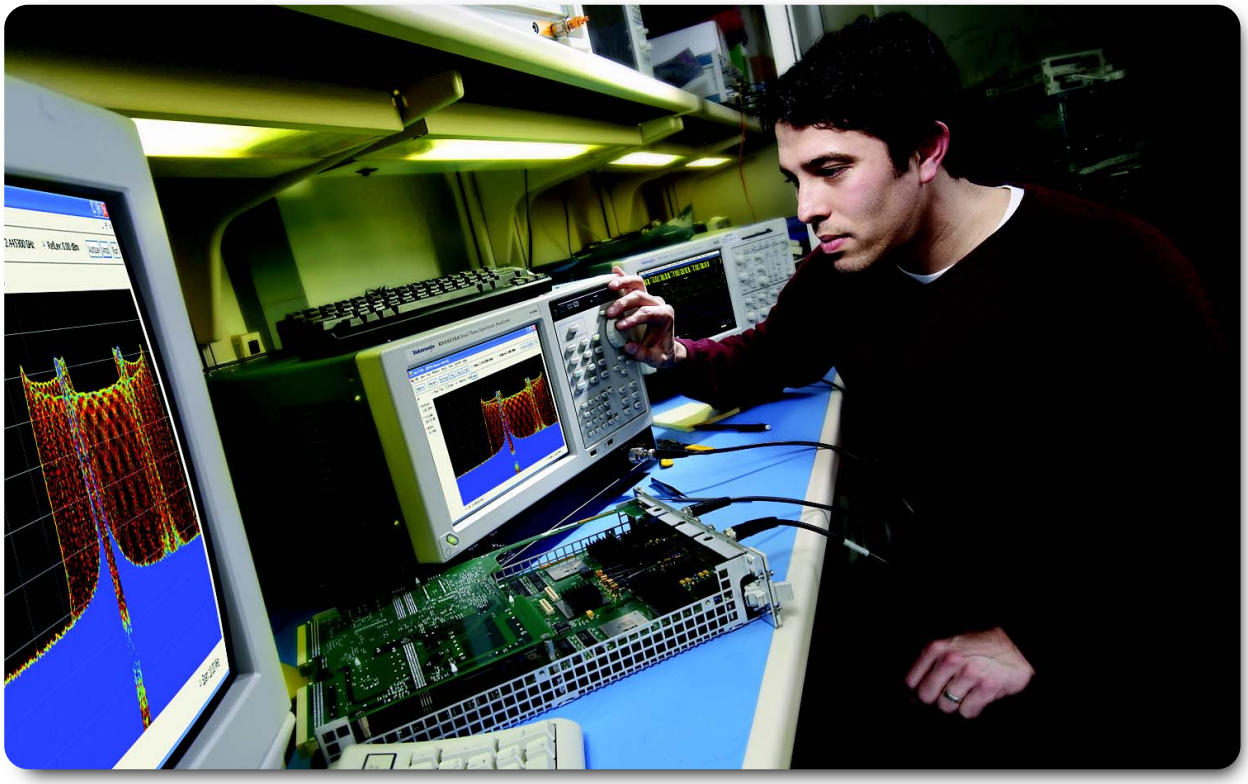
使用实时频谱分析仪调试和检定宽带 RF 系统

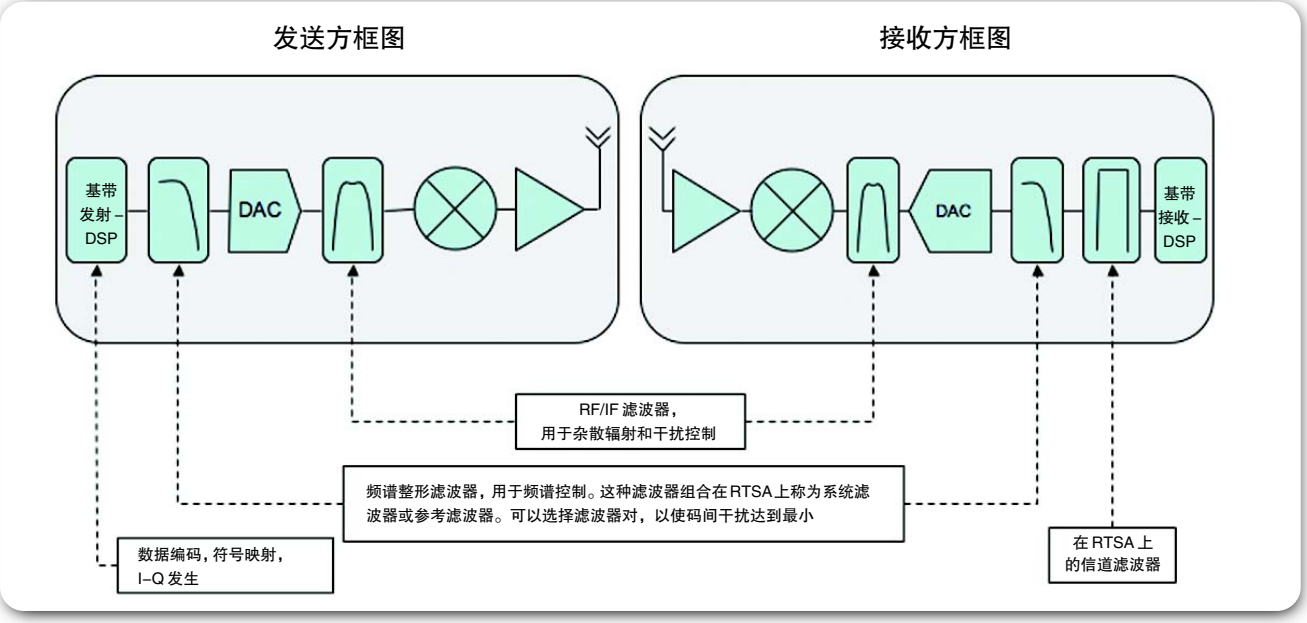


引言

无线设备的迅猛增长及人们对更高数据速率的无限需求给射频(RF)频谱带来了重大的压力。随着对 RF 器件和系统的带宽要求不断提高，可利用的频谱已经成为一个严峻的挑战。系统设计和操作人员必须尽可能高效地利用每赫兹的 RF 频谱，同时还必须特别注意，避免干扰比以前距离更近、更流行的信号。当然，所有这些都必须尽快、以最低的资本开支实现，这给工程设计带来了典型的两难困境。

