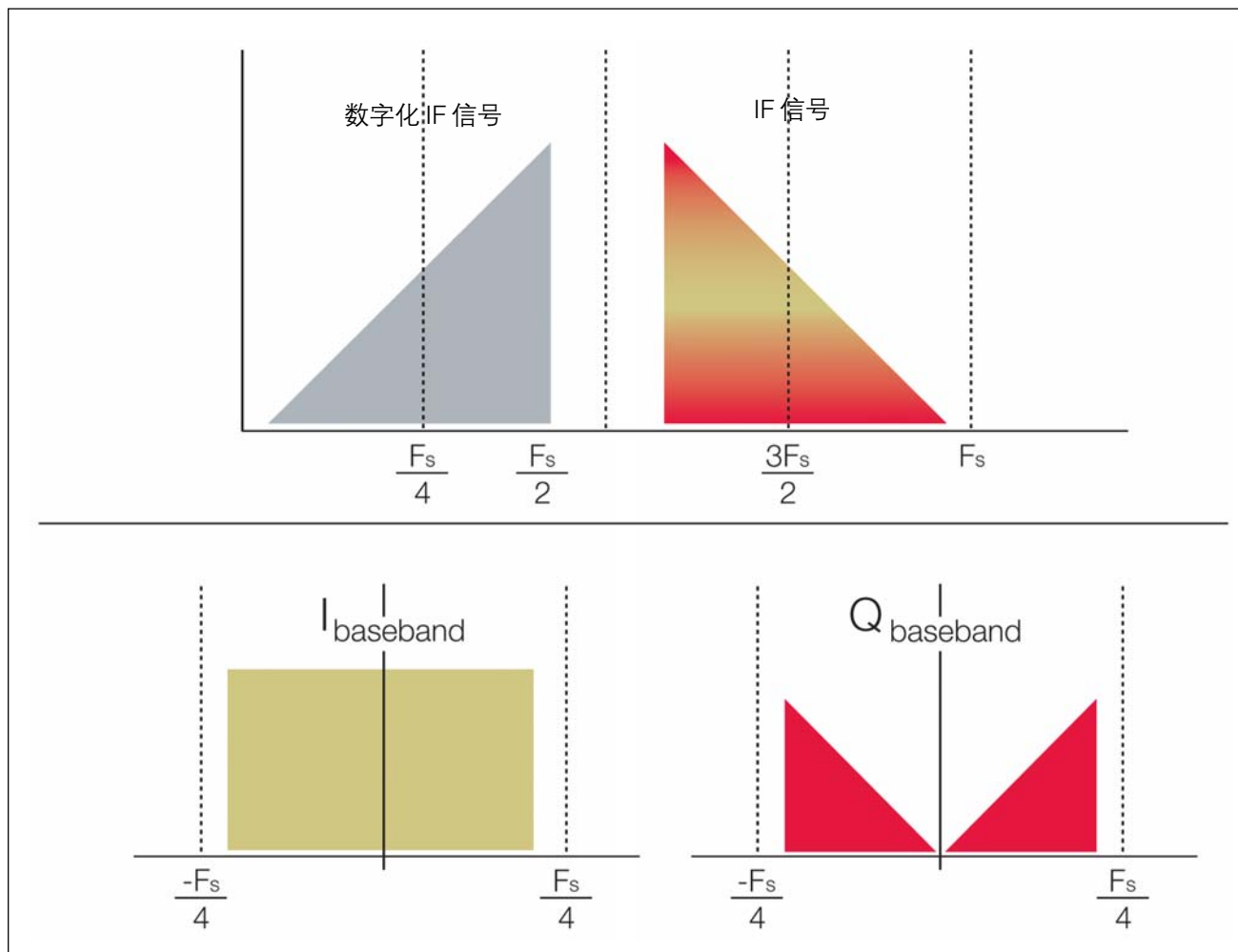


图 2-5：即使只是采样率的一半，I 和 Q 仍保持传输频带信息。

一般来说，DDC 包含一个数字振荡器，数字振荡器在关心的中心频段上生成正弦和余弦。正弦和余弦以数字方式乘以数字化 IF，生成 I 和 Q 基带样点流，其中包含原始 IF 中包含的所有信息。DDC 不仅用来把数字化 IF 信号转换成基带信号，还用来在 RSA 中实现频率微调。

IQ 基带信号

图2-5显示了获得频段、并使用正交下变频将其转换到基带中的过程。在 1.5 倍采样频率和采样频率之间的空

间中包含着原始 IF 信号。采样在零和 1.5 倍采样频率之间生成这个信号的像频干扰。然后信号乘以关心的传输频带中心的相干正弦和余弦信号，生成 I 和 Q 基带信号。基带信号是实数值，在原点两边对称。正负频率中包含着同样的信息。原始传输频带中包含的所有调制也包含在这两个信号中。每个信号要求的最低采样频率现在是原始频率的一半，然后可以两两压缩。

压缩

内奎斯特定理指出，对基带信号，只需以等于关心的最高频率两倍的速率采样。对通带信号，采样率至少是带宽的两倍。在所需的带宽小于最大值时，可以降低采样率。通过降低采样率或压缩，可以平衡频宽、处理时间、记录长度和存储器使用量。例如，泰克 RSA6000 系列在模数转换器上使用 100 MS/s 采样率，数字化 40 MHz 带宽或频宽。I 和 Q 记录 DDC 之后的结果，这个 40 MHz 频宽滤波和压缩的有效采样率是原始采样率的一半，即 50 MS/s。样点的总数没有变化：我们得到两个样点集合，每个集合的有效采样率是 50 MS/s，而不是速率为 100 MS/s 的单集。对更窄的频宽将进一步进行压缩，导

致对相同数量的样点得到更长的时间记录。降低有效采样率的缺点是降低了时间分辨率，优点是在时间记录一定时减少了计算工作，降低了存储器使用量。

压缩滤波

在压缩时，必须也遵守内奎斯特要求。如果数据速率下降两倍，那么数字信号的带宽也必须下降两倍。在降低采样率前，必须使用数字滤波器完成这一点，以防止出现假信号。泰克 RSA 使用多种压缩等级。每种等级都包含一个数字滤波器，然后减少样点数。压缩和滤波的另一个优势是在带宽下降时噪声下降，这种噪声下降通常称为处理增益。

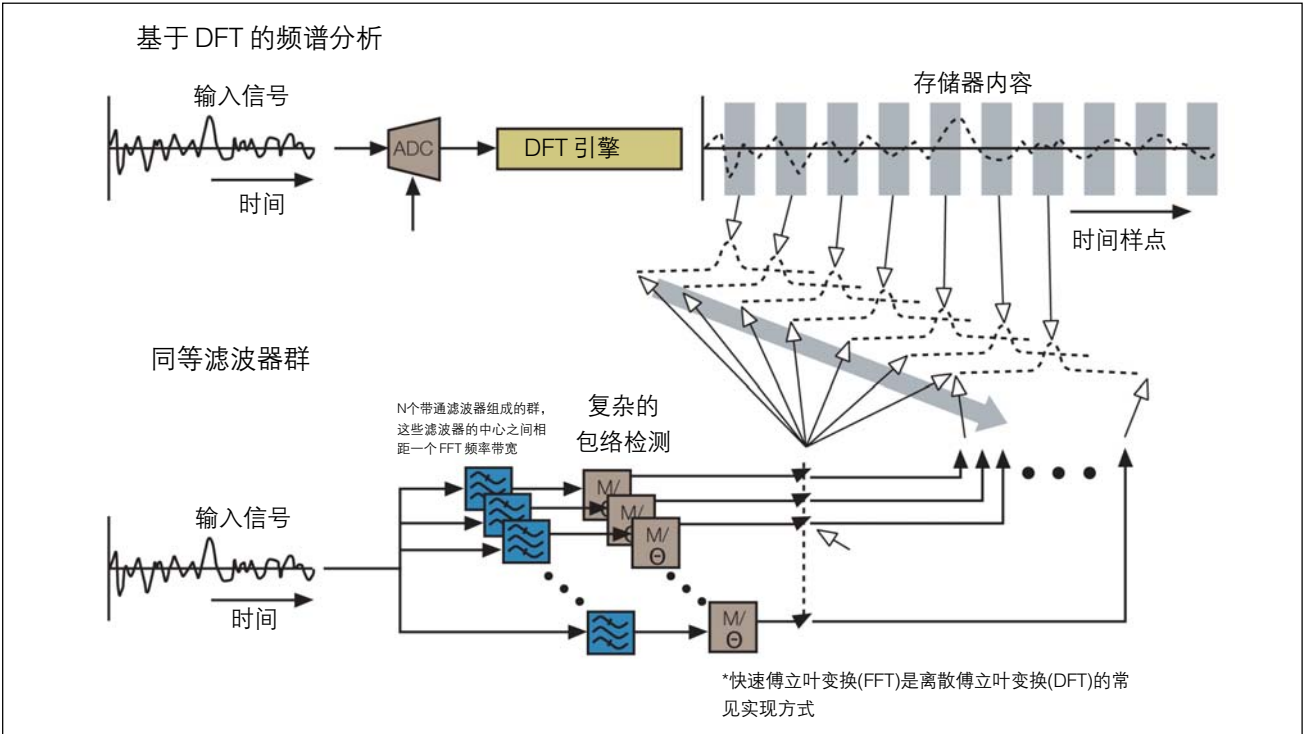


图 2-6. 基于 DFT 的频谱分析仪及采用带通滤波器群的同等实现方案。

把时域波形转换到频域

频谱分析也称为傅立叶分析,用来把一个输入信号的各种频率成分隔开。典型的频谱分析仪显示画面绘制各个频率成分相对于频率的电平。曲线开始频率和结束频率之差是频宽。在执行重复离散傅立叶变换(DFT)时,如

果其执行方式使得信号处理与输入信号保持一致,那么我们把频谱分析称为实时频谱分析,如图2-6所示。在没有严格满足实时要求时,还可以使用重复傅立叶变换,发现、捕获和分析频域中的偶发瞬态事件。

实时频谱分析

频谱分析要想归入实时类别中，必须没有间隙地、不确定地处理关心的频宽内包含的所有信息。RSA 必须获得时域波形中包含的全部信息，把信息转换成频域信号。实时完成这一点必须满足多个重要的信号处理要求：

- 提供足够的捕获带宽，支持分析关心的信号
- 足够高的 ADC 时钟速率，捕获带宽要超过内奎斯特标准
- 足够长的分析间隔，支持关心的最窄解析带宽(RBW)
- 足够快的 DFT 变换速率，关心的 RBW 超过内奎斯特标准
- DFT 速率超过内奎斯特 RBW 标准，这要求重叠 DFT 帧
- 重叠程度取决于窗口函数
- 窗口函数取决于 RBW

对直到最大实时采集带宽的频宽，当前 RSA 满足了上面列出的频率模板触发(FMT)的实时要求。因此，触发频域事件会考虑选定采集带宽中包含的所有信息。

发现和捕获瞬态事件

快速重复傅立叶变换的另一个应用是发现、捕获和观察频域中的偶发事件。一个实用指标是以 100% 概率捕获单个不重复事件的最小事件周期。最小事件定义为在指定精度能够以 100% 确定性捕获的最窄矩形脉冲。可以检测更窄的事件，但精度和概率可能会下降。发现、捕获和分析瞬态事件要求：

- 提供足够的捕获带宽，支持分析关心的信号
- 足够高的 ADC 时钟速率，捕获带宽要超过内奎斯特标准
- 足够长的分析间隔，支持关心的最窄解析带宽(RBW)
- 足够快的 DFT 变换速率，关心的 RBW 超过内奎斯特标准

RSA6000 系列 DPX 频谱模式每秒可以测量 292,000 个频谱，能够以全部精度指标及 100% 概率检测最短 10.3 ms 的 RF 脉冲。扫频分析仪(SA)每秒扫描 50 次，要求脉冲长于 20 毫秒，才能以 100% 概率及全部精度检测脉冲。

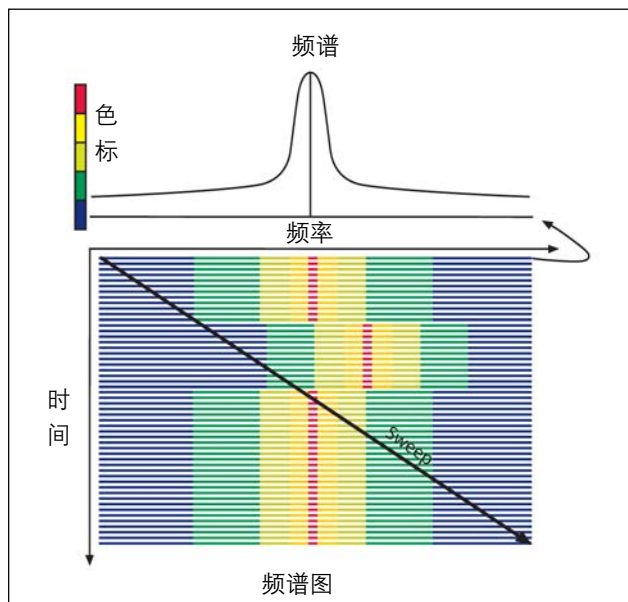


图 2-7. 频谱、频谱图和扫描。

RSA 与扫频分析仪比较

考虑一下上一页描述的 RSA 系统。关心的传输频带被下变频到 IF，然后数字化。时域样点以数字方式转换成基带记录，其中包括一系列 I(同相)样点和 Q(正交)样点。在 IQ 记录的各个段上顺序执行 DFT，生成占用频率随时间变化的数学表示，如图 2-6 所示(第 16 页)。

获得等间隔顺序 DFT 在数学运算上相当于使输入信号

通过一群通带滤波器，然后在每个滤波器输出上对幅度和相位采样。频域行为随时间变化情况可以表示为频谱图，如图 2-7 所示，其中横轴是频率，竖轴是时间，幅度用颜色表示。实时 DFT 以计算新频谱的速率高效地对全部进入信号采样。在执行 FFT 的时间段之间发生的事件会丢失。RSA 最小化或消除了“死区时间”，它执行基于硬件的 DFT，通常以最快的采样率在重叠的时间段上执行变换。

相比之下，扫频分析仪在任何给定时间会调谐成单个频率。随着扫描推进，频率会变化，形成图 2-7 中所示的对角线。在扫描速度放慢时，直线的斜率会变陡，以便零频宽中频谱分析仪的函数能够表示为一条竖线，表明随着时间推移，仪器被调谐成单个频率。图 2-7 还显示了扫描会怎样漏掉瞬态事件，如图中的单个跳频。

实时频谱分析仪上的 RBW

频率分辨率是一个重要的频谱分析仪指标。在我们试图测量频率相距很近的信号时，频率分辨率决定着频谱分析仪区分这些信号的能力。在传统频谱分析仪上，IF 滤波器带宽决定着解析相邻信号的能力，也称为解析带宽 (RBW)。例如，为解析幅度相等的、但频率相距 100 kHz 的两个信号，RBW 必需小于 100 kHz。

对基于 DFT 技术的频谱分析仪，RWB 与采集时间成反比。在采样频率相同时，为实现更小的 RBW，要求更多的样点。此外，窗口函数也影响着 RBW。

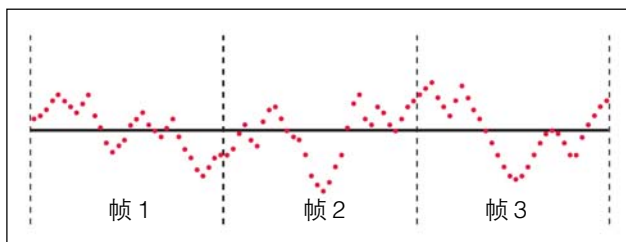


图 2-8. 采样的时域信号的两个帧。

窗口函数

在离散傅立叶变换(DFT)分析运算中,一个固有的假设是要处理的数据是单个周期定期重复的信号。图2-7描述了一系列时域样点。例如,在图2-8中的帧2上应用DFT处理时,信号上会进行周期性扩展。在连续的帧之间一般会发生不连续点,如图2-9所示。

这些人为的不连续点生成原始信号中不存在的杂散响应,这种效应会导致不准确地表示信号,称为频谱泄漏。频谱泄漏不仅会在输出中生成输入中不存在的信号,在附近存在大信号时,还会降低观察小信号的能力。

泰克实时频谱分析仪应用窗口技术,降低频谱泄漏的影响。在执行DFT前,DFT帧乘以窗口函数,样点间的长度相同。窗口函数通常呈钟形,减少或消除了DFT帧尾的不连续点。

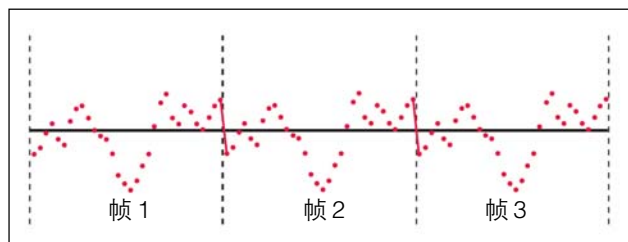


图 2-9. 单个帧中样点的周期性扩展导致的不连续点。

窗口函数的选择取决于频响特点,如旁瓣电平、等效噪声带宽和幅度误差。窗口形状还决定着有效 RBW 滤波器。

与其它频谱分析仪一样, RSA 允许用户选择 RBW 滤波器。RSA 还允许用户选择多种常用的窗口类型。直接指定窗口形状提高了灵活性,允许用户优化特定测量。例如,应特别注意脉冲信号的频谱分析。如果脉冲周期比窗口长度短,那么应使用均匀的窗口(没有窗口函数),避免在DFT帧两端产生去加重效应。如需与这一主题有关的进一步信息,请参阅泰克入门手册“了解实时频谱分析仪的FFT重叠处理技术”。

实时频谱分析基础知识

入门手册

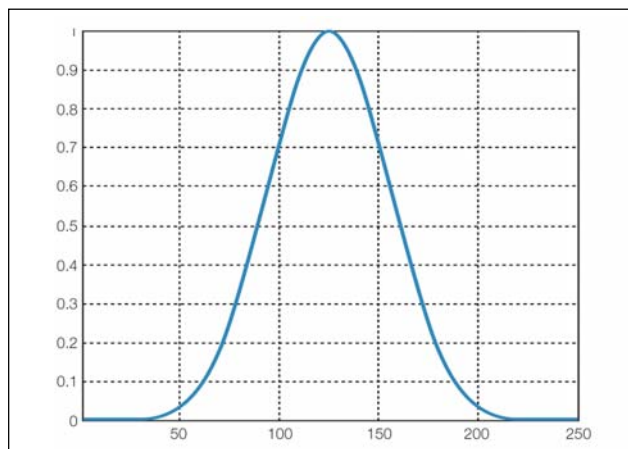


图 2-10. 时域中的 Kaiser 窗口(beta 16.7)(横轴是时间样点, 竖轴是线性标度)。

窗口函数的频响幅度决定着 RBW 形状。例如, RSA6000 上的 RBW 定义为 3 dB 带宽, 与 DFT 中采样频率和样点数量的关系如下:

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

或

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

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量, F_s 是采样频率。对 $\beta=16.7$ 的 Kaiser 窗口, k 约为 2.23。RBW 形状系数定义为 60 dB 和 3 dB 的频谱幅度之间的频率比, 约为 4:1。在 RSA6000 上, 频谱分析测量使用公式 2, 根据输入频宽和 RBW 设置, 计算 DFT 要求的样点数量。

图 2-10 和图 2-11 显示了 RSA6000 分析使用的 Kaiser 窗口的时域和频谱。这是 RSA6000 在频谱分析中使用的默认窗口。用户可以选择其它窗口(如 Blackman-Harris, Uniform, Hanning), 满足专门的测量要求, 在执行仪器中提供的部分测量时, 也可以使用其它窗口。

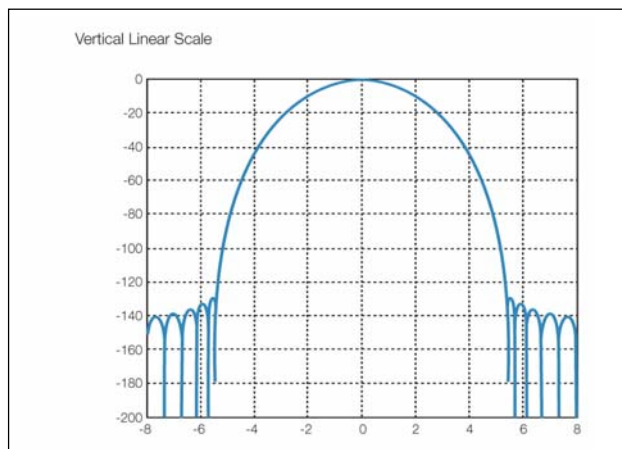


图 2-11. Kaiser 窗口(beta 16.7)的频谱。横轴标度单位是频率二元组(F_s/N), 竖轴标度是 dB。

实时频谱分析仪中的离散傅立叶变换(DFT)

DFT 定义如下:

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

这是实时频谱分析仪的基础, 用来从输入序列 $x(n)$ 中估算各个频率成分 $x(k)$ 。DFT 基于模块, N 是每个 DFT 模块(或帧)的样点数。输入序列 $x(n)$ 是输入信号 $x(t)$ 的采样版本。尽管只为 n 的整数值定义输入序列, 但输出是 k 的连续函数, 其中 $k=(N\Omega)/(2\pi)$, Ω 是弧度频率。X[k] 的幅度表示 $x(n)$ 输入序列中存在的频率 Ω 上频率成分的幅度。

有许多高效的 DFT 计算方法, 如快速傅立叶变换(FFT)和 Chirp-Z 变换(CZT)。实现方法的选择取决于应用的特定需求。例如, CZT 在选择频率范围和输出点数方面要比 FFT 灵活。FFT 的灵活性较差, 但要求的计算较少。RSA 中同时使用 CZT 和 FFT。

[参考资料 1] Oppenheim, A.V. 和 R.W. Schaffer, 离散时间信号处理, Prentice-Hall, 1989, p. 453。

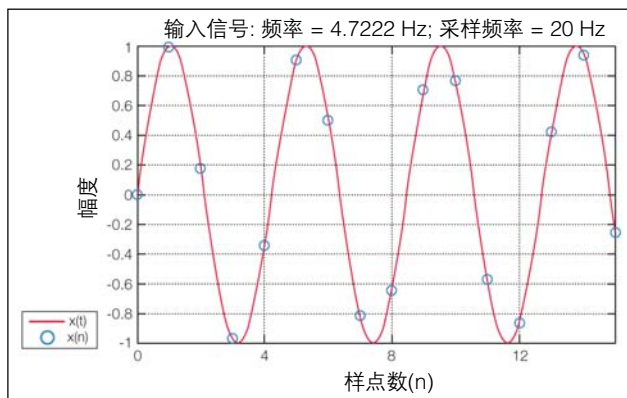


图 2-12. 输入信号。

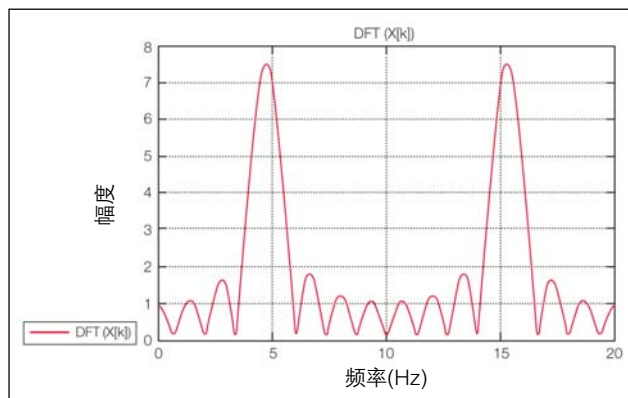


图 2-13. 连续求解 $x(n)$ 的 DFT。

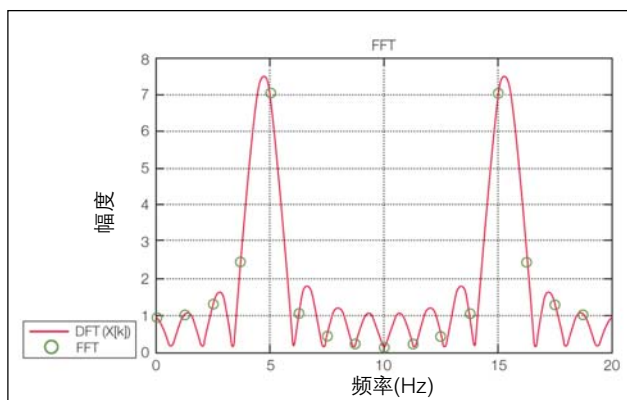


图 2-14. $x(n)$ 的 FFT, FFT 的长度 $= N = x(n)$ 的长度。

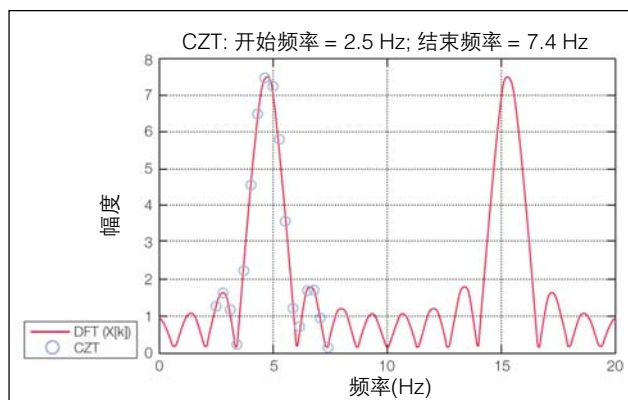


图 2-15. $x(n)$ 的 CZT。

解析频率成分的能力不仅依赖于特定的DFT实现方案，还取决于输入序列的时间长度或 RBW。

为说明 DFT 与 FFT 及 CZT 的关系，我们将分析一个采样的连续波(CW)信号。为清楚起见，我们将使用实数值的正弦波 $x(t)$ 作为输入信号(图 2-12)。 $x(t)$ 的采样版本是 $x(n)$ 。在这种情况下， $N = 16$ ，采样率是 20 Hz。

图 2-13 显示了对 $0 \leq k < N$ ，DFT 的求解结果。注意，对 $\Omega > \Pi$ ($f > 10$ Hz)， $X[k]$ 的幅度是上半部分的镜像。这是实数值输入序列 $x(n)$ 的结果。在实践中，在分析实际输入信号时，会丢掉(或不计算) $\Pi < \Omega < 2\Pi$ 的结果。对复数输入，对 $0 \leq \Omega < 2\Pi$ ($0 \leq f < 20$ Hz) 可以获得唯一的结果。

FFT 返回 $X[k]$ 的 N 个等间隔频域样点。 $X[k]$ 的幅度如图 2-14 所示。注意，FFT 返回的样点可能会漏掉 $X[k]$ 的幅度峰值。

CZT 可以返回带有任意开始频率和结束频率的 M 个频域样点(图 2-15)。注意，CZT 不会改变 DFT 的底层频域输出。它只会提取与 FFT 不同的一套频域样点。

使用 CZT 的优势是可以任意选择频域中第一个样点和最后一个样点的频率，而不依赖于输入采样率。通过任意控制输入采样率，以便 FFT 的输出得到与 CZT 相同的输出样点，也可以获得相同的结果。在这两种情况下，最终结果是相同的。选择纯粹是实现问题，根据要求和可用的硬件，这两种方案都可能都是次优解决方案。

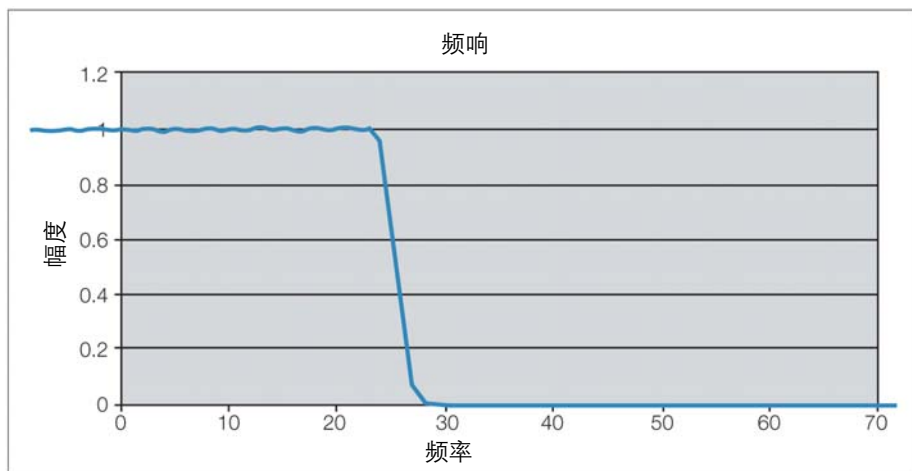


图 2-16. 低通滤波器的频响。

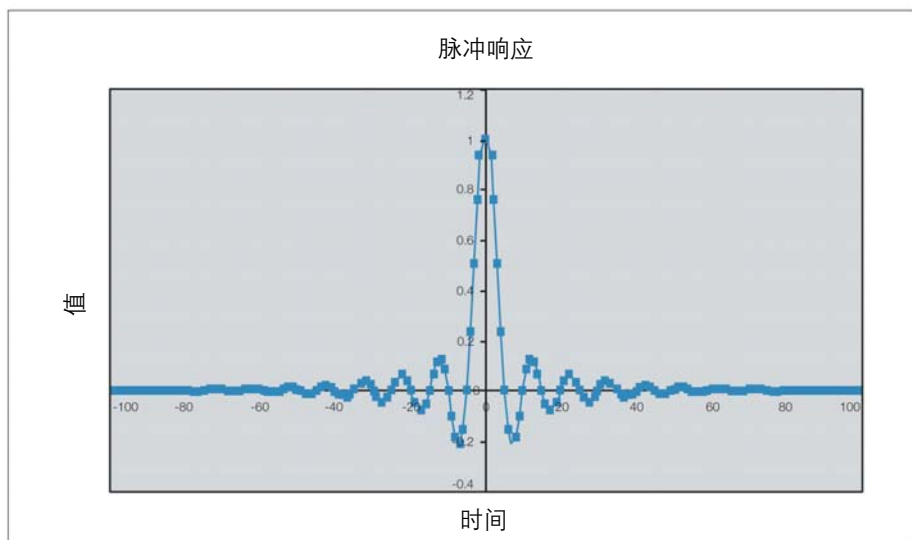


图 2-17. 图 2-15 中低通滤波器的脉冲响应。

数字滤波

有限脉冲响应(FIR)滤波器

许多应用使用频率滤波器，选择某些频率，拒绝其它频率。传统滤波器使用模拟电路单元(RLC)实现，而DSP则以数学方式选择要增强或衰减的频率。一种常见的数学实现方式是有限脉冲响应(FIR)滤波器。RSA全面使用FIR滤波器。除要求传送或拒绝特定频段的普通信号调节应用外，FIR滤波器还可以用来调节模拟信号路径的不理想特点。内部生成的对准数据与存储的工厂校准数据结合在一起，创建其响应补偿模拟信号路径频响的FIR滤波器，使模拟路径和数字路径级联拥有平坦的幅度响应和线性相位。

频响与脉冲响应

傅立叶变换定理说明了频域和时域之间具有同等性。它进一步告诉我们，设备的转函(通常用随频率变化的幅度和相位响应表示)等于测量期间的脉冲响应。FIR滤波器使用时间周期有限的离散时间近似方法，仿真所需滤波转函的脉冲响应。然后通过使用滤波器的脉冲响应对输入信号求卷积，执行信号滤波。