这些相互矛盾的要求正推动着射频 RF 通信领域进行重大创新。数字信号处理的最新发展与模数转换(ADC)和数模转换(DAC)技术进步相结合，产生了新一代的网络和系统。现在，可以使用数字控制环路控制 RF 频谱失真，其频谱性能和效率与模拟技术相比要高得多。在技术允许的情况下，沿着 RF 链向上推进数字电路，实现了成本优势，提高了制造效率。昨天的窄带、单载波、三重转换系统正被数字信号处理(DSP)和DAC实现的宽带多载波发射机所代替，这些技术为 RF 放大器生成直接 IF、甚至生成直接 RF 输出。现在，波形已经以数字方式进行预失真，以实现最大效率和严格的频谱控制。

Tektronix
Enabling Innovation



▸ 图 1. *在测量矢量信号参数时，RTSA 必须在 Tx/Rx 对中作为接收机使用。*

尽管其优点有目共睹，但这些新型RF系统和技术也给调试和检验系统的设计工程师和系统操作人员带来了新的挑战。调试RF设计现在要求能够从DSP生成的基带到宽带数字调制RF输出跟踪信号。这些数字生成的RF信号产生了新的瞬变问题，而前几代RF测试设备是不能发现、触发和测量这些瞬变问题的。此外，优化宽带系统、特别是在发送链中使用数字预失真(DPD)的系统，要求创建预失真的波形。这就要求信号分析仪不仅能够以矢量方式捕获发送带宽，还要实现高保真度捕获，其是发送带宽的 3–5 倍。

本应用指南考察了现代RF系统的特点，演示了怎样使用泰克RSA6100A系列实时频谱分析仪(RTSAs)调试和检定这些系统。我们将介绍发射机的基本矢量和频谱测量、调试高带宽系统及检定宽带 DPD 系统。

检定数字调制信号：常用测量和测量相关

矢量测量

在使用RTSA测量被调制信号的矢量参数时，测试设备作为发送/接收(Tx/Rx)对中的接收机操作。图 1 说明了通用 Tx/Rx 链的组成部分及 RTSA 代替 Rx 功能所发挥的作用。

接收链从调节到接收频率的低噪声 RF 放大器开始。对许多实验室测量来说，RTSA 中并不需要放大器，因为发射机直接连接到测试仪器上，信号并不通过空中传输。在空中测量中，RSA6100A 系列提供了一个内置前置放大器，为直到 3 GHz 的小信号提供 30 dB 的增益。在图 1 中，接收机的混频器和 ADC 被代以 RTSA 的混频器链和ADC。尽管RTSA包含一个用于杂散辐射和干扰信号控制的中频(IF)滤波器，但其带宽就是仪器的捕获带宽，可能包含测量中有不想要的信号。

" 系统滤波器 " 或 " 参考滤波器 " 是 Tx/Rx 链中的频谱整形滤波器组合(参见表 1)。它代表着整个链条的理想频谱形状，但它可以在发射机和接收机之间分开。例如，升余弦系统滤波器可以分成在发射机和接收机中都使用根升余弦(RRC)。这使得发射机能够实现希望的频谱形状，同时为接收机提供某种抑制杂散辐射信号的手段。通过使用奈奎斯特滤波器，如一对根升余弦 (RRC) 滤波器，在系统中就不会产生码间干扰(ISI)。

系统 (参考滤波器)	发送滤波器	接收滤波器 (测量)
升余弦	升余弦	无
(3GPP), 升余弦	升余弦根	升余弦根
(3GPP2), IS–95 定义	IS–95 发送滤波器	IS–95 接收滤波器(同等)
(GSM), 高斯	高斯	无

▸ **表 1.** *常用的系统滤波器及其组成部分。RTSA 的参考滤波器与 Tx–Rx 对的系统滤波器类似，RTSA 的测量滤波器设置成等于系统的 Rx 滤波器。*

对数字调制信号进行矢量测量要求传输完全相同的数据流，也就是说，必须把进入信号与相同调制类型的理想信号进行比较。为此，信号分析仪必需知道、并能够复现信号的调制参数，包括：