后通过使用滤波器的脉冲响应对输入信号求卷积，执行信号滤波。

图 2-16 显示了低通滤波器的转函幅度。图 2-17 显示了其脉冲响应。

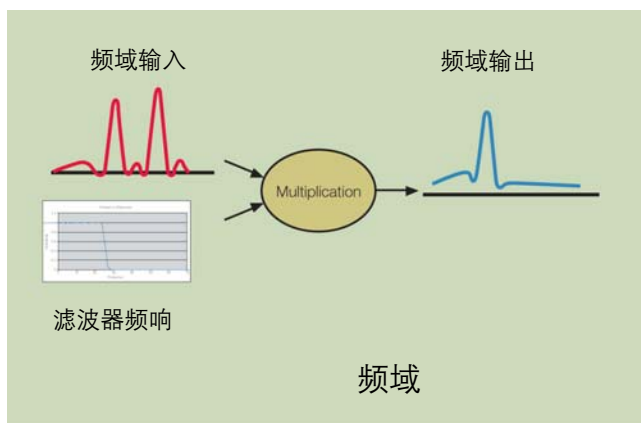


图 2-18. 滤波器乘以频响。

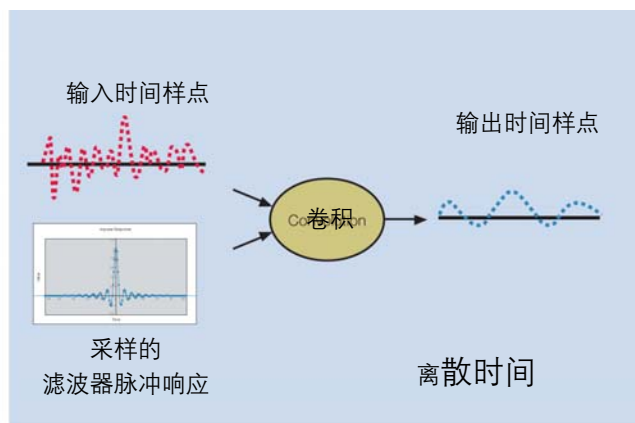


图 2-19. 时域中的卷积等于频域中的乘数。

数值卷积

频域通常用来分析线性系统的响应，如滤波器。信号用频率成分表示。通过把输入信号频谱乘以滤波器的频响，计算得出滤波器输出上的信号频谱。图 2-18 说明

了频域操作。傅立叶定理指出，频域中的乘数等于时域中的卷积。上图中的频域乘数等于使用滤波器的脉冲响应对输入信号的时域表示求卷积，如图 2-19 所示。

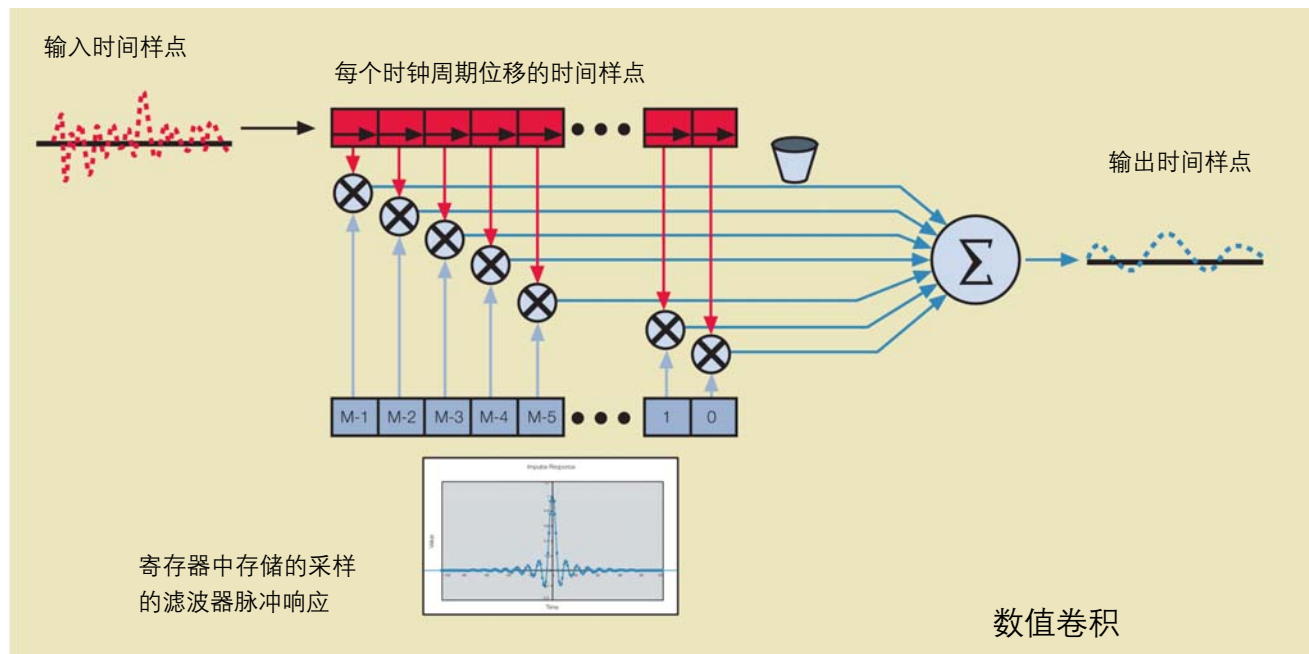


图 2-20. 离散时间数值卷积。

所有频率滤波器都需要使用存储器单元。模拟滤波器中常用的无功单元带有存储器,因为其在电路中的输出取决于电流输入及各个时点上的输入。可以使用图 2-20 所示的实际存储器单元,构建离散时间滤波器。

下方寄存器用来存储滤波器的脉冲响应值,较早的样点在右面,较晚的样点在左面。上方寄存器用来把输入信号从左面移到右面,每个时钟周期位移一次。每个对应寄存器的内容乘在一起,得到的所有乘积每个时钟周期加总一次,加总的结果得到滤波后的信号。

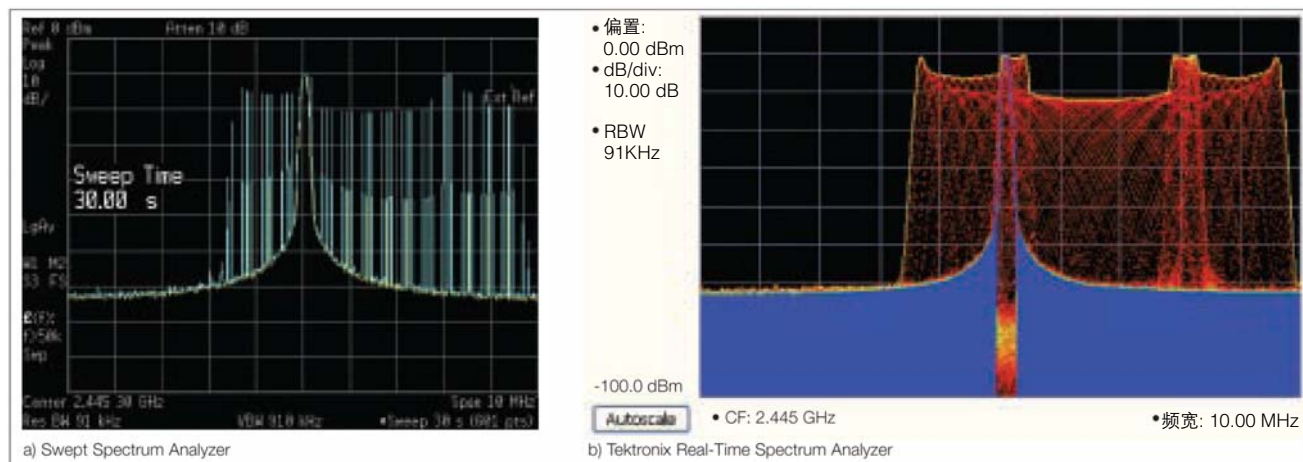


图 2-21 a, b. 比较: (a) 扫频分析仪在 120 秒后的 MaxHold 曲线; (b) 泰克实时频谱分析仪, 在 20 秒后的 DPX 位图 MaxHold 曲线。

总之, RSA在频谱分析中严重依赖数字信号处理。适用于 RSA 的 DSP 要点包括:

RSA6000 使用 FFT 和 CZT 组合, 实现频谱显示。

- FFT 的计算效率更高, 可以实现更快的变换速率, 而 CZT 要更加灵活, 可以为一套固定的输入样点提供可变的解析带宽。
- 通过在执行傅立叶变换前对时域信号应用优化的窗口函数, 可以实现解析带宽(RBW)形状。RBW 由 3 dB 带宽和 60 dB:3 dB 形状系数指定, 指定方式与模拟实现方案相同。一般来说, 数字实现的滤波器的形状系数要低于(急剧于)模拟实现方案, 可以更简便地解析相距很近的幅度差异很大的信号。

通过应用优化的窗口函数, 其它形状系数可以用于特定应用。

在执行频谱分析时, RSA3000 系列 RSA 结合使用多种方法。

- 在 Spectrum 模式下, 开窗口的 FFT 的结果使用 RBW 形状求卷积, 得到具有指定 RBW 的 Spectrum 曲线, 这与模拟频谱分析仪类似。这一过程得到大约 5:1 的形状系数, 略宽于 RSA6000 的 4.1:1。

- 在 DPX 模式下, CZT 用于解析带宽灵活性。
- 在 RSA 模式下, 使用开窗口的 FFT, 在 FFT 分析的典型方法中指定噪声带宽。噪声带宽大约比 RBW 高 6% (0.25 dB)。

在本节中, 我们看到, 数字实现的校正和滤波是置入 RSA 要求的高变换速率的关键因素。在下一节中, 我们将考察怎样在 RSA 提供的独特显示画面—数字荧光频谱显示中有效使用这些滤波器。

DPX 技术: 革命性的信号发现工具

泰克已获专利的数字荧光技术或 DPX 揭示了传统频谱分析仪和 VSA 完全漏掉的信号细节(图 2-20)。DPX 频谱的实时 RF 显示技术显示了您以前没有见过的信号, 用户可以立即查看信号, 大大加快发现和诊断问题的速度。DPX 是所有泰克 RSA 的标配功能。

实时频谱分析基础知识

入门手册

数字荧光显示

“数字荧光”一词源自包在阴极射线管(CRT)上的荧光，电视机、计算机监视器和其它测试设备显示器都使用阴极射线管。在电子束激活荧光时，它会发出荧光，照亮电子流画出的路径。

尽管液晶显示器(LCD)之类的光栅扫描技术由于厚度和低功率优势最终在许多应用中代替了CRT，但CRT中的荧光层和矢量图相结合，为现代测试测量应用提供了多种优势。

余辉：即使在电子束经过之后，余辉仍会继续发光。一般来说，荧光会迅速衰落，其速度足可以使观众感受不到其逗留时间，但即使非常少量的余辉，仍能使人眼检测到太短而看不到的事件。

比例性：电子束通过荧光层屏幕上某个点的速度越慢，得到的光线越亮。在电子束的频次加大时，某个点的亮度也会提高。用户可以直观地了解怎样解释这个Z轴信息：轨迹上亮的部分表明频繁的事件或缓慢的电子束移动；暗的轨迹则源自不频繁的事件或快速移动的电子束。

采用LCD(或光栅CRT)和数字信号路径的仪器本身没有提供余辉和比例性。泰克研制出数字荧光技术，以实现矢量CRT的模拟优势，数字示波器和现在的RSA则进一步改善了这种技术。数字增强功能如辉度等级、可选的颜色方案和统计轨迹，可以在更少的时间内传达更多的信息。

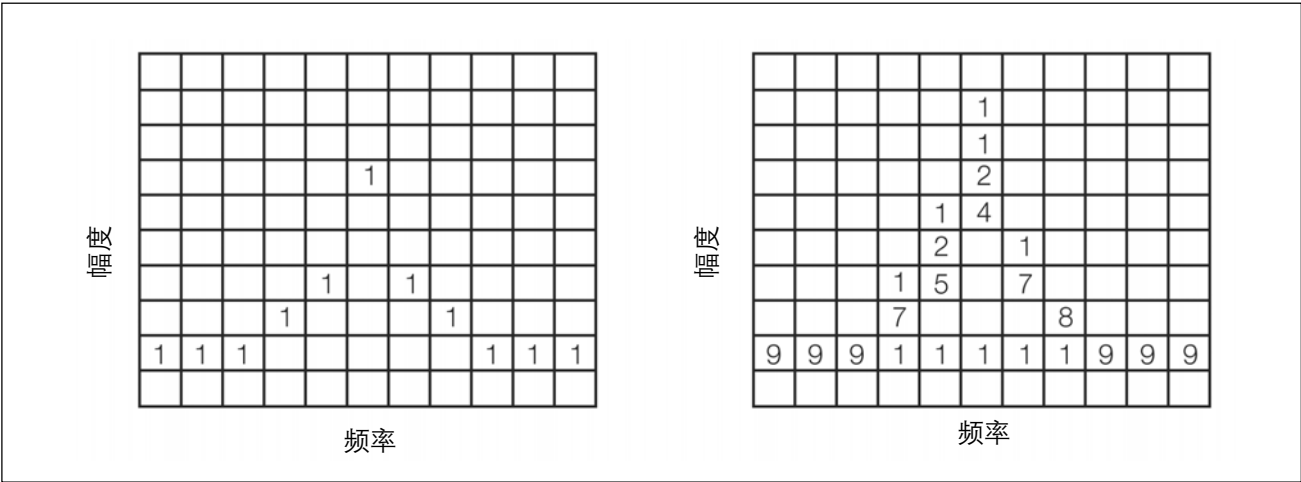


图 2-22. 在更新 1 次(左)和更新 9 次(右)后三维位图数据库实例。注意每一栏包含的“触发”总数相同。

DPX 显示引擎

DPX 技术在 RSA 中的作用的最简单描述是其每秒执行数千次频谱测量，以实时速率更新屏幕。它每秒进行数千次采集，并变换成频谱。这么高的变换速率对检测偶发事件至关重要，但它对 LCD 太快了，因此 LCD 不能跟上其变化，同时超出了人眼能够感受到的水平。所以，进入的频谱全速写入一个位图数据库中，然后以人眼可以看到的速率传送到屏幕上。这个位图数据库可以想象成把一个频谱图划分成代表轨迹幅度值的行和代表频率轴上点的列，而得到的一个密集网格。这个网格中的每个单元都包含着进入频谱的触发次数。通过跟踪这些次数，数字荧光技术实现了比例性，使得用户能够用眼睛把很少发生的瞬变与普通信号和背景噪声区分开来。

RSA 中的实际 3-D 数据库包含着数百个列和行，但我们将使用一个 11X10 矩阵说明这一概念。图 2-21 中的左图说明了在绘制一个频谱后数据库单元格中可能包含的内容。空白单元的值为零，意味着频谱中没有任何点落入其中。

发生次数	颜色
0	黑色
1	蓝色
2	浅蓝色
3	青色
4	竹绿色
5	绿色
6	黄色
7	橙色
8	桔红色
9	红色

图 2-23. 颜色映射算法实例。

右面的网格是我们简化的数据库在额外执行 8 次频谱变换后可能包含的值，其结果存储在单元格中。从噪底的一串“1”值可以看出，在没有信号时，恰好计算了九个频谱中的一个频谱。

在发生数量值映射到颜色标度时，数据转换成信息。图 2-23 中的表格显示了本例使用的颜色绘制算法。暖色(红色、橙色、黄色)表示发生频次高。还可以使用其它辉度等级方案。

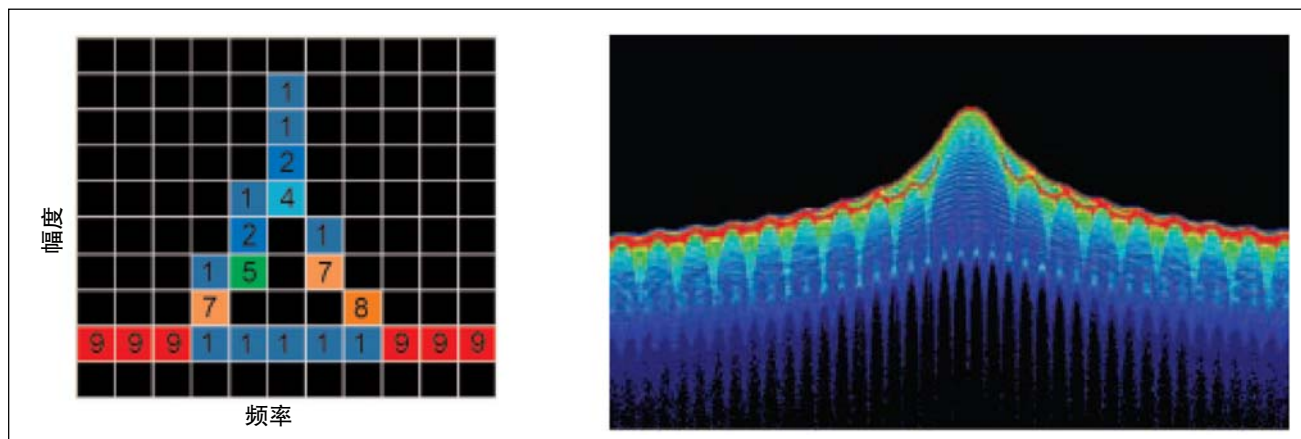


图 2-24. 带颜色编码的低分辨率实例，其中包括温度位图(左)，并显示了频谱位图和实际 DPX 画面(右)。

在图 2-24 中，左图是根据 9 个频谱写入次数绘制数据库单元格颜色的结果。在屏幕上显示这些彩色单元格、每个像素一个单元，可以产生壮观的 DPX 显示，如右图所示。

余辉

例如，在 RSA6000 系列中，每秒有 292,000 多个频谱进入数据库。在 14,600 多个输入频谱的每个帧的末尾(约每秒 20 次)，位图数据库传送出去，进一步处理，然后进行显示，来自新帧的数据则开始填充位图。

为实现余辉，DPX 引擎可以保持现有数量，在新频谱中到达时增加数据，而不是在每个新帧开始时把位图数据库数量清为零。在所有帧中保持全部数量值是“无穷大余辉”。如果每个数量只有一部分传送到下一个帧，那

么称为“可变余辉”。通过调节比重，可以改变信号事件从数据库衰落及从显示屏上衰落所需的时间长度。

想象一个信号在数字荧光引擎运行过程中只弹出一次。此外，假设在一个帧全部 1465 次频谱更新中都存在这个信号，同时假设可变余辉系数在每个帧后面导致 25% 的衰减。它影响的单元将从 1465 值开始，并全力显示。在一个帧之后，发生次数值变成 1099。在另一个帧之后，发生次数值变成 824，然后越来越小，直到看不见了。在 RSA 屏幕上，用户最初会看到一条明亮的轨迹，尖峰位于信号频率上。发生信号的轨迹部分最终衰落。在此期间，像素在低于衰落信号的噪声电平以下开始变亮。最后，在显示屏中只有一条基线轨迹(如下一页图 2-25 所示)。