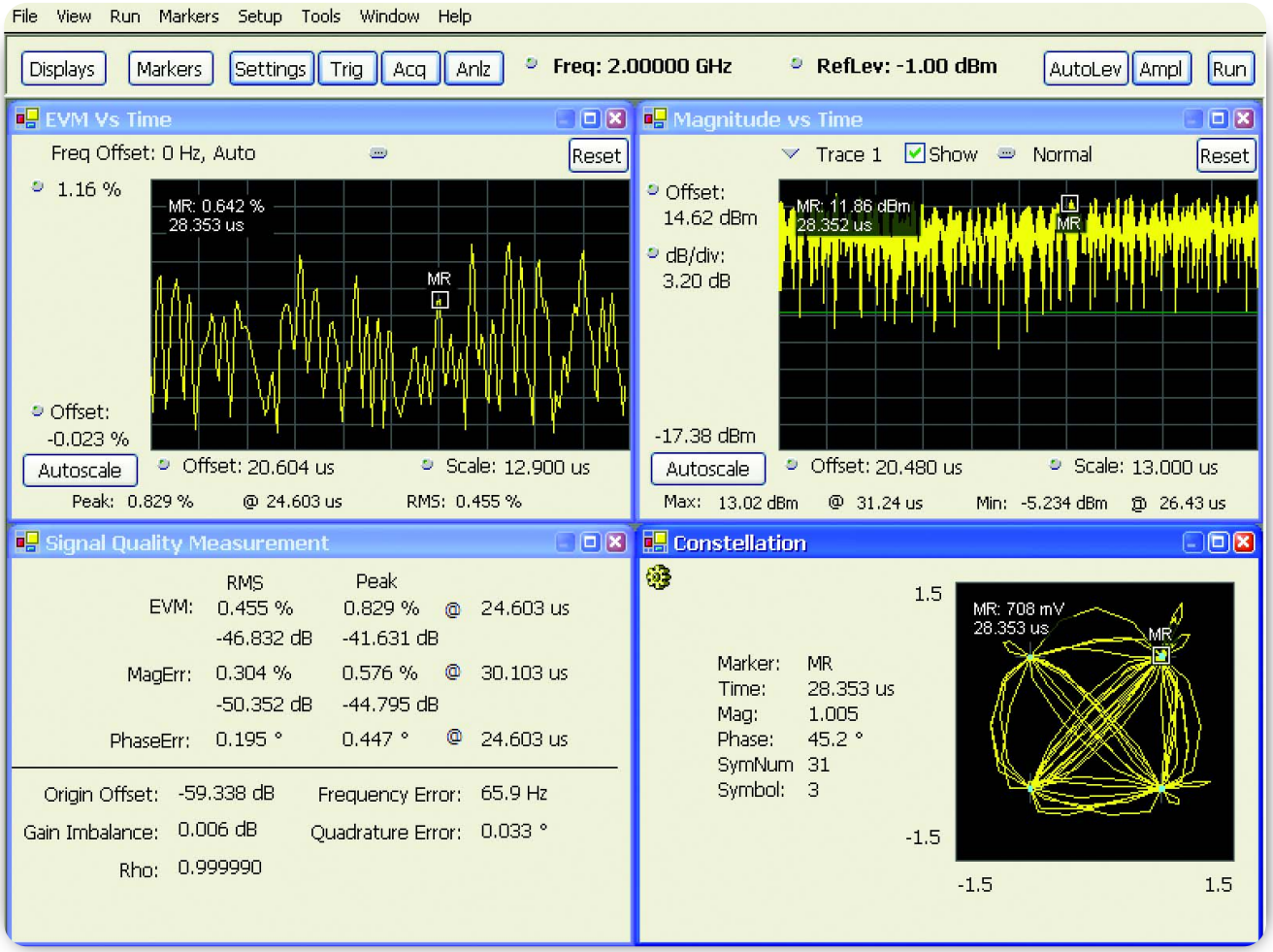
– 频率
– 符号速率
– 调制类型
– 发送 / 接收滤波器
– 发送的符号值

测量指标	定义
频率误差	信号测得的载波频率与用户设置的分析仪中心频率之间的频率差
矢量幅度误差(EVM)	测得的信号与分析长度上理想的参考信号之间的误差矢量归一化的 RMS 值。EVM 通常在符号或码片上测得，可以用百分比或 dB 为单位表示。EVM 通常在频率误差最佳拟合估算后测得，其中已经去掉了固定的相位偏置。其在分析长度上进行这些估算
幅度误差	测得信号与参考信号幅度之间的 RMS 幅度差
相位误差	测得的信号与理想的参考信号之间的 RMS 相位差
原点偏置	在符号时间上测得的信号的 DC 偏置的幅度。它表明了载波馈通信号的幅度
增益失衡	信号生成路径中 I 通道和 Q 通道之间的增益差。增益失衡的星座图会显示宽度与高度不同的图形
正交误差	I 通道和 Q 通道之间的正交误差。这一误差显示了 I 通道 Q 通道之间偏离完美 I/Q 调制预计理想 90 度的相位差。具有正交误差的星座图会显示 I 部分泄漏到 Q 中，反之亦然
Rho (ρ)	测得信号与理想参考信号归一化后的相关功率。与 EVM 一样，Rho 是衡量调制质量的指标。在实践中，Rho 的值小于 1；在理想接收机中的理想信号测得值等于 1

▶ **表 2.** *矢量测量指标定义摘要*

信号分析仪必须构建理想信号或参考信号，以便把测量的信号与其比较，确定误差。可以使用两种方法创建参考信号。第一种方法是测量仪器在捕获和解调信号前已知发送的数据，其优点是对任何重建数据都不依赖信号，但在发送的数据未知时不能使用这种方法。由于在解调前很难知道发送的数据，因此大多数分析仪使用第二种方法，从要分析的信号中提取发送的数据，然后根据解调的数据符号创建参考信号。第二种方法的优点是只要知道基本调制参考，那么就可以评估具有随机数据或未知数据的信号；然而，如果进入的信号包含极高的失真，构建参考信号中恢复和使用的数据符号会损坏，导致符号表误差及低估矢量误差。

一旦已经解调信号，并构建了参考信号，就可以执行矢量测量。表 2 和图 2 分别定义和显示了这些测量指标。



▸ **图 2.** *RSA6100A 系列进行的矢量测量实例，包括 EVM, 幅度误差, 相位误差, 原点偏置, 增益失衡和 rho。其它面板显示了幅度随时间变化、EVM 随时间变化及相同时间周期的星座图。*