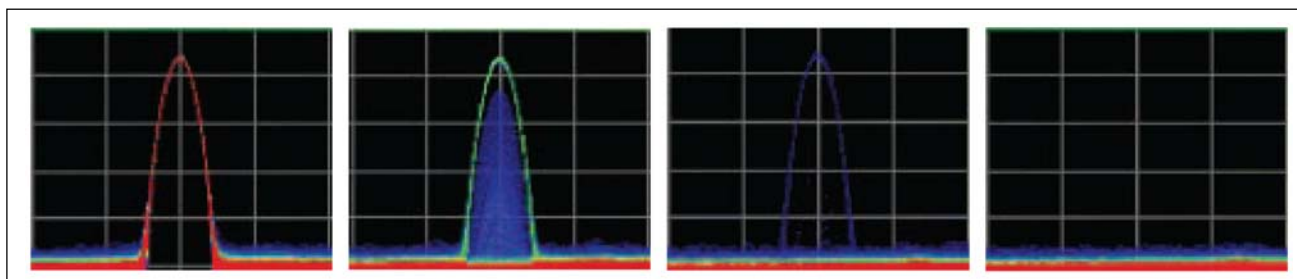


图 2-25. 在可变余辉中，DPX 捕获的简单 CW 信号在衰落前、在可调节的时间周期内保留在显示画面中。

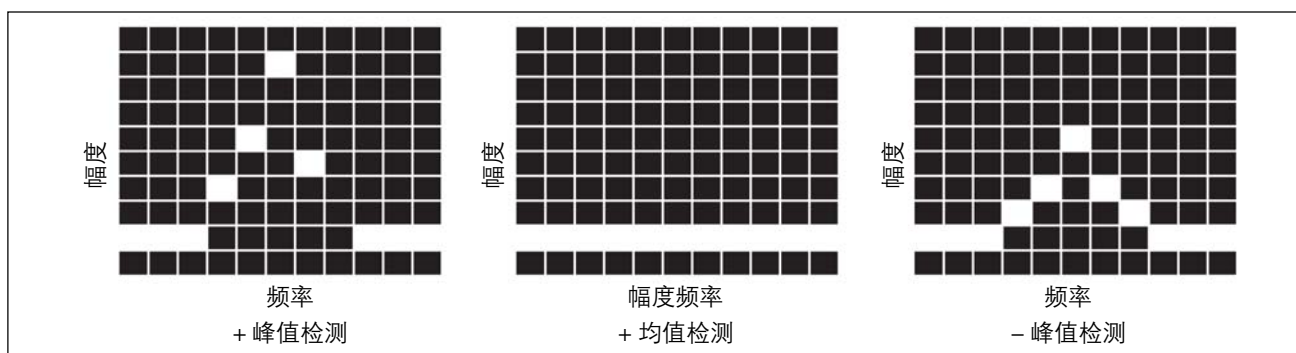


图 2-26. 检测的曲线实例：+Peak Detection (左); - Peak Detection (中); Average Detection (右)。

余辉提供了特别重要的调试工具，实现了 MaxHold 及其它功能的所有优势。为确定是否有间歇性信号或偶尔发生频率或幅度漂移，用户可以启动无穷大余辉，让 RSA 连续运行。在用户回到仪器旁边时，不仅可以看到每个频点的最高电平，还可以看到最低电平及之间的任何点。一旦已经发现存在瞬变行为或侵入信号，用户可以使用可变余辉详细地检定问题。

统计直线图

彩色位图是 DPX 频谱的标志性轨迹，但 DPX 也生成统计直线轨迹。它查询数据库内容，获得每个频率列中记录的最高幅度值、最低幅度值和平均幅度值。得到的三个轨迹检测是 +Peak、-Peak 和 Average(图 2-26)。

+Peak 和 -Peak 轨迹即时清楚地显示信号的最大值和最小值。均值检测确定每个频点上信号的中间值。可以保存和恢复所有这三条轨迹，作为参考轨迹使用。

与普通频谱轨迹一样，可以在连续采集中累加 DPX 直线轨迹，得到 MaxHold、MinHold 和 Average 轨迹函数。在 DPX +Peak 轨迹上使用 Hold 的方式几乎与普通频谱分析仪上的 MaxHold 轨迹完全相同，但有一个重要差异是，DPX 曲线的更新速率要高出几个量级。

DPX 变换引擎

那么这些频谱是怎样生成的呢？除大多数测量使用的软件批处理及使用相同的输入 IQ 数据流外，还有一个基于硬件的计算引擎，专门进行连续的实时信号处理。这一子系统支持实时功能，如功率电平触发、频率模板触发等等。它还以足够快的速度执行 DFT，生成 DPX 显示系统使用的频谱速率。

DPX 密度测量

“密度”指标用来衡量 DPX 频谱位图某个区域内部存在信号的规定测量周期内的时间量。干净的 CW 音调的密度是 100%，而每毫秒读取中启动一微秒的脉冲的密度则是 0.1%。

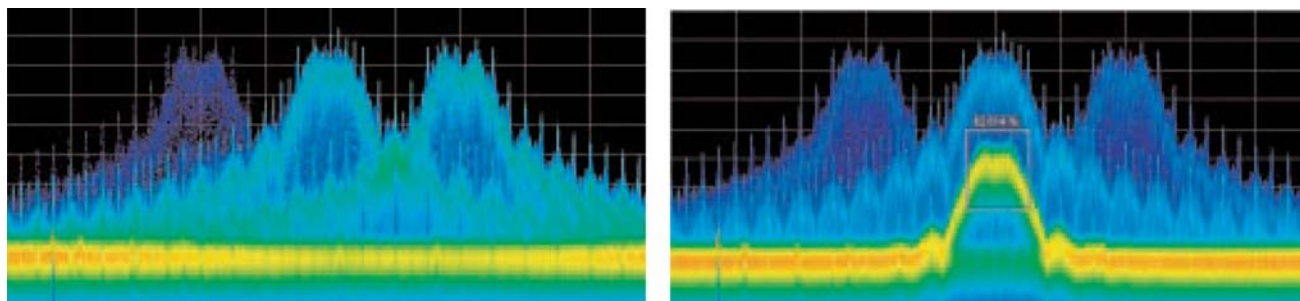


图 2-27. 密度触发功能实例。左：自由运行的 DPX 频谱画面，显示脉冲随频率变化。中间的短脉冲偶尔会在瞬间出现，但仅仅使用 Run/Stop 按钮很难捕获到。右：已触发的 DPX 画面，显示未触发的画面中没有显现的低幅度脉冲。分析仪被设置成在用户画的框中的平均密度达到 50% 或以上时触发。

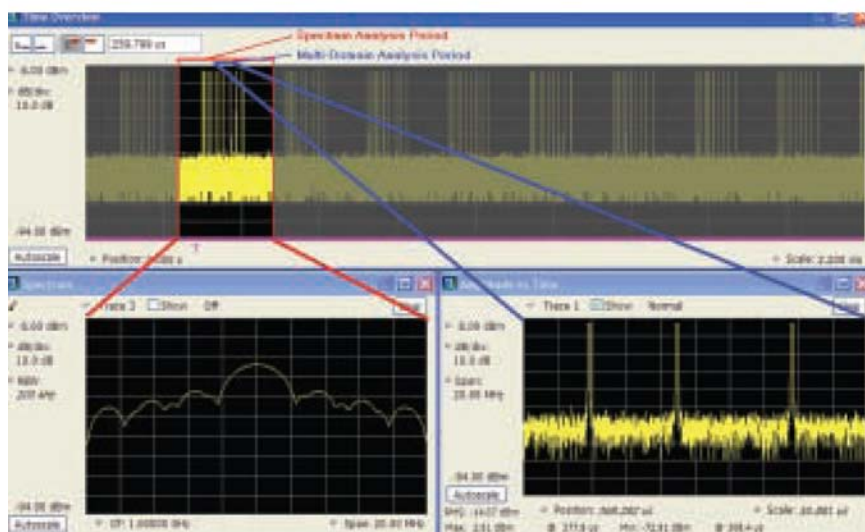


图2-28. RSA6000中显示的时间概况及频谱长度和多域分析长度指示符。

定时和触发

实时处理功能实现了 DPX 显示，使 RSA 成为强大的发现工具。DPX 密度触发可以区分精确的幅度频率范围内的信号，操作人员不必了解目标信号的任何特点。如需进一步了解泰克已获专利的 DPX 技术的高级功能，请参阅技术入门手册：“频谱分析仪 DPX 采集技术基础知识入门手册”。

DPX 没有保持可以在多个域中重新分析的时域记录。捕获和其它分析要求信号写入存储器中，为分析选择波

形中关心的区域。本节将介绍 RSA 的触发、采集和分析周期控制功能，如图 2-28 所示(RSA6000 系列)。

在与触发一起使用时，定时控制为分析瞬时参数或其它定时相关参数提供了强大的组合。采集长度规定了响应触发的样点存储在存储器中的时间长度。采集历史决定着在每个新触发后将保留多少个以前的采集。泰克 RSA 在时域概况窗口中显示了整个采集长度。

频谱长度决定着计算的频谱显示图的时间长度。频谱偏置决定着触发事件瞬间直到显示的 FFT 帧开始的

延迟时间或提前时间。频谱长度和频谱偏置的时间分辨率都是一个 FFT 帧。RSA3000 系列使用固定的 FFT 长度，高性能 RSA6000 系列分析仪则提高了灵活性，允许在查看频谱时改变 FFT 长度。泰克 RSA 在时域概况窗口底部，使用色条表示频谱偏置和频谱长度。色条颜色被键入到相关的显示画面中。

分析长度决定着进行调制分析及其它基于时间的测量的时间长度。分析偏置决定着从触发瞬间直到分析开始时的延迟时间或提前时间。泰克 RSA 在时域概况窗口底部使用一个色条表明分析偏置和长度。色条颜色被键入到相关的显示画面中。

输出触发指示符允许用户在触发瞬间选择性地启动TTL后面板输出。它可以用来把RSA测量与其它仪器同步，如示波器或逻辑分析仪。

实时触发和采集

实时频谱分析仪能够执行时间、频谱和调制分析。触发对捕获时域信息至关重要。RSA 提供了独特的触发功能，它提供了功率触发和频率模板触发及常用的功率触发、外部触发和基于电平的触发。

最常见的触发系统是大多数示波器中使用的触发系统。在传统模拟示波器中，要观察的信号输送到一个输入中，而触发则输送到另一个输入中。触发事件导致启动水平扫描，信号幅度则显示为重叠在校准的格线上的垂直位移。在最简单的形式下，模拟触发支持在观察的触发器之后发生的事件，如图 2-29 所示。

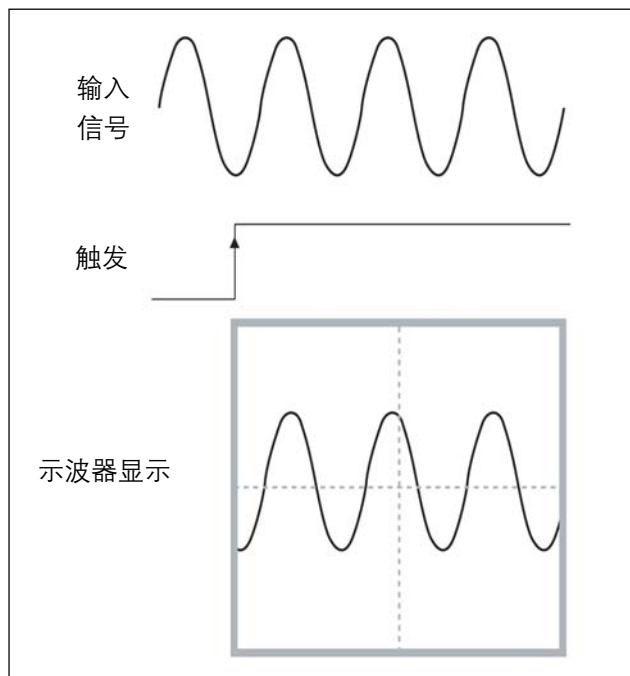


图 2-29. 传统示波器触发。

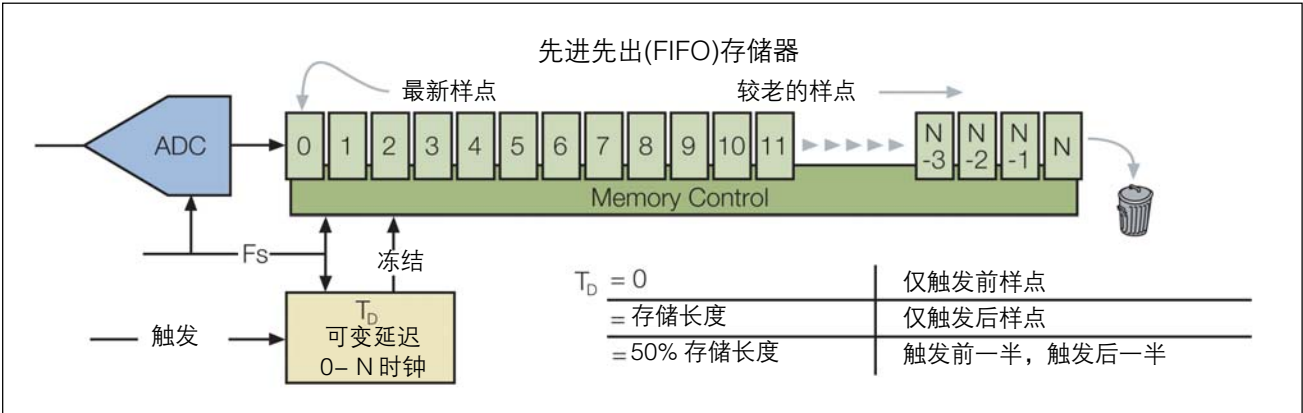


图 2-30. 数字采集系统中的触发技术。

系统触发与数字采集

DPX 能够以数字方式表示和处理信号，配以大的存储容量，可以捕获触发前及触发后发生的事件。

泰克RSA中的数字采集系统采用模数转换器(ADC)，在深存储器中填充接收的信号时戳。从概念上说，新样点连续输送到存储器中，最老的样点将离开存储器。图2-30 中的实例说明了配置成存储 N 个样点的存储器。触发发生时采集停止，存储器内容被冻结。在触发信号通路中增加可变延迟，将支持在触发前发生的事件及在捕获后出现的事件。

我们看一下没有任何延迟的实例。在触发同步的样点存储后，触发事件导致存储器立即冻结。然后存储器会包含触发时的样点及触发前发生的“N”个样点。它只存储触发前的事件。

再看一下把延迟设置成与存储长度完全匹配的实例。在触发发生后、存储器冻结前，可以有“N”个样点进入存储器中。然后存储器包含触发后“N”个信号活动样点。它只存储触发后的事件。

如果延迟设成存储长度的一部分，那么既可以捕获触发前事件，也可以捕获触发后事件。如果延迟设置成存储

深度的一半，那么存储的一半样点是触发之前的样点，存储的一半样点是触发之后的样点。这种概念与传统扫频分析仪中零频宽模式使用的触发延迟类似。但是，RSA 可以捕获长得多的时间记录，然后可以在频域、时域和调制域中分析这些数据。这为信号监测和设备调试等应用提供了一个强大的工具。

触发模式 and 特点

自由运行模式采集收到的IF信号样点，而没有考虑任何触发条件。在采集和处理时，将显示频谱、调制或其它指标。

已触发模式要求触发源及设置各种参数，定义触发条件及与触发对应的仪器行为。

选择连续触发还是单次触发决定着每次触发发生时是重复采集，还是每次在准备测量时只采集一次。触发位置可以在0-100%范围内调节，可以选择码组的哪个部分是触发前的部分。如果选择10%，那么捕获的触发前数据是选择的码组的 1/10，捕获的触发后数据是选择的码组的 9/10。触发坡度允许选择上升沿、下降沿或其组合进行触发。上升和下降可以捕获整个突发。上升和下降可以捕获其它连续信号中的间隔。

触发源	触发信号	设置单位	时间不确定性	备注
外部	外部触发连接器	电压(可变)或 TTL	RSA3300: ± 40 ns RSA3400: ± 20 ns RSA6000: ± 12 ns	RSA3000: 1 个外部触发输入 RSA6000: 2 个外部触发输入 (前面板和后面板)
功率电平触发	在电流采集带宽内计算功率	功率或相对于全标的 dB	± 1 个时域点 (基于有效采样率)	RSA6000 在触发中增加了用户可以设置的滤波带宽
频率模板触发	在 FFT 处理器输出上逐点比较	dB 和 Hz, 基于屏幕上画出的图形模板	± 1 个帧长度	帧长度 (基于有效采样率)
DPX 密度触发	用户自定义幅度频率区域和信号密度	在屏幕上画出基于 dB 和 Hz 的长方形区域, 以及密度测量百分比	大约 50 ms	RSA6000 系列, 带有选项 200
时间判定触发	计算功率, 并与逻辑条件和偏置定时相结合	功率, 超出和低于 dB 值, 时间偏置	± 1 个时域点 (基于有效采样率)	RSA6000 系列, 带有选项 200

表 2-1. 实时频谱分析仪触发源比较。

实时频谱分析仪触发源

泰克 RSA 提供了多种内部触发和外部触发方法。表 2-1 概括了各种实时触发源、其设置及与每种设置有关的时间分辨率。

外部触发允许外部 TTL 信号控制采集。这一般是一个控制信号, 如来自被测系统的频率切换命令。这个外部信号会提示用户在被测系统中采集事件。

内部触发取决于被测信号的特点。各种 RSA 型号都能根据数字化信号的电平、滤波和采样后的信号功率或使用 FMT 在发生特定频谱成分时触发采集。每个触发源和触发模式都在频率选择度、时间分辨率和动态范围方面提供了特定的优势。图 2-31(下一页)显示了支持这些特点的功能单元。

电平触发把 ADC 输出上的数字化信号与用户选择的设置进行比较。即使在观察要求进一步滤波和采样的窄频

宽时, 仍可以使用数字化信号的全部带宽。电平触发采用全数字化速率, 可以在全部采样率时检测时长短到一个样点的事件。但是, 下行分析的时间分辨率受到采样的有效采样率的限制。部分 RSA 型号提供了电平触发功能。

功率触发计算滤波和采样后的信号功率。每个滤波的 I/Q 样点对的功率(I^2+Q^2)与用户选择的功率设置进行比较。某些 RSA 型号提供了滤波后的功率触发, 其中把带有可选择带宽的滤波器应用到触发路径中的信号上。