峰值均值比和互补累积分布函数

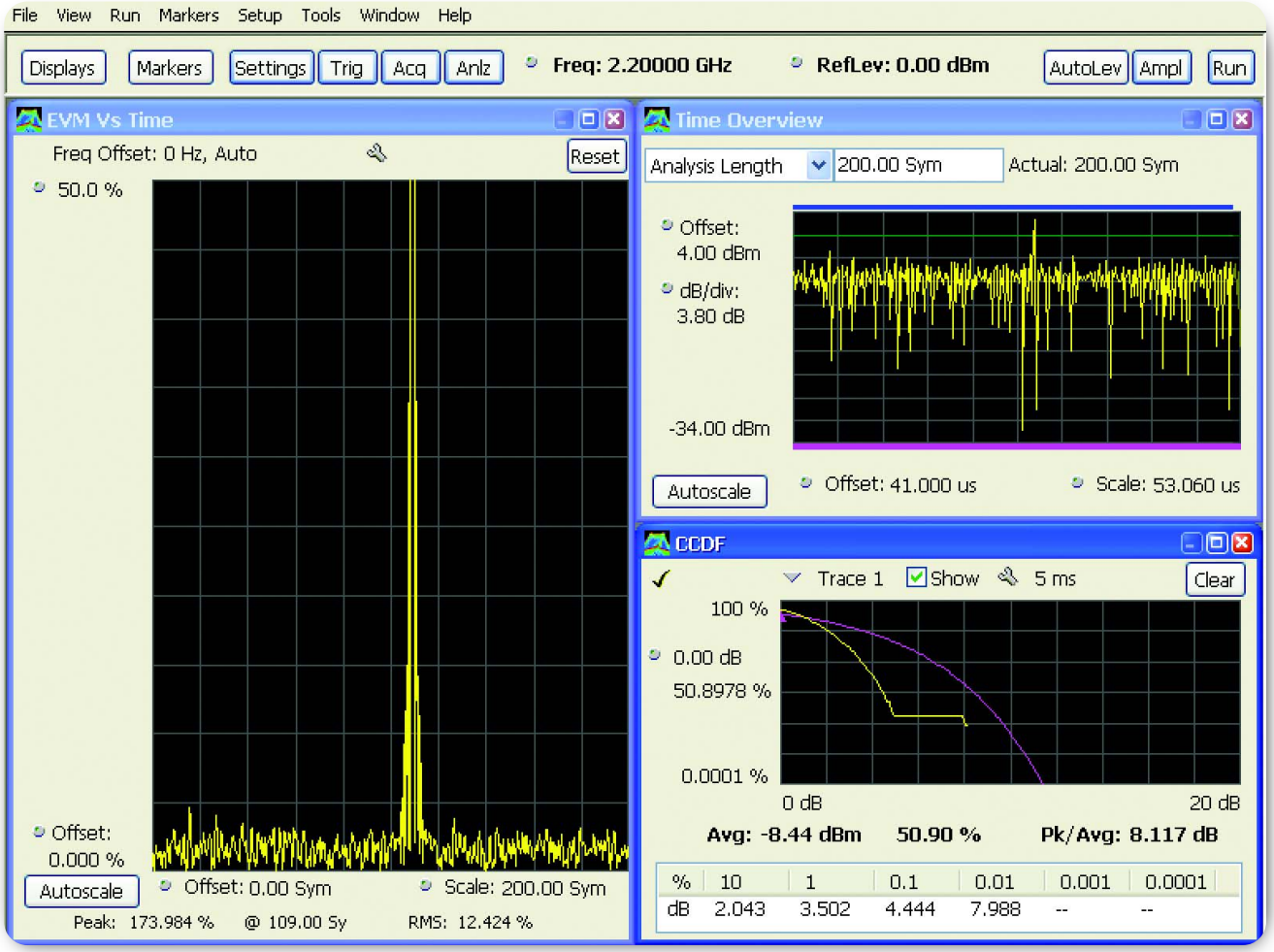
现代发射机使用完善的技术，限制放大器信号的峰值均值比(PAR)，以优化输出失真和放大器效率。但是，使用的测量方法对测量结果有着明显影响。

PAR是在规定时间内信号的峰值功率与平均功率之比。互补累积分布函数(CCDF)是一个统计特性值，它在图形的 X 轴上绘制功率电平，在 Y 轴上绘制概率。CCDF 曲线上的每个点都显示信号在一定功率电平或在一定功率电平之上的时间所占的百分比。功率电平用相对于平均信号功率电平的 dB 表示(参见图 3)。

RSA6100A系列和某些其它信号分析仪中采用的技术是在一段时间中执行 PAR 和 CCDF 测量。这种方法的优点是它提供了与其它测量相关的结果，最适合确定信号 PAR 对被测器件(DUT)的其它信号质量的影响。

上述方法不同于大多数传统频谱分析仪采用的方法，传统频谱分析仪通过在零跨度中对波形取样来进行测量。测量数据在取样前通过传统频谱分析仪的中频滤波器分辨率带宽。当取样时间足够长时，能够获得所有波形峰均值，这种方法在统计上是有效的。它还有一个优点，是能够在无限大的时间周期内监测信号。由于频谱分析仪在进行CCDF测量时必须处于零跨度，因此这些仪器进行的 CCDF 测量与用户可能希望的任何其它测量无关。

RTSA 同时提供了上面两种分析方法。图3是相关方法，其中执行了 CCDF 测量，显示了一个“外露的”幅度瞬变。从时间对幅度及 EVM 对时间图中都可以看到，这个信号在每 10,000 个符号中出现一次这个峰值，并以 0.01% 概率与CCDF图中的异常峰值相关。这个瞬变代表着数字系统计算溢出导致的幅度峰值类型。