DPX Density 触发使用与 DPX Density 测量相同的基于屏幕的测量框。触发系统监测密度测量数据, 在密度值超过可调节的密度门限时激活触发。

时间判定触发可以与所有其它触发方法相结合, 并在触发中使用计算的功率、逻辑条件和偏置定时, 实现快速采样率定时不确定度。

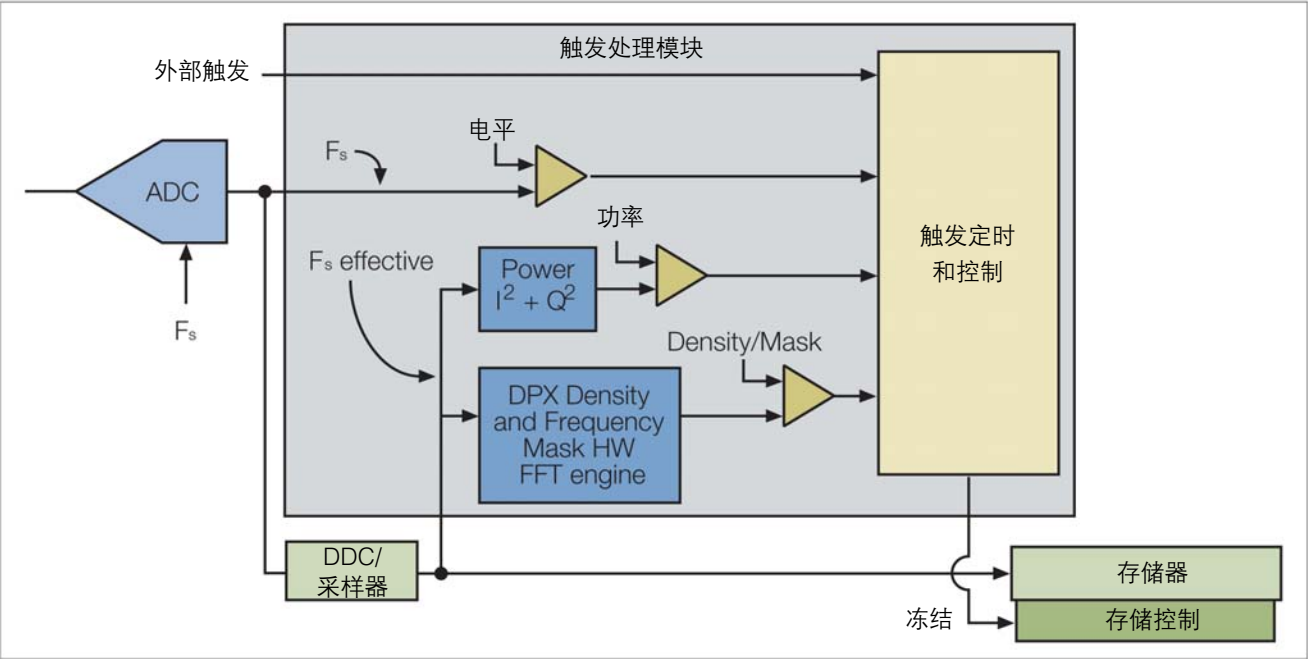


图 2-31. 实时频谱分析仪触发处理。

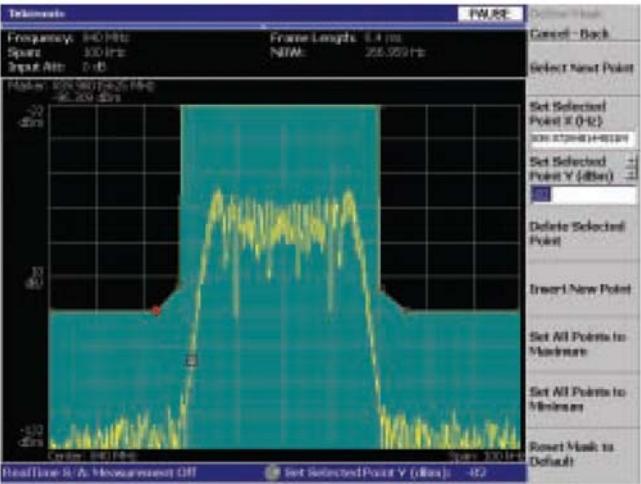


图 2-32. 频率模板定义。

频率模板触发把频谱形状与用户定义的模板进行对比。这种技术功能强大，允许频谱形状变化触发采集。即使在存在电平高得多的其它信号时，频率模板触发仍可以可靠地检测远远低于全标的信号。这种在存在强信号时触发弱信号的能力，对检测间歇性信号、是否存在互调

产物、瞬时频谱包容违规等至关重要。比较信号与模板要求全面DFT，要求一个完整的帧。频率模板触发的时间分辨率大约是一个DFT帧。它使用专用硬件DFT处理器在时域中确定触发事件，如图2-31中的方框图所示。

建立频率模板

与其它形式的模板测试一样，频率模板触发(也称为频域触发)先要定义一个屏幕模板。这种定义通过一个频点及幅度集合完成。模板可以逐点定义，也可以使用鼠标或其它指向设备以图形方式画出。可以设成在模板边界外面的信号“突入”边界时触发，也可以设置成在模板边界内部的信号“突出”边界时触发。

图2-32显示了一个定义好的频率模板，允许通过信号的正常频谱，但不允许瞬时畸变通过。下一页的图2-33显示了在信号瞬时超过模板时触发的采集的频谱图。图2-34显示了超过模板的第一个帧的频谱。注意，其采集了触发前的数据和触发后的数据，频谱图中同时显示了这些数据。

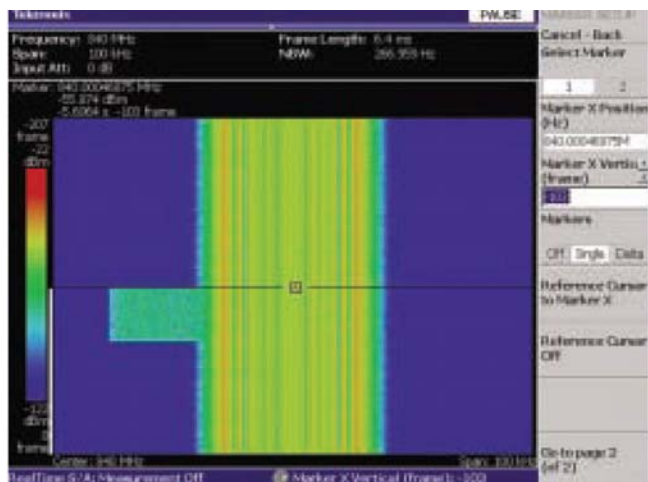


图 2-33. 频谱图显示了与载波相邻的瞬时信号。光标设在触发点上，因此光标线以上显示的是触发前的数据，光标线以下显示的是触发后的数据。蓝色区域左边的窄白线表明了触发后的数据。

解调

调制是 RF 信号承载信息的手段。使用泰克 RSA 进行调制不仅可以提取传输的数据，还可以测量信号调制的精度。此外，它可以量化许多劣化调制质量的误差和损伤。

现代通信系统已经明显提高了使用的调制格式的数量。RSA 能够分析最常见的格式，并采用一个结构，在新格式出现时分析新的格式。

幅度调制、频率调制和相位调制

RF 载波可以根据载波的幅度或相位变化通过多种方式传输信息。频率是相位的时间派生物。因此，调频(FM)是调相(PM)的时间派生物。正交相移键控(QPSK)是一

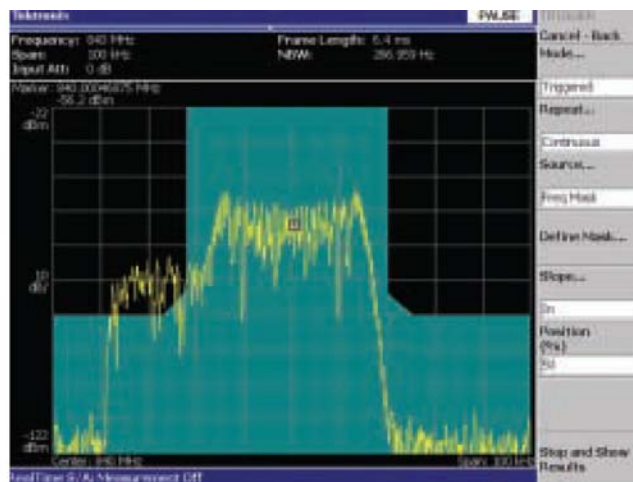


图2-34. 频谱图的一个帧，显示了瞬时信号越过频率模板边界的瞬时事件。

种数字调制格式，其中码判定点发生在90度倍数的相位上。正交调幅(AM)是一种高阶调制格式，其中幅度和相位同时变化，提供了多种状态。即使是高度复杂的调制格式，也可以分解成幅度和相位成分，如正交频分复用(OFDM)。

幅度和相位可以视为极坐标系中矢量的长度和角度。同一点可以用 Cartesian 坐标或矩形坐标(X, Y)表示。RSA 在存储器中存储的时间样点的 I/Q 格式，在数学运算中相当于 Cartesian 坐标，其中 I 代表横轴或 X 成分、Q 代表竖轴或 Y 成分。

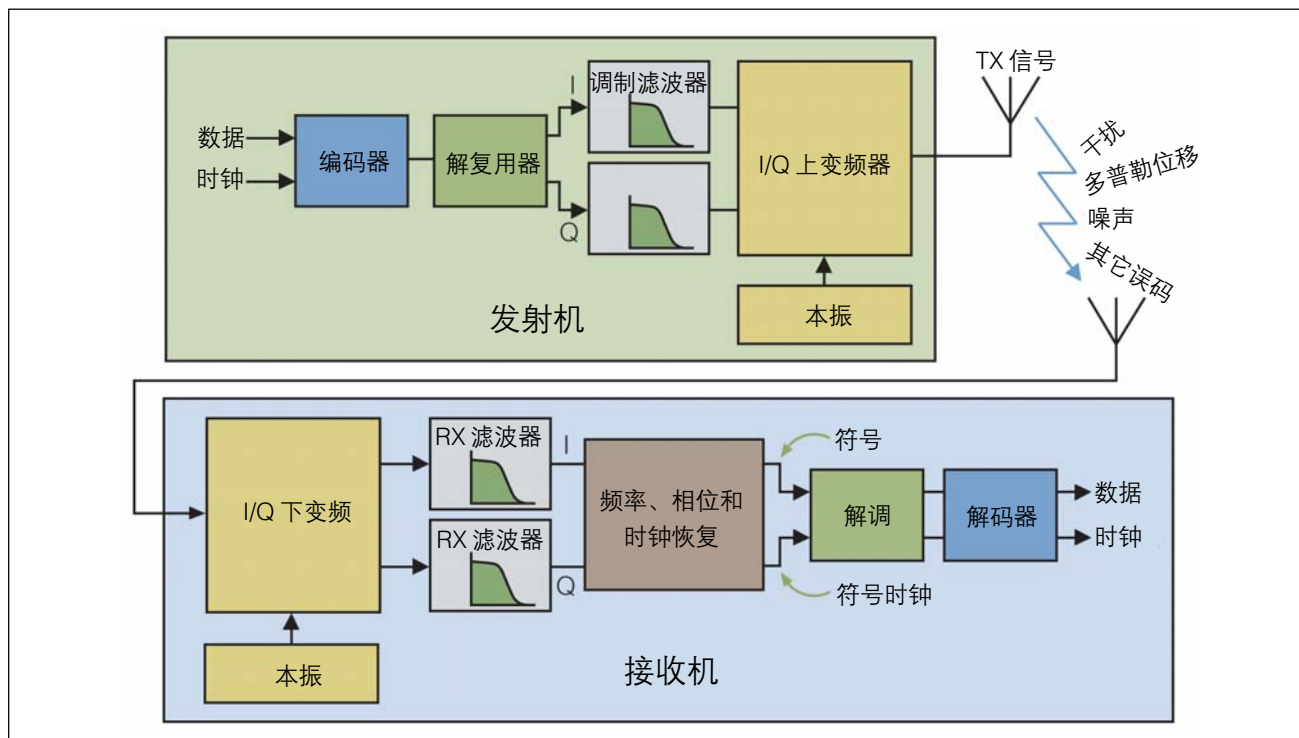


图 2-36. 典型的数字通信系统。

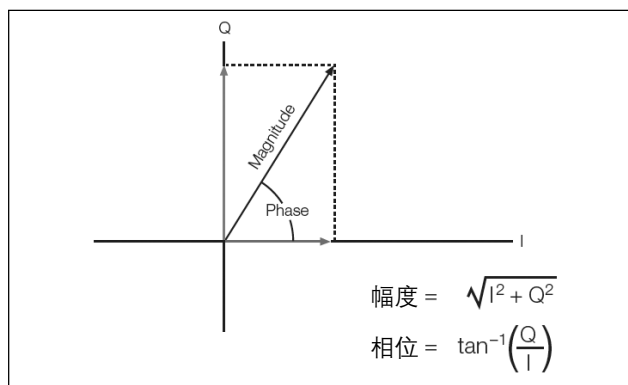


图 2-35. 幅度和相位的矢量表示。

图 2-35 显示了矢量的幅度和相位及其 I 和 Q 成分。AM 解调包括为存储器中存储的每个 IQ 样点计算瞬时幅度，并绘制不同时间的结果。PM 解调包括计算存储器中 IQ 样点的相位角，并在考虑 $\pi/2$ 反正切函数的不连续点后，绘制其在测量期间的结果。可以计算得出 FM，因为频率是相位的时间导数。FM 是 PM 的时间导数。

数字调制

图 2-36 说明了典型数字通信系统中的信号处理。发送过程先从要发送的数据和时钟开始。数据和时钟穿过编码器，编码器重新排列数据，增加同步位，进行误码恢复编码和加扰。然后数据分到 I 和 Q 通路中，进行滤波，从比特变成模拟波形，然后模拟波形上变频到相应的通道，然后在空中传送。

接收过程与传输过程相反，但增加了某些步骤。RF 信号下变频为 I 和 Q 基带信号，然后穿过通常为去掉码间干扰而设计的 Rx 滤波器。然后信号通过一种算法，这种算法恢复确切的频率、相位和数据时钟。这一点必不可少，以校正多通路延迟和通路中的多普勒位移，另外 Rx 和 Tx 本振通常没有同步。一旦恢复了频率、相位和时钟，将解调和解码信号，校正误码，恢复比特。

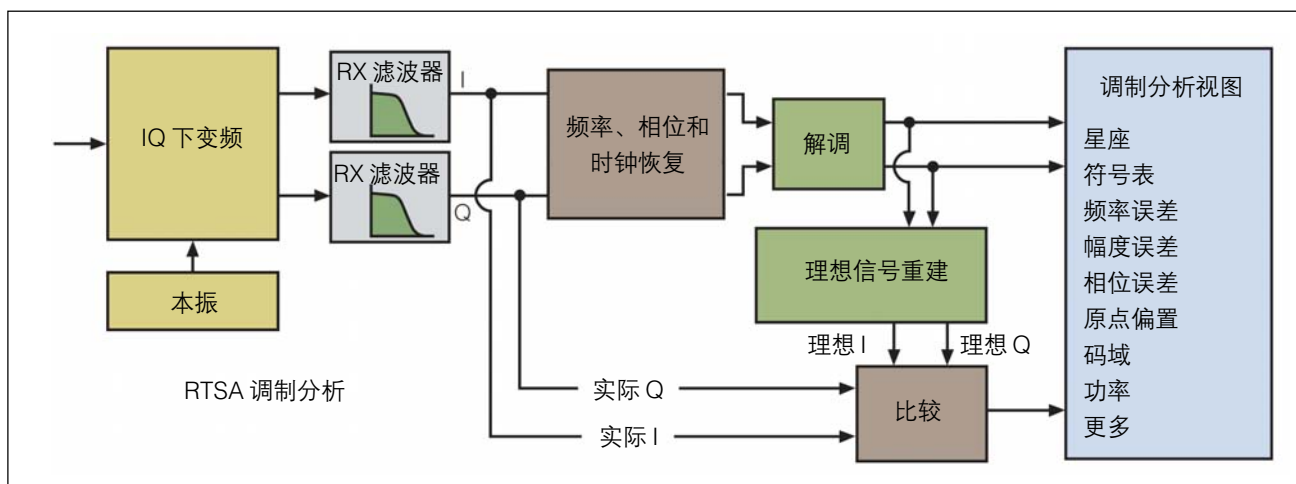


图 2-37. RSA 调制分析方框图。

数字调制的种类很多，包括用户熟悉的 FSK、BPSK、QPSK、GMSK、QAM、OFDM 等等。数字调制通常与通道分配、滤波、功率控制、误码校正和通信协议相结合，涵盖了特定的数字通信标准，其目的是在链路相反的两端，在无线电之间发送无差错的信息比特。在信号空中传送或通过其它介质传送时，数字通信格式中引入的复杂度在很大程度上对补偿进入系统的误差和损伤必不可少。

图 2-37 说明了数字调制分析要求的信号处理步骤。其基本流程与接收机相同，但有一点除外，即调制精度测量要求比较收到的调制波形与理想的调制波形。大多数 RSA 调制质量测量中使用恢复的符号，重建数学上理想的 I 信号和 Q 信号。这些理想的信号与实际的或劣化的 I 和 Q 信号进行比较，生成要求的调制分析图和测量。