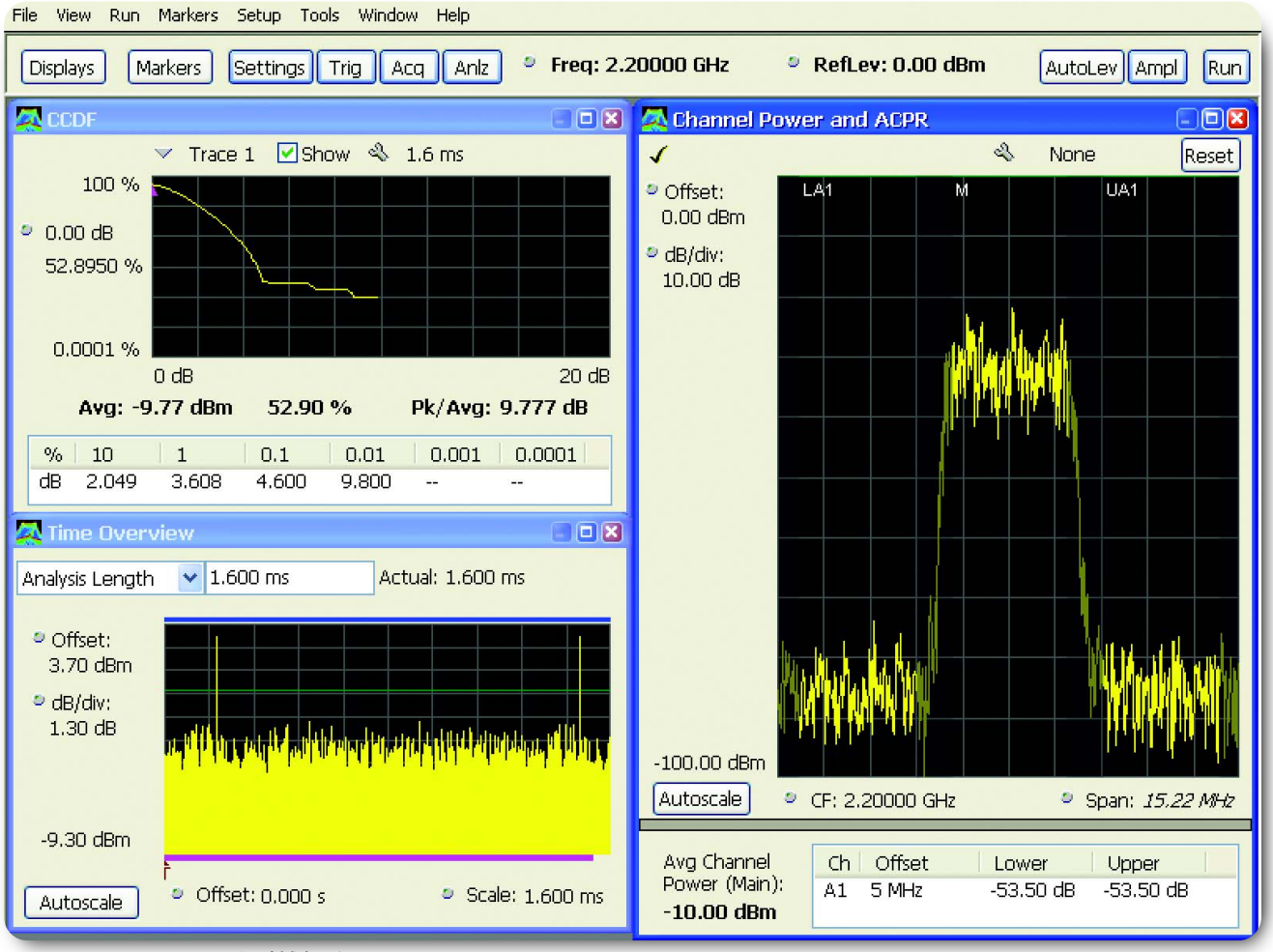
▸ **图 3.** *从幅度对时间、EVM 对时间和 CCDF 图中可以看，幅度峰值以 0.01% 概率发生。CCDF 图上的洋红色轨迹(右下方)是一条高斯参考曲线，黄色 CCDF 是从捕获的波形中测得的。*

邻道功率比和邻道泄漏比

邻道功率比(ACPR)和邻道泄漏比(ACLR)一般可以互换使用，它们之间的差异很小。ACPR用来描述与发送通道相邻的通道中的功率电平，而不考虑相关通信系统中可能使用的任何接收滤波器。ACLR是一个比较新的术语，它考虑了相关系统中使用的接收机滤波器。ACPR一般用于3GPP2系统中，其在通道带宽和邻道带宽上对功率同等积分。在3GPP系统中，使用α=0.22的RRC接收滤波器，计算通道功率和邻道功率。在本应用指南中，我们将使用ACLR的一般惯例，因为接收滤波器形状可能是矩形，产生了传统的ACPR值。

实时 ACLR

RSA6100A系列ACLR测量方法不同于扫描技术。最大捕获带宽是 110 MHz，在连续时间内对所有信道进行计算。在信号数字化后，以数学方式执行分辨率带宽、通道带宽和接收机滤波。RTSA 中的ACLR测量与其它域中的测量没有差别; 它只是在捕获的信号上进行另一次数学计算。

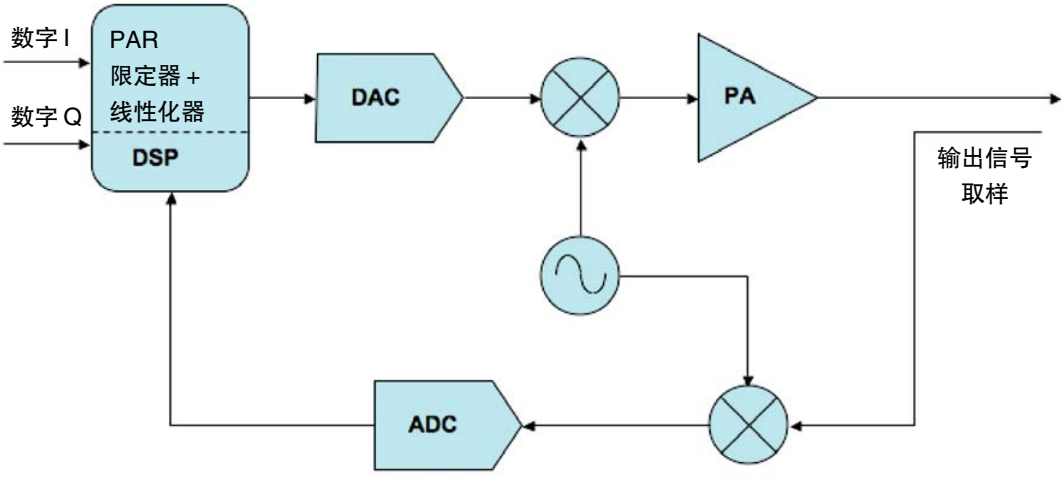


▸ 图 4. *CCDF、ACLR 和时域相关。*

ACLR 测量及与其它域相关

RTSA 的 ACLR 测量与其它域和测量相关，从而可以直接比较 ACLR 与其它指标，如 CCDF 或峰值均值比。执行这些测量的传统技术要求在分开单独采集或多次采集数据，因此比较结果的准确性较差。

图4是使用RTSA进行多域分析的实例。它使用与ACLR测量相同的数据计算信号的CCDF和PAR，其在时间域中显示了分析周期。在本例中，时域中看到的幅度尖峰生成了 CCDF 图中的低概率、高 PAR，导致了 ACLR 测量中看到的小频域瞬变。



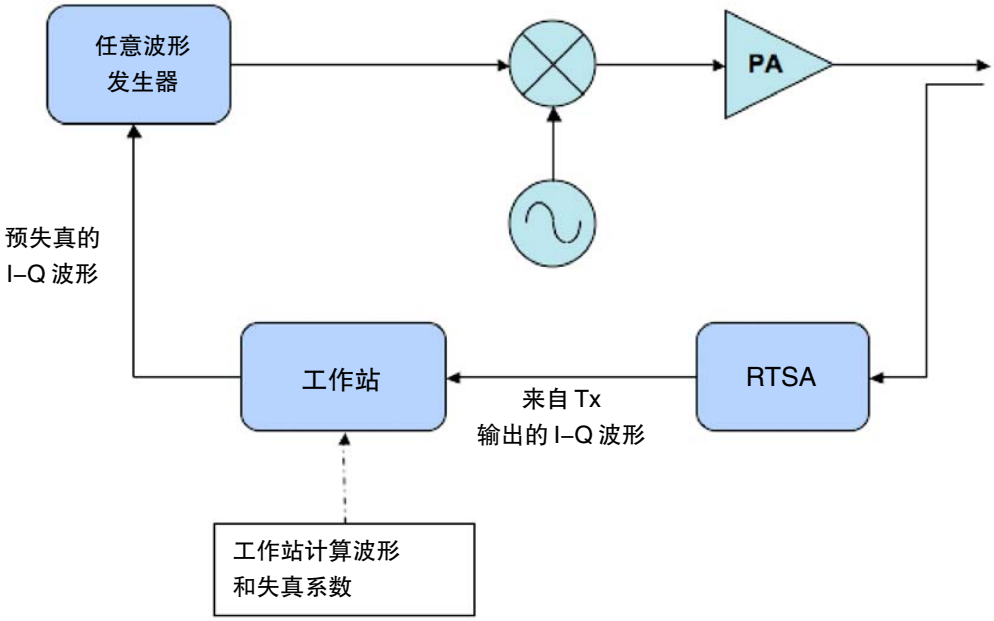
▸ 图 5. *具有数字预失真的代表性发射机。*

数字预失真检定

现代发射机方框图

不管是高功率卫星地面站、还是多载波蜂窝基站、甚至是低功率移动系统，现代发射机都采用各种预失真技术，降低通道外干扰，优化运行效率。降低失真最流行的方法是适应性数字预失真。这种方法使用发射机输出取样，计算误差矢量，生成校正系数，然后使用校正系数使进入信号预失真。为降低模拟电路失真，链条中的信号要在尽可能长的时间内保持数字格式。

图5显示了从输出耦合、下变频及数字化的小信号。然后使用这个数字化的样点，馈送到数字信号处理电路中，数字信号处理电路分析信号中存在的非线性度。然后使用这些非线性系数，改变进入发送链的同相(I)和正交(Q)信号。从发送链中可以看出，这个信号现在已经预失真、并应用了 PAR 缩减，在由 DAC 转回到模拟信号后馈送到放大器。得到的输出信号降低了频谱失真，其 ACLR 低于没有采用预失真技术的信号。



▸ 图 6. *数字预失真开发系统.*

调试和检定挑战

上述场景产生了传统模拟系统中没有见过的各种调试挑战。ADC 和 DAC、或发送路径中模拟转换之前在信号上执行的DSP，可能会给发送链引入数字假信号。这些假信号往往具有瞬变特点，使用传统频谱分析仪很难或不可能捕获这些假信号。它们可能很少发生，可能会在邻道和间隔通道中引起频域响应。有效调试瞬时频域信号不仅要求发现问题，还要求能够触发问题进行分析。