功率测量和统计

泰克 RSA 可以在频域和时域中进行功率测量。通过在规定时间内对频谱中的功率求积分，可以进行频域测量。可以使用许多基于标准的测量要求的通道滤波器，获得相应的通道功率。另外还可以使用校准和归一化参数，在所有规定条件下保持精度。

通信标准通常会规定元器件和最终用户设备的统计指标。RSA 拥有测量程序，可以计算信号的互补累积分布函数(CCDF)，其通常用来检定复杂调制信号的统计特点，包括峰值均值功率比(PAR)。

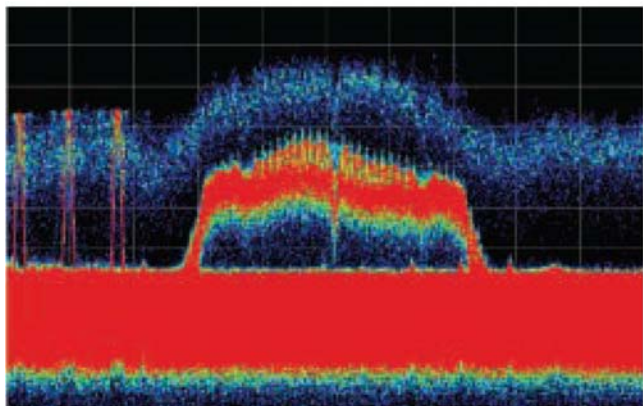


图 3-1. DPX 频谱，显示了不同时间、相同频率发生的多个信号。

第 3 章：实时频谱分析仪测量

本章介绍了 RSA 的工作模式和测量功能。许多相关细节如采样率、离散傅立叶变换(DFT)点数、测量分析极限和采样极限都与产品密切相关。与本文中的其它测量实例一样，本节中的信息适用于泰克 RSA3300 系列和 RSA6000 系列实时频谱分析仪。

RSA 测量类型

泰克 RSA 可以在频域、时域、调制域和统计域中工作。本节概括了各种 RSA 型号中提供的测量功能。

频域测量

本章中介绍的基本频域测量是实时 RF 数字荧光显示 (DPX) 频谱显示测量、频谱显示测量和频谱图显示测量功能。

DPX 频谱

DPX 频谱测量对 RSA 发现其它分析仪漏掉的难检信号的能力至关重要。在所有泰克 RSA 中，DPX 技术的关键性能参数是以 100% 侦听概率(POI)捕获单个事件的最短时间周期。在 RSA6000 中，信号发现的这个基本指标最短可以达到 10.3 ?s。DPX 频谱还可以表示在不同时间占用相同频率的多个信号，如图 3-1 所示。

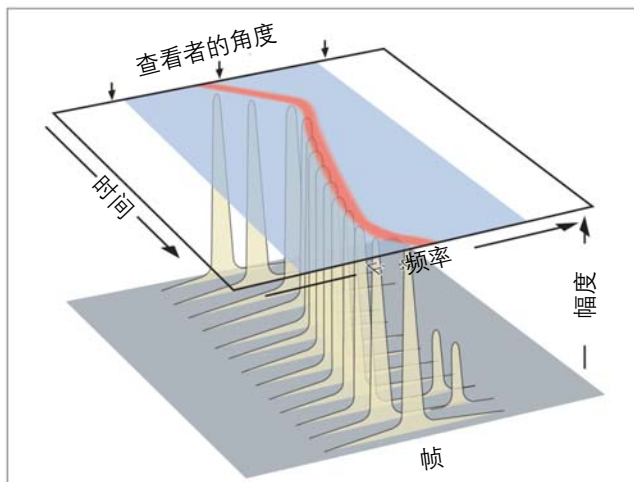


图 3-2. 频谱图显示。

DPX 频谱提供了实时 RF 显示，允许用户查看短暂的信号，明显降低发现和解决问题所需的时间。在某些 RSA 型号上，DPX 频谱的频宽不受实时带宽限制。扫频 DPX 的工作方式与普通频谱画面类似，它步进通过多个实时频段，使用线图和位图建立宽频宽画面。

频谱和频谱图测量

频谱和频谱图测量的基础都是对存储在存储器中的数据进行分析。这些测量可以以已触发模式运行，也可以以自由运行模式运行。频谱和频谱图测量在所有 RSA 中都单独显示。它们在这里一起处理，因为这两种测量都在采集的相同数据上运行，其使用标记实现时间和频率相关。

如图 3-2 所示，频谱图显示是一个重要指标，直观地显示了频率和幅度行为随时间变化情况。与频谱显示一样，横轴表示频宽的频率范围。而在频谱图中，竖轴表示时间，幅度用曲线颜色表示。每一“片”频谱图都与从数据一个频谱长度中计算得出的单个频谱对应。

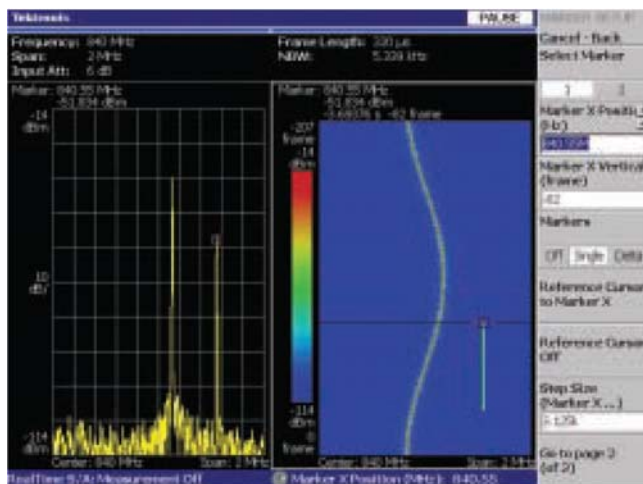


图3-3. 时间相关视图: 功率随频率变化画面(左)和频谱图画面(右)。

图3-3是显示图3-2所示信号的频谱和频谱图画面的截图。在频谱图上,最老的帧显示在画面顶部。这一测量显示了RF信号,其频率随时间变化,它还揭示了小的瞬态信号,这个信号出现,然后在时间块的末尾附近消失。由于数据存储在存储器中,因此可以使用标记“在时间上向回”滚动通过频谱图。在图3-3中,标记已经放在频谱图画面中的瞬态事件上,导致该时点上显示对应的频谱画面。

超出实时带宽的频谱测量

如图3-4所示,RSA提供了频域测量,它仿真传统扫频分析仪(SA)。对超过仪器实时带宽的频宽,这通过在关心的频宽上调谐RSA实现,其在很大程度上与传统频谱分析仪类似,它获得连续的频谱采集,然后调谐到下一个步长。

在配置选配硬件时,RSA6000系列可以实现扫频DPX功能。分析仪在每个频率段中“停留”一个或多个DPX帧,每个DPX帧包含着最多14,600个频谱变换结果。停留时间可以调节,因此在转移到下一步之前,可以监测每个扫频段最长100秒的时间。当停留在某个频率段中时,该频段内的信号侦听概率与正常实时频宽相同,也就是能够100%捕获最短10.3 μ s的事件。将为每个

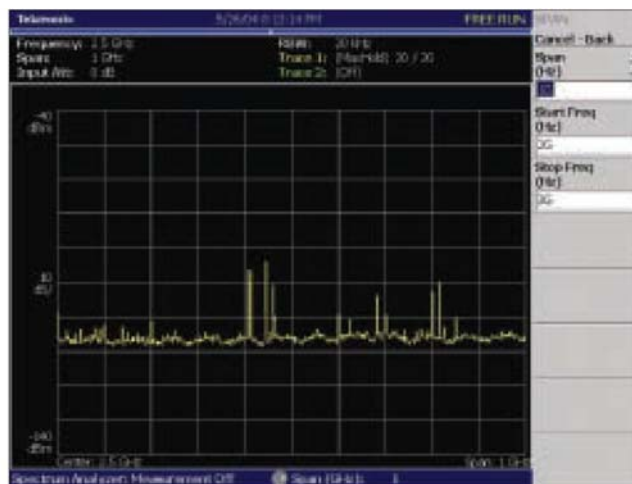


图3-4: 标准频谱分析仪模式,显示了使用最大保持功能在1 GHz 频宽上进行的停播测量。

段创建一个完整的像素位图,并在水平方向压缩成显示频率段所需的栏数。压缩通过平均被组合在一起的点的像素密度来实现。最后的扫频位图包含着相同像素位图分辨率的表示图,就像非扫频位图一样。另外还为每个段创建完整的直线图,然后在水平方向压缩成整个频宽中用户选定的轨迹点。

时域测量

频率随时间变化

频率随时间变化在竖轴上表示频率,在横轴上表示时间。它提供了与频谱图上显示的类似结果,但有两个重大差别。第一,频率随时间变化图的时域分辨率要远远好于频谱图,下面对此进行了详细介绍。第二,这一指标计算每个时点的单一平均频率值,这意味着它不能象频谱图那样显示多个RF信号。

频谱图是DFT结果的汇总,其逐行时间分辨率等于一个帧的长度;频率随时间变化图的时间分辨率则是一个采样间隔。假设一个帧中有1024个样点,那么这种模式下的分辨率是频谱图的1024倍。这可以更详细地、更简便地查看小的简单的频率位移。频谱图的行为方式几乎与超快速频率计数器一模一样。每个样点都表示一个频率值,表明频宽是几百赫兹还是几兆赫。频率恒定的信号(如CW或AM)会产生平坦均匀的显示结果。

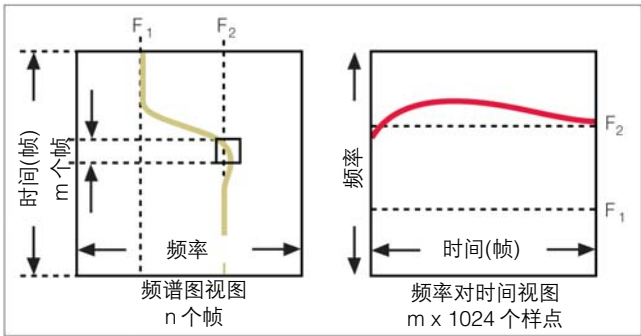


图 3-5. 频谱图和频率与时间关系图比较。

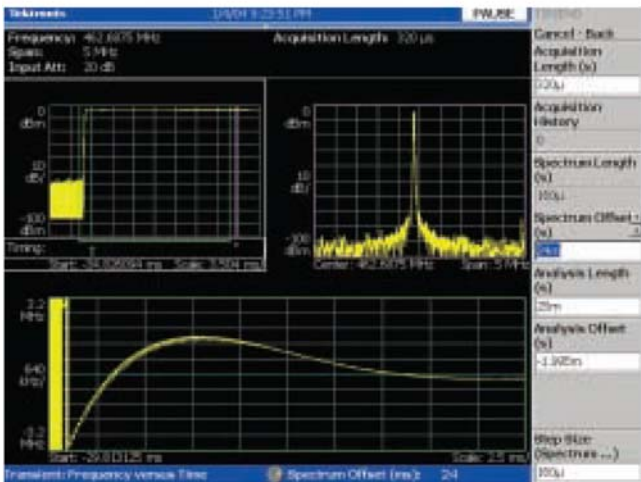


图 3-7. 5 MHz 频率和 25 ms 时间上频率稳定的频率随时间变化图。

在唯一的频率上存在相对较强的信号时,频率随时间变化图可以提供最佳的结果。图3-4是比较频率随时间变化图与频谱图的简化示意图。从某种意义上来说,频率随时间变化图是一个放大的视图,它放大了频谱图的某个部分。这特别适合考察瞬时事件,如频率过冲或减幅振荡。在被测环境中存在多个信号时,或者存在一个信号具有提升的噪声电平或间歇性杂散信号时,首选使用频谱图。它可以可视化选择的频宽内的所有频率和幅度行为。

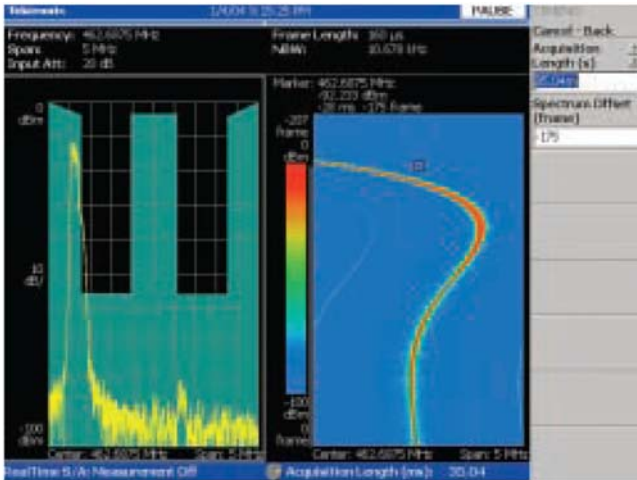


图 3-6. 5 MHz 频率和 35 ms 时间上频率稳定的频谱图。

图3-6、图3-7和图3-8显示了同一采集的三个不同分析视图。如图3-6所示,使用频率模板触发捕获来自发射机的瞬时信号,这台发射机在开机过程中在频率稳定性方面偶尔发生问题。由于振荡器没有调谐到屏幕中心的频率,RF信号会突破左边所示的频率模板,引起触发。右边的频谱图显示了器件的频率稳定特点。

下两个图显示了同一信号的频率随时间变化图,图3-7显示了与使用25 ms分析长度的频谱图相同的频率稳定行为。图3-8显示了能够放大 1 ms 的分析长度,以精细得多的时域分辨率显示了频率随时间变化情况。这揭示了即使在稳定到正确频率后,信号上仍存在残余振

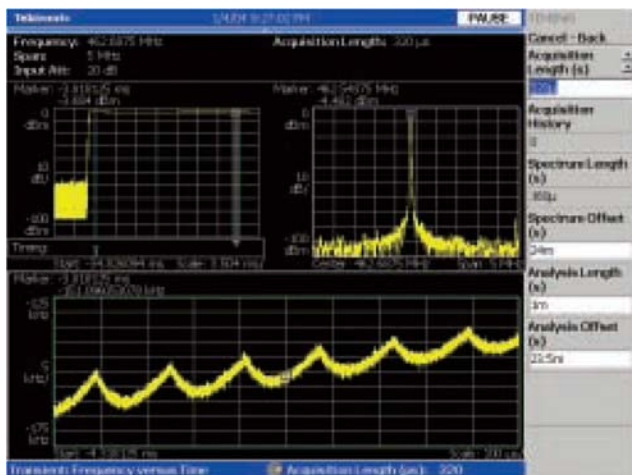


图3-8. 放大查看50 kHz频率和1 ms时间上的频率稳定情况。

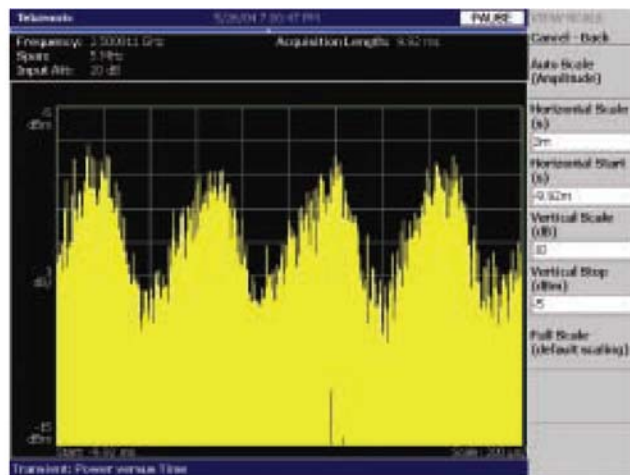


图3-9. 功率随时间变化显示。

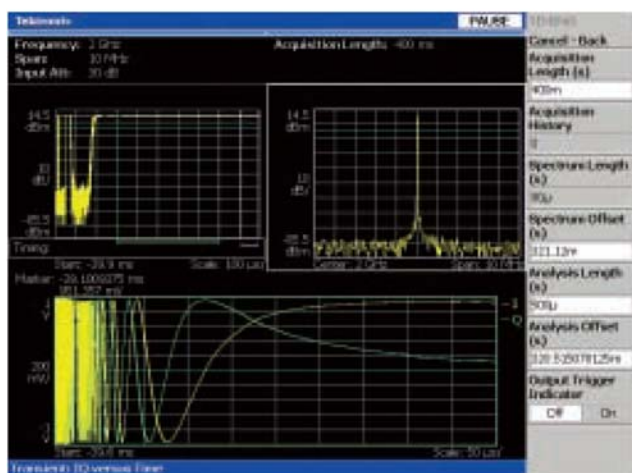


图3-10. 稳定瞬态信号的IQ随时间变化测量结果。

幅度或功率随时间变化

功率随时间变化显示(图3-9)显示了信号功率怎样逐个样点变化。信号幅度在对数标度上用 dBm 绘出。这一显示与示波器时域图的类似之处在于,其横轴也表示时间。相比之下,竖轴显示了对数标度的功率,而不是线性标度的电压。在 RSA3000 系列频谱分析仪上,曲线表示频宽内部检测到的总功率。RSA6000 系列频谱分析仪允许用户选择滤波器及全频宽带宽。功率恒定的信号将产生平坦的轨迹图,因为每个周期中没有任何平均功率变化。