检定这些系统也带来了新的挑战。在开发阶段，可以在信号发射之前，测试和优化各种预失真和降低 PAR 的方法。通常必须使用测试设备，捕获反馈路径中的信号，在提供完成的硬件(ASIC或FPGA)之前在脱机软件中计算新的非线性失真系数。然后对初始 I 和 Q 信号应用这些系数，把结果输入到任意波形发生器(AWGs)中，测试其性能。

图 6 显示了这类开发系统的常用配置。AWG 代替了 I 和 Q信号和DAC，校正环路下变频器和ADC被代以RTSA。然后，来自 RTSA 的 I 和 Q 矢量被发送到脱机处理器中，在脱机处理器中则应用预失真和 PAR 降低技术。

系统类型	单载波	载波数量，通道带宽间隔	多载波发送带宽	三阶 DPO 检定带宽	五阶 DPO 检定带宽
3GPP2 cdma2000	1.2288 MHz	12, 1.25 MHz	15 MHz	45	75 MHz
3GPP W–CDMA	3.84 MHz	4, 5 MHz	20 MHz	60 MHz	100 MHz
宽带卫星	85 MHz	1, 不适用	85 MHz	255 MHz	420 MHz
建议的 4G 系统	98–105 MHz	1, 不适用	高达 105 MHz	305 MHz	高达 525 MHz

▸ **表 3.** *宽带系统类型和特点*

采用的AWG必须拥有充足的分辨率、带宽和内存深度，代替发送链中使用的数字系统。泰克生产各种AWG，满足了一系列要求。

采用的RTSA必须为应用提供充足的频率范围、捕获带宽、捕获保真度和内存深度。捕获带宽必须能够数字化至少三倍的发送带宽，保证捕获三阶失真产物。许多系统现在使用五阶失真产物计算预失真系数，在这种情况下，RTSA 的捕获带宽必须足以采集这些产物。表 3 列出了部分系统的带宽要求。

在捕获失真产物时，测试仪器在幅度和相位的信号保真度都至关重要。对所有泰克实时频谱分析仪，可以在各自的产品资料中找到其幅度 – 相位线性度和失真特点，以便与您的要求进行比较。

在开发过程中捕获的信号可能包含非常长的一串专用数据，以期通过创建最坏情况操作场景，测试放大器极限。这些序列可以长 1 秒或 1 秒以上，具体视设计要求而定。在 110 MHz 的最大捕获带宽时，RSA6100A 系列能够捕获最长 1.7 秒的 I 和 Q 数据。在降低捕获带宽时，可以实现更长的捕获时间。

捕获长记录长度允许用户考察设备对实际环境信号的响应性能。能够捕获许多数据包非常有用，特别是在其与PAR变化相关时，包括变化的调制类型、激活信道数量及变化的功率电平。

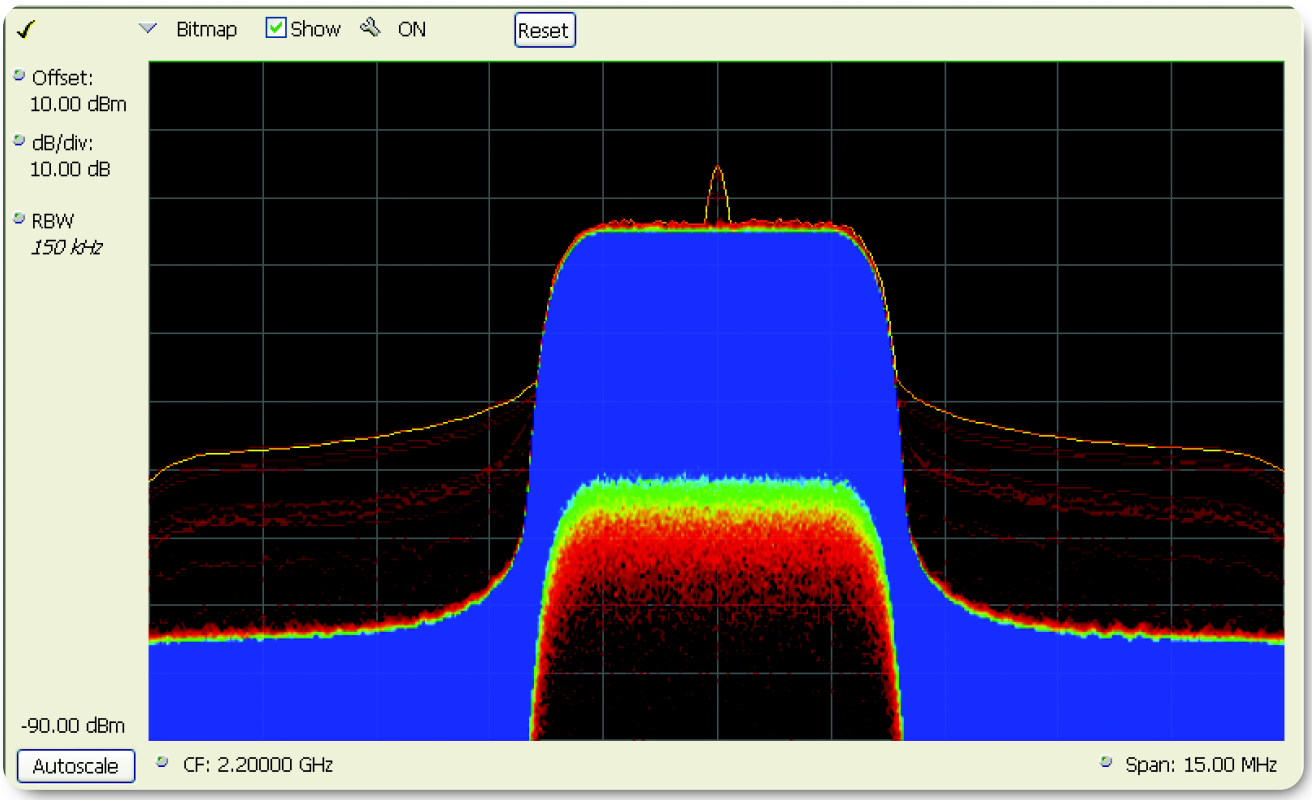
一旦捕获了数据，必须把数据从RTSA传送到分析和校正使用的计算机上。RSA6100A 系列采用 1 Gb/s 以太网连接传送数据，可以通过以太网连接直接发送 GPIB 命令。用户也可以把数据存储在 RSA6100A 系列的内置 DVD ± RW 中，进行存档和“人工后备网”数据传送。可以使用逗号分隔的变量(CSV)格式导出数据，简便地导入到脱机分析软件包中，如Matlab™和Excel™。