对每个时域样点,功率的计算方式如下:

$$Power = 10 * \log \left(\frac{I^2 + Q^2}{1 \text{ mW}} \right)$$

功率随时间变化显示画面也在时间概况窗口中提供。时间概况显示画面在全部采集带宽中显示整个采集的 RF 幅度,功率随时间变化则显示分析偏置和分析长度画面定义的时间段。

相位随时间变化

相位随时间变化的概念与功率随时间变化类似。每个 IQ 对的相位值计算得出,并显示其随时间变化。每个 IQ 样点的相位计算如下:

$$Phase = \tan^{-1} \left(\frac{Q}{I} \right) * \frac{180}{\pi} \text{ Degrees}$$

IQ 随时间变化

瞬态 IQ 随时间变化(图3-10)是另一个时域图,显示了与时间相应的 I 和 Q 的幅度。这一测量显示了来自数字下变频器的原始 I 和 Q 输出信号。结果,这个显示图没有与被分析信号上可能存在的任何调制同步,这一点不同于数字解调套件内部的 IQ 随时间变化测量模式。

这一测量可以作为专家用户的另一个有用的调试工具,特别是在考察频率和相位误差和不稳定性时。

实时频谱分析基础知识
入门手册

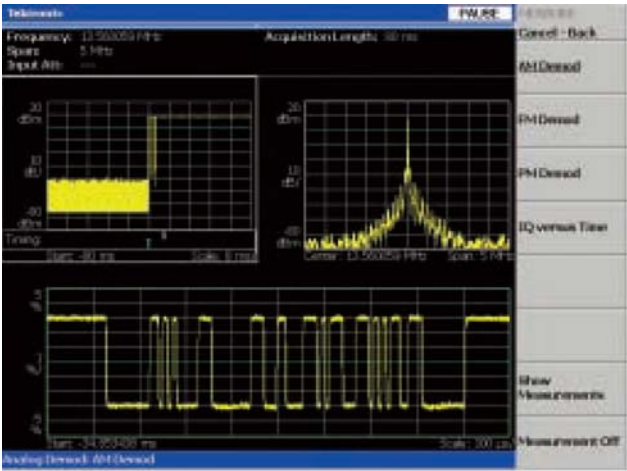


图3-11. 使用幅度位移键控进行数据编码的脉冲式信号的AM解调分析。

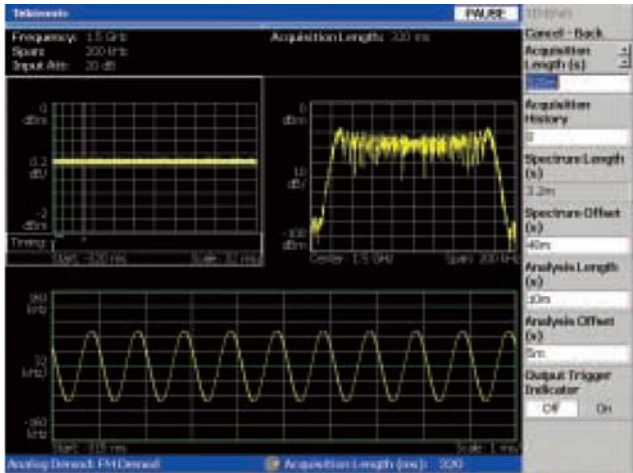


图3-12. 正弦波调制的信号的FM解调分析。

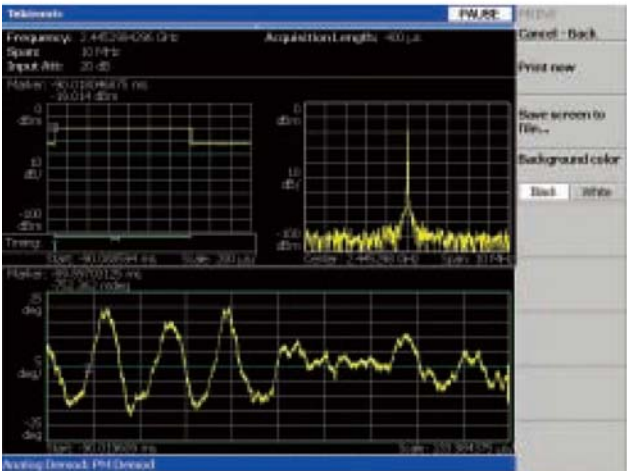


图3-13. PM解调分析，显示了长突发上的相位不稳定性。

调制域测量

模拟调制分析

模拟解调模式为解调和分析幅度调制(图3-11)、频率调制(图3-12)和相位调制(图3-13)提供了测量功能。与时域测量一样，这些工具基于多域分析概念，频谱和分析窗口可以位于时间概况窗口所示的码组内的任何位置。

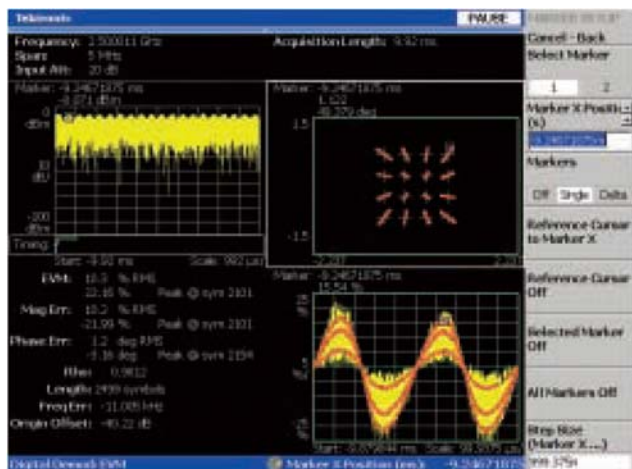


图 3-14: 在 16 QAM 信号测量期间进行 EVM 分析揭示了正弦曲线幅度失真。

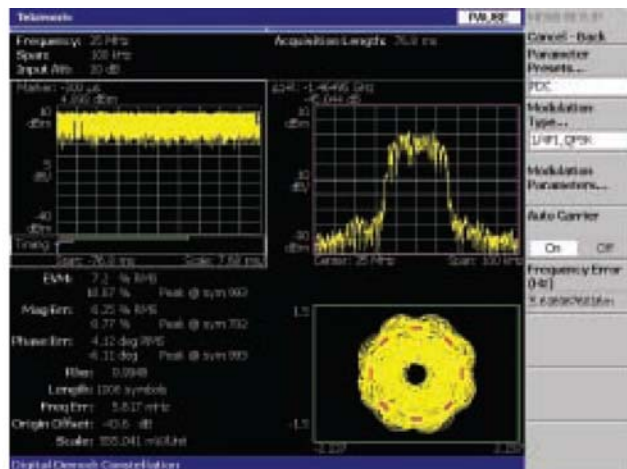


图 3-15: 星座图, 显示了 PDC 信号中的相位不稳定性。

数字调制分析

数字解调模式可以解调和分析基于相移键控(PSK)、频移键控(FSK)和正交调幅(QAM)的许多常见数字信号。RSA 提供各种测量功能, 包括星座、误差矢量幅度(EVM)、幅度误差、相位误差、解调 I/Q 随时间变化、码表和眼图。为进行这些测量, 必需正确配置各种变量, 如调制类型、码率、测量(接收)滤波器类型和参数(如升余弦根的滚降系数)及参考滤波器类型。

RSA 为检定动态调制的信号提供了一个强大的解决方案, 它不仅提供了 VSA 的数字解调测量功能, 还提供了实时触发和时间相关多域分析功能, 如图 3-14、图 3-15 和图 3-16 所示。

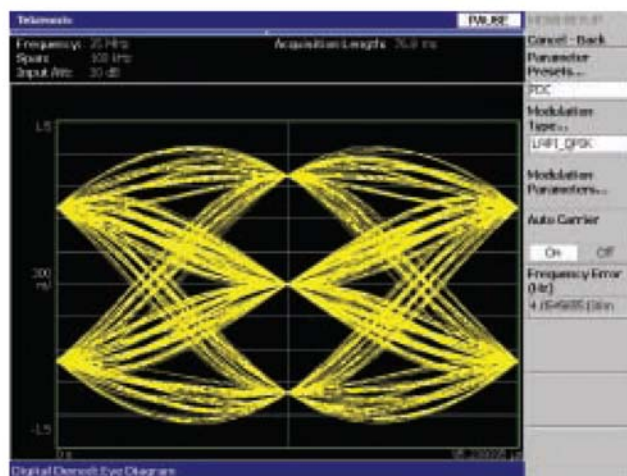


图 3-16: 眼图画面, 显示了 PDC 信号中的低幅度误差。

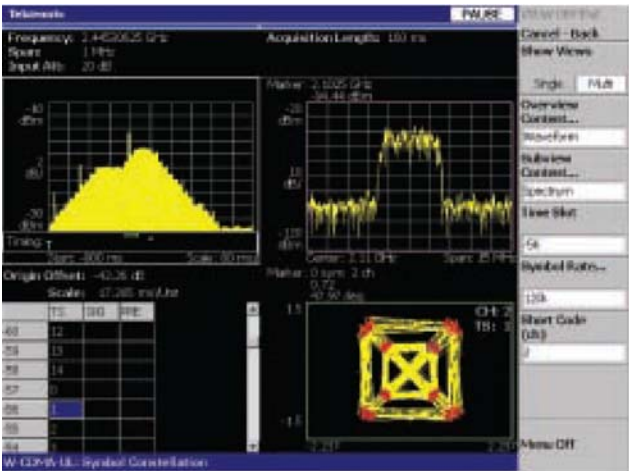


图3-17. 在闭环功率控制下对W-CDMA手机进行调制分析。星座图(右下方)显示了与电平转换过程中发生的大的毛刺有关的误差，在功率随时间变化图(左上图)中可以看见大的毛刺。

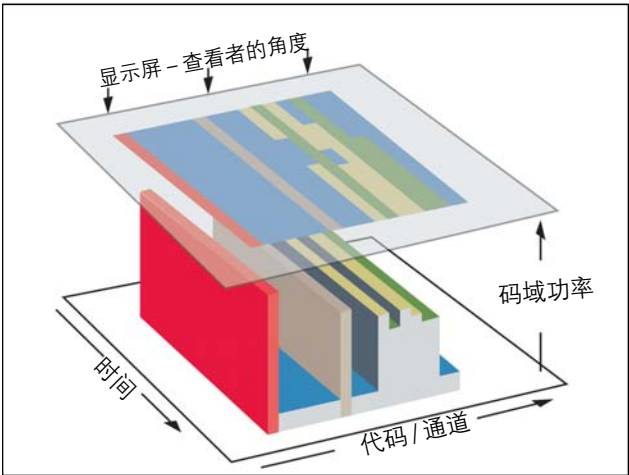


图 3-19. 码域图画面示意图。

基于标准的调制分析

RSA 还为许多标准提供了调制分析解决方案，如 W-CDMA、HSDPA/HSDUPA、LTE、GSM/EDGE、CDMA2000、1xEV-DO、Zigbee、WiMax、WLAN (IEEE 802.11 a/b/g/n)等等。图 3-17 和图 3-18 显示了基于标准的调制分析实例。

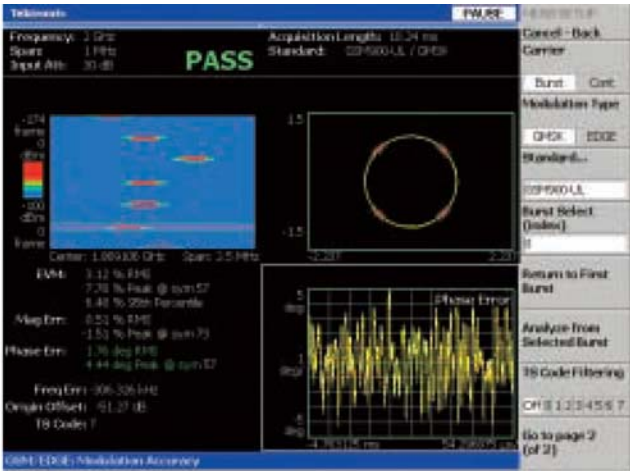


图3-18. 跳频 GSM 信号的频谱图、星座图、EVM 和相位误差随时间变化。

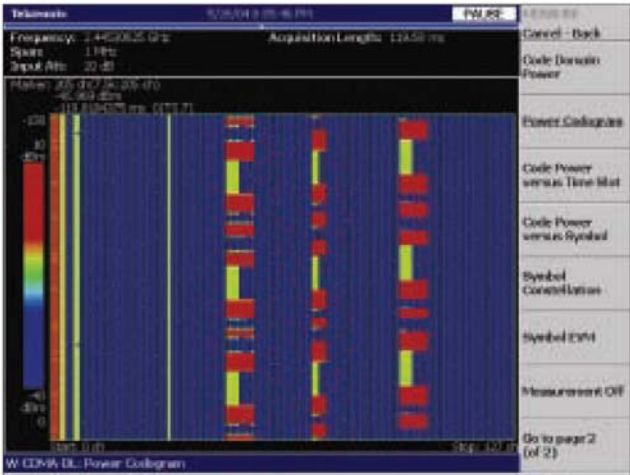


图 3-20. W-CDMA 压缩模式的码域图测量。

码域图显示

RSA 的码域图显示(图 3-19)在基于 CDMA 的通信标准的码域功率测量中增加了一个时间轴。与频谱图一样，码域图直观地显示了随时间变化情况。

图 3-20 是 RSA 得到的 W-CDMA 码域图显示。这个特定的码域图显示了模拟的 W-CDMA 压缩模式切换，其中数据速率瞬时提高，为传输中简要的临时间隔提供空间。这些间隔允许双模式 W-CDMA/GSM 用户设备搜索可用的 GSM 基站，同时保持连接到 W-CDMA Node B 上。

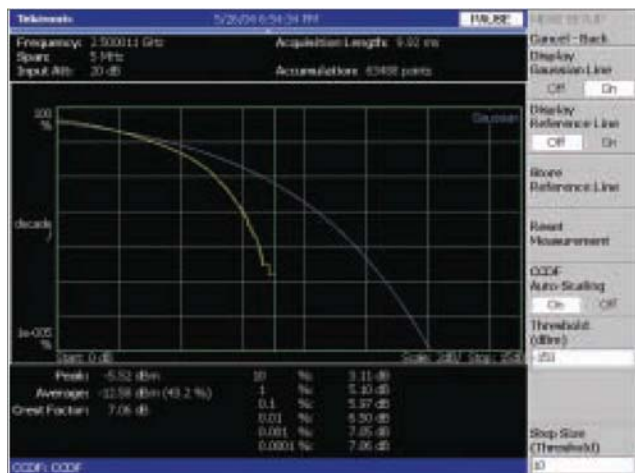


图 3-21. CCDF 测量。

统计域测量

互补累积分布函数

互补累积分布函数(CCDF)视图显示被测信号平均功率之上的峰值功率超过横轴标度上显示的幅度的概率。概率在竖轴上用百分比表示。竖轴是对数。

CCDF 分析测量随时间变化的波峰因数，这对许多数字信号非常重要，特别是使用 CDMA 和 OFDM 的信号。波峰因数是信号峰值电压除以平均电压之比，结果用 dB 表示：

$$C = 10 \log \left(\frac{P_{peak}}{P_{average}} \right) = 20 \log \left(\frac{V_{peak}}{V_{rms}} \right)$$

信号的波峰因数决定着发射机或接收机必须达到的线性度，以避免信号失真达到不可接受的水平。在图 3-21 中，CCDF 曲线用黄色表示被测信号，用蓝色表示高斯参考轨迹。设计人员尤其关注 CCDF 和波峰因数，他们必须在器件(如放大器)的功耗和失真性能之间找到平衡。在选定的波形周期上使用 CCDF，并与 ACP 等失真指标比较时，用户可以确定信号中的统计变化怎样在放大器输出中产生失真。

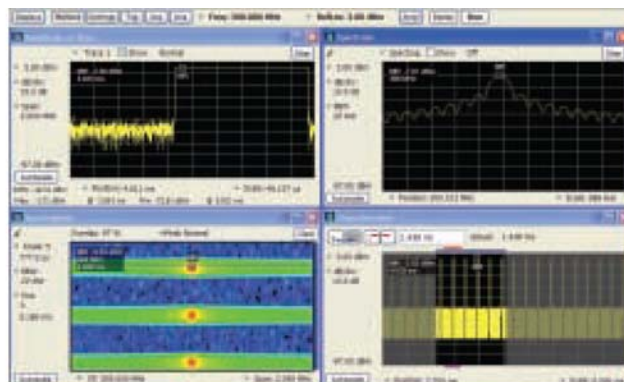


图 3-22. 上图中每个显示画面上的标记都表示采集存储器中同一个时点。

时间相关多域分析

一旦采集并把信号存储在存储器中，可以使用 RSA 中提供的各种时间相关视图分析信号，如图 3-21 所示。

这特别适合器件调试和信号检定应用。所有这些测量都基于同一套底层时域样点数据，其拥有两个重要的结构优势：

- 在频域、时域和调制域中，在单次采集基础上进行全方位信号分析。
- 多域相关，了解频域、时域和调制域中基于公共时间参考的特定事件的关系。

频谱和频谱图

RSA 提供了在时间和频率上相关的两个视图：频谱显示和频谱图显示。图 3-22 中提供了这两个视图，都带有时间概况及幅度随时间变化分析。在每个画面中，屏幕上的标记都与采集存储器中的同一个点对应。

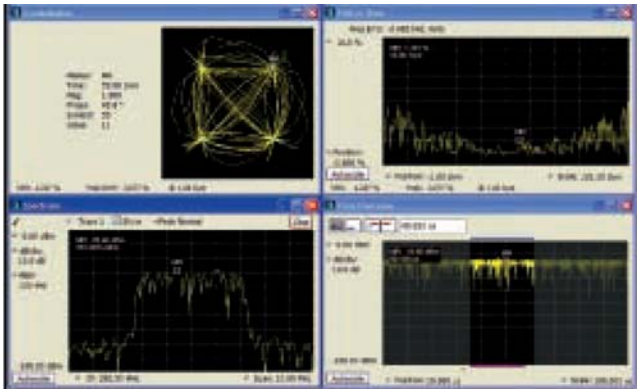


图 3-23. 时间概况、EVM 随时间变化、星座图和频谱，带有时间相关标记。

调制域和时域结果相关

在时域分析和调制域分析使用的其它实时测量模式下，RSA 显示了捕获的信号多个视图，如图 3-23 所示。

图 3-23 右下方的窗口显示了整个采集的时间概况(功率随时间变化)。这个概况显示模块中采集的所有数据，作为其它分析窗口的索引。

图 3-24 右上方的窗口显示了左上方所示的频谱图的一个帧的频谱或功率随频率变化。与图 3-23 中的画面一样，这是一个数据帧的频谱，可以滚动通过整个时间记录，查看任意时点上的频谱。这通过调节频谱偏置完成。另外注意，在频谱图窗口中有一个紫条，表明与频谱窗口中的频域显示对应的时间位置。



图 3-24. 多域视图，显示频谱图、功率随频率变化及功率随时间变化。

屏幕底部(用绿色表示)显示了选定时间或调制分析测量结果。

图 3-23 显示了频率调制分析实例，图 3-24 显示了瞬态功率随时间变化分析实例。绿色分析窗口可以位于时间窗口所示的时间记录内部任何位置，它有相应的绿条，表明其位置。此外，可以使用分析长度和分析偏置控制功能，调节分析窗口的宽度和位置。

第 4 章：实时频谱分析仪的应用

当前射频 / 微波领域正在与数字计算技术和传统模拟 RF 技术融合。数字 RF 和模拟 RF 的这种整合给工程师带来了异常复杂的新环境，需要新一代 RF/微波测试工具。泰克为工程师满怀信心地克服最大的微波和 RF 设计挑战提供了所需的信号生成和分析功能。如需与实时频谱分析仪的应用有关的最新信息，请访问泰克公司网站：www.tektronix.com/rf。

脉冲测量

泰克实时频谱分析仪(RSA)特别适合进行脉冲测量。所有 RSA 型号上都可以包括自动脉冲测量软件。可以选择对各个脉冲和脉冲趋势信息进行全面分析。与传统频谱分析仪不同，各种型号的 RSA 都指定了系统上升时间 / 下降时间(最高 10 ns)、最小脉冲周期(最短 50 ns)及高达 110 MHz 的调制带宽。对更快的上升时间、脉冲和更宽的调制带宽，RSA 离线软件可以与泰克 DPO7000/70000 和 DSA70000 系列示波器结合使用，自动进行脉冲测量，支持几十皮秒的周期及高达 20 GHz 的带宽。

SignalVu 嵌入到示波器的采集引擎中，提供了与 RSA6000 系列实时频谱分析仪类似的用户界面，可以进入所有示波器功能和存储器，执行测量。

在脉冲测量分析软件上，可以选择和检定多个脉冲测量项目，如载频、上升时间、下降时间、衰落、波纹、占用频谱和脉冲宽度等各个脉冲的信息。

脉冲趋势统计信息包括 PRF、占空比和脉冲到脉冲相位信息。此外，在 RSA6000 系列上，统计信息可以显示为趋势，也可在采样的数据上执行快速傅立叶变换 (FFTs)，揭示重要的诊断信息。

雷达

把脉冲测量集成到一个时域和频域工具中，简化了雷达测试，改善了测试可复现性。RSA 拥有综合测试功能，在雷达发射机测试分析中代替了多个常用工具(示波器、频谱分析仪、矢量分析仪、功率计和峰值功率计)。此外，数字荧光显示(DPX)可以显示其它工具检测不到的干扰成分和产品非线性度。

RFID

RFID 系统用于各种应用：手机交易信息使用的近场通信 (NFC)；车辆安全最新规定的轮胎气压监测系统 (TPMS)；追踪货物使用的实时定位系统(RTLS)，商品使用的资产追踪系统，以支持 ePC 全球计划。RFID 系统在从 HF 频率(135 kHz)到微波(2.4 GHz)的广泛频率及无源模式和有源模式的各种功率电平上工作。但是，由于许多 RFID 系统还在没有牌照的工业、科学和医疗(ISM)频段中工作，因此这些系统很容易受到同一频段中工作的其它 RFID 系统和通信所产生的碰撞影响。

能够自动进行脉冲测量对所有 RFID 系统的功能设计非常重要。RSA 为行业、国际和专有 RFID 标准提供了最全面的支持。由于快捷、简便、可重复的测量设置及深存储器捕获能力，RSA 可以全面分析标签和阅读器 / 询问器性能和交互。

实时频谱分析基础知识

入门手册

频谱管理 / 监控

不管是保护设施安全，还是保护频谱投资，都必须减少干扰。使用大多数频谱分析仪工具是不可能存在大信号时检测间歇性小干扰信号及检定脉冲噪声的。

通过DPX实时RF显示，您可以看到以前不知道存在的信号。RSA将改变您搜索和发现难检信号的方式。由于业内领先的带宽和动态范围综合性能，RSA是唯一能够以100%概率检测相关频段内部信号的频谱分析仪。

通过独特的触发功能，如DPX密度触发和频率模板触发(FMT)，RSA能够以100%概率触发小信号或脉冲，以捕获和分析信号。

无线电通信

越来越多的现代无线电通信控制和操作使用软件控制。数字电路正在代替动态调制操作、功率、信道控制和信道负荷等模拟功能。这些现代无线电可以随着时间变化

迅速改变功率、频率、调制、编码和统计。由于不需要在时间分析模式和频率分析模式之间切换，RSA能够对捕获的数据实现时间相关，在时域、调制域、码域和统计域中进行多域分析。可以一次性捕获数据，然后全面进行分析。

DPX频谱和FMT相结合，为无线电调制提供了独特强大的功能。DPX可以发现异常瞬态事件，如软件问题引起的脉冲噪声或其它小频谱噪声，DPX Density和FMT则可以设置成隔离这些事件。通过结合使用外部触发输出与FMT，可以触发其它仪器。触发示波器和逻辑分析仪可以隔离深入方框图中的事件，以便隔离根本原因。泰克iView功能和混合信号示波器可以准确地对准时间，显示模拟信号和数字信号，实现皮秒级的精度。代码子例程和代码行可以与关心的实际频谱事件实现时间相关。

功放器测试

移动通信中的语音通信一般以某种稳定流量状态运行。由于高速率数据业务被集成到现代无线电通信标准(HSDPA/HSUPA, LTE, 1xEV, WiMax)中, 输出功率必需迅速适应负荷变化。调制质量、频谱再生和功率效率是放大器设计要面对的永恒的问题。

改善效率、降低成本、提高性能的需求正推动着线性化技术的发展, 数字技术在蜂窝放大器设计中的使用变得十分常见, 其中部分技术使用自适应数字预失真(DPD)。这些设计容易出现存储器效应、偏置馈通和其它瞬态频谱再生异常事件。

RSA 能够使用 DPX 频谱揭示存储器效应的存在, 为放大器设计人员提供了独特的视角。RSA 还能够进行相关多域分析, 包括幅度统计(CCDF)、调制质量(EVM)和邻道功率(ACP)分析, 为放大器设计人员提供了宝贵的视角。

颤噪效应和相位触发分析

颤噪效应和相位触发问题因破坏程序开发及中断生产线而声名狼藉。随着当前现代通信系统和电子器件的移动

性不断提高, 这些系统对这些非故意的内部生成的调制源非常敏感。这些干扰的间歇性特点使问题进一步复杂化, 在传统上, 检测和隔离这些事件非常困难, 而且耗时巨大。

实时频谱分析仪拥有独一无二的功能, 可以使用DPX频谱显示, 以每秒>292,000的频谱更新速率, 明确显示这些事件的存在。通过结合使用实时频谱分析仪上独特的频率模板触发和外部触发输出, 可以简化隔离、检定、测量及关联到根本原因的过程。

EMI/EMC

在电磁兼容性(EMC)领域, 设计、质检和试运行等不同阶段使用不同的设备和技术。尽管有行业监管、国家监管及国际一致性测试要求, 但许多灵敏的电子器件需要的不仅仅是一致性测试, 以保证功能正常。必须了解低电平噪声的性能影响、内部脉冲噪声灵敏性以及时钟和锁相环的稳定性, 以保证器件功能正常和 RF 制造完整性。如果没有泰克实时频谱分析仪独特的洞察力和信心, 工程师很难发现、触发、捕获和分析这些难检事件。

第 5 章 术语表

词汇表

Acquisition (采集)— 整数个时间连续的帧；一个码组。

Acquisition Time (采集时间)— 一次采集表示的时间长度，与码组长度相同。

Amplitude (幅度)— 电信号的幅度。

Amplitude Modulation (AM) (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。

Analysis Time (分析时间)— 一个码组中时间连续的样点的子集，作为分析视图的输入使用。

Analysis View (分析视图)— 用来显示实时测量结果的灵活的窗口。

Carrier (载波)— 调制所在的 RF 信号。

Carrier Frequency (载频)— 载波信号的 CW 部分的频率。

Center Frequency (中心频率)— 与分析仪显示的频宽中心对应的频率。

CZT—Chirp—Z transform (CZT—线性调频—Z变换)— 一种高效的计算方法，用来计算离散傅立叶变换(DFT)。例如，CZT 可以比传统 FFT 更灵活地选择输出频率点数，但会增加计算量。

Codegram (码域图)— 码通道、时间和功率显示图，其中 CDMA 码通道为 X 轴，时间为 Y 轴。功率用颜色表示。

CW Signal (CW 信号)— 连续波信号—正弦波。

dBfs— 用参考全标的 dB 表示功率电平的单位。根据上下文内容，这可以是显示屏幕的全标，也可以是 ADC 的全标。

dBm— 用参考 1 毫瓦的 dB 表示功率电平的单位。

dBmV— 用参考 1 毫瓦的 dB 表示电压电平的单位。

Decibel (dB) (分贝(dB))— 一个电功率与另一个电功率之比的对数的 10 倍。

DFT—Discrete Fourier transform (DFT—离散傅立叶变换)— 计算采样的时域信号的一种数学运算过程。

Display Line (显示线)— 波形显示上的横线或竖线，作为参考线目视(自动)比较给定电平、时间或频率。

Distortion (失真)— 信号劣化，通常是非线性操作的结果，导致了不想要的频率成分。谐波和互调失真是常见的失真类型。

DPX – Digital Phosphor analysis (DPX – 数字荧光分析)— 一种信号分析和压缩方法，允许实时查看随时间变化的信号，可以发现罕见的瞬态事件。

DPX Spectrum (DPX 频谱)— 频谱分析中应用的 DPX 技术。DPX 频谱提供了实时 RF 视图，可以观察频域瞬态信号。

Dynami Range (动态范围)— 在输入上同时存在的、可以以规定精度测量的两个信号电平的最大比率。

FFT – Fast Fourier Transform (FFT – 快速傅立叶变换)— 一种高效的计算方法，用来计算离散傅立叶变换(DFT)。常见的 FFT 算法要求输入样点数和输出样点数相等及 2 的幂(2, 4, 8, 16, ……)。

Frequency (频率)— 信号振荡的速率，用赫兹或每秒周期数表示。

Frequency Domain View (频域图)— 与频率对应的信号频谱成分的功率；信号的频谱。

Frequency Drift (频率漂移)— 在其它条件保持不变时显示的频率在规定的时间内逐渐位移或变化，用每秒赫兹表示。

Frequency Mask Trigger (频率模板触发)— 基于频域中发生的特定事件的灵活的实时触发功能。触发参数由图形模板定义。

Frequency Modulation (FM) (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。

Frequency Range (频率范围)— 器件工作的频率范围，具有上限和下限。

Frequency Span (频宽)— 在两个频率极限之间扩展的连续的频率范围。

Marker (标记)— 波形轨迹上的可视识别点，用来提取该点表示的域和范围值读数。

Modulate (调制)— 改变信号特点，一般是为了传输信息。

Noise (噪声)— 叠加在信号上的不想要的随机干扰，其一般会使信号变得模糊。

Noise Floor (噪底)— 系统固有的噪声电平，代表着可以观察输入信号的最低限；最终受到热噪声(kTB)的限制。

Noise Bandwidth (NBW) (噪声带宽(NBW)) – 用来计算绝对功率(单位为 dBm/Hz)的滤波器的具体带宽。

Probability of Intercept (侦听概率) – 在规定参数范围内可以检测到信号的概率。

Real-Time Bandwidth (实时带宽) – 可以进行实时无缝捕获的频宽,其与实时频谱分析仪的数字转换器和IF带宽相对应。

Real-Time Seamless Capture (实时无缝捕获) – 采集和存储不间断的一系列时域样点的能力,这些样点代表着 RF 信号在长时间内的行为特点。

Real-Time Spectrum Analysis (实时频谱分析) – 基于离散傅立叶变换(DFT)的一种频谱分析技术,能够连续分析关心的带宽,而没有时间空白。实时频谱分析可以以100%的概率显示和触发指定频宽、解析带宽和时间参数内的瞬态信号波动。

Real-Time Spectrum Analyzer (实时频谱分析仪) – 一种仪器,其能够测量RF信号中的难检RF事件,触发这些事件,把事件无缝捕获到存储器中,然后在频域、时域和调制域中分析这些事件。

Reference Level (参考电平) – 分析仪显示屏最上方的格线表示的信号电平。

Resolution Bandwidth (RBW) (解析带宽(RBW)) – 频谱分析仪的IF阶段中最窄的滤波器的宽度。RBW决定着分析仪分辨间隔近的信号成分的能力。

Sensitivity (灵敏度) – 衡量频谱分析仪显示最小信号的能力,通常用显示的平均噪声电平(DANL)表示。

Spectrogram (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。

Spectrum (频谱) – 信号的频域表示,显示了频谱成分随频率变化的功率分布。

Spectrum Analysis (频谱分析) – 确定 RF 信号频率成分的测量技术。

Vector Signal Analysis (矢量信号分析) – 检定RF信号调制特点的测量技术。矢量分析同时考虑幅度和相位。

参考缩略语

ACP:	邻道功率
ADC:	模数转换器
AM:	幅度调制
BH4B:	Blackman–Harris 4B 窗口
BW:	带宽
CCDF:	互补累计分布函数
CDMA:	码分多址
CW:	连续波
dB:	分贝
dBfs:	dB 全标
DDC:	数字下变频器
DFT:	离散傅立叶变换
DPX:	数字荧光显示, 频谱, 等等
DSP:	数字信号处理
EVM:	误差矢量幅度
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
OFDM:	正交频分复用
PAR:	峰值均值功率比
PM:	相位调制
POI:	侦听概率
PRBS:	伪随机二进制序列
PSK:	相移键控
QAM:	正交幅度调制
RBW:	解析带宽
RF:	射频
RMS:	均方根
RSA:	实时频谱分析仪
SA:	频谱分析仪
VSA:	矢量信号分析仪

泰克科技(中国)有限公司

上海市浦东新区川桥路1227号
邮编: 201206
电话: (86 21) 5031 2000
传真: (86 21) 5899 3156

泰克北京办事处

北京市海淀区花园路4号
通恒大厦1楼101室
邮编: 100088
电话: (86 10) 5795 0700
传真: (86 10) 6235 1236

泰克上海办事处

上海市徐汇区宜山路900号
科技大楼C楼7楼
邮编: 200233
电话: (86 21) 3397 0800
传真: (86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处

深圳市福田区南园路68号
上步大厦21层G/H/I/J室
邮编: 518031
电话: (86 755) 8246 0909
传真: (86 755) 8246 1539

泰克成都办事处

成都市锦江区三色路38号
博瑞创意成都B座1604
邮编: 610063
电话: (86 28) 6530 4900
传真: (86 28) 8527 0053

泰克西安办事处

西安市二环南路西段88号
老三届世纪星大厦20层K座
邮编: 710065
电话: (86 29) 8723 1794
传真: (86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处

武汉市解放大道686号
世贸广场1806室
邮编: 430022
电话: (86 27) 8781 2760/2831

泰克香港办事处

香港九龙尖沙咀弥敦道132号
美丽华大厦808-809室
电话: (852) 2585 6688
传真: (852) 2598 6260

更多信息

泰克公司备有内容丰富的各种应用手册、技术介绍和其他资料, 并不断予以充实, 以帮助那些从事前沿技术研究的工程师们。请访问:
www.tektronix.com.cn



版权© 2009 泰克公司。泰克公司保留所有权利。泰克公司的产品受美国 and 国外专利权保护, 包括已发布和尚未发布的产品。以往出版的相关资料信息由本出版物的信息代替。泰克公司保留更改产品规格和定价的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克有限公司的注册商标。所有其他相关商标名称是各自公司的服务商标或注册商标。

08/09 EA/WWW

37C-17249-4

Tektronix®