调试

找到问题的过程由三个步骤组成：

1. 发现问题
2. 触发和捕获错误信号
3. 跟踪问题，找到问题来源

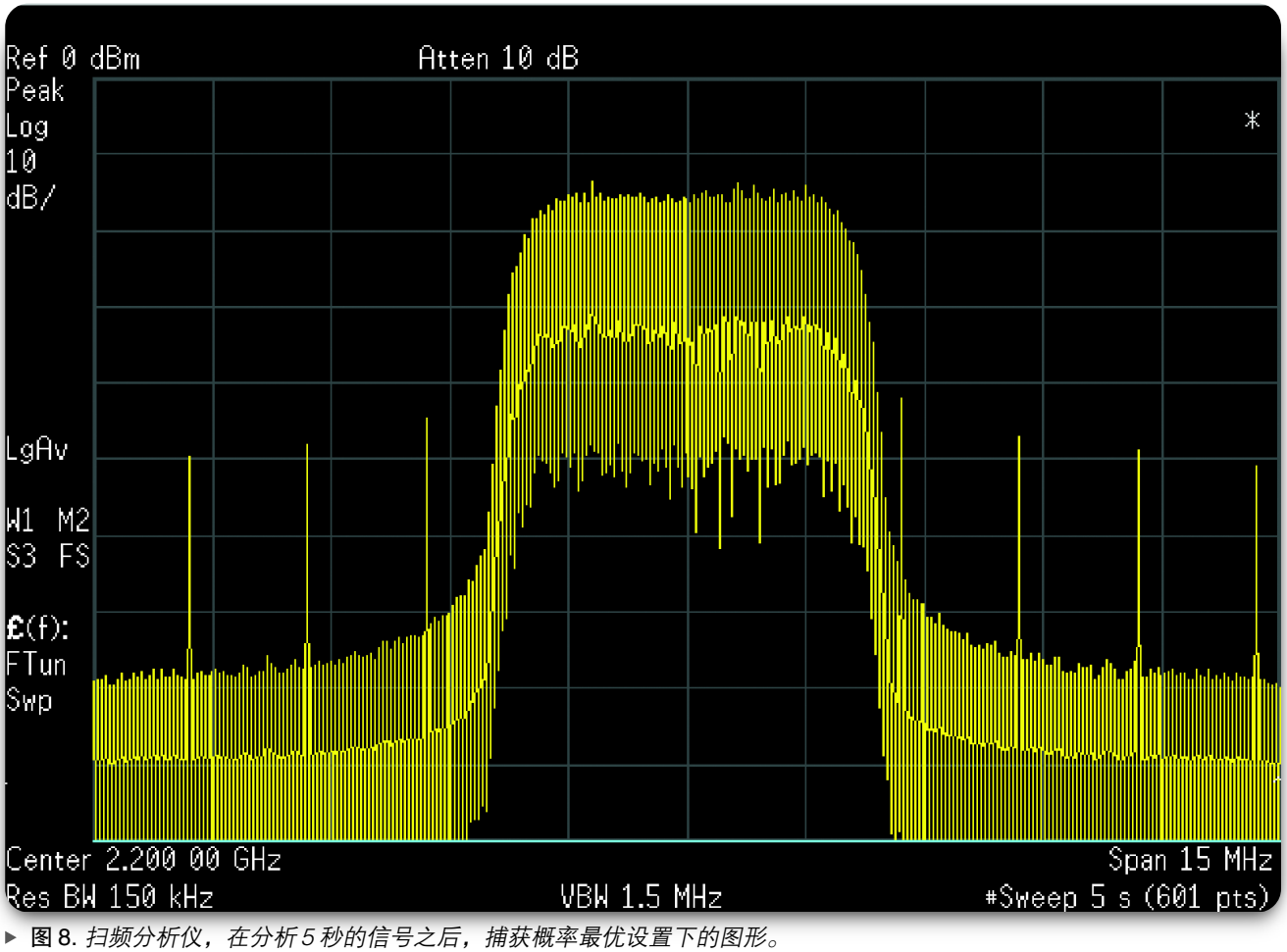
其中一个实例是在时域中有一个瞬变信号 (使用AWG模拟) 导致发射频谱扩展，这可能是由于任意数字电路模块中的问题引起的，可能是反馈数字化器、DSP 代码、上变频电路中的 ADC，或是 RF 电路中看到的信号延迟和加热效应。这些瞬变发生频次低，并且似乎与系统中的任何时钟异步。



▸ 图 7. *3.84 MSymbols/s、每秒重复发生问题两次的 QPSK 信号的 DPX™ 频谱图。这些数据是在 5 秒周期中采集的。*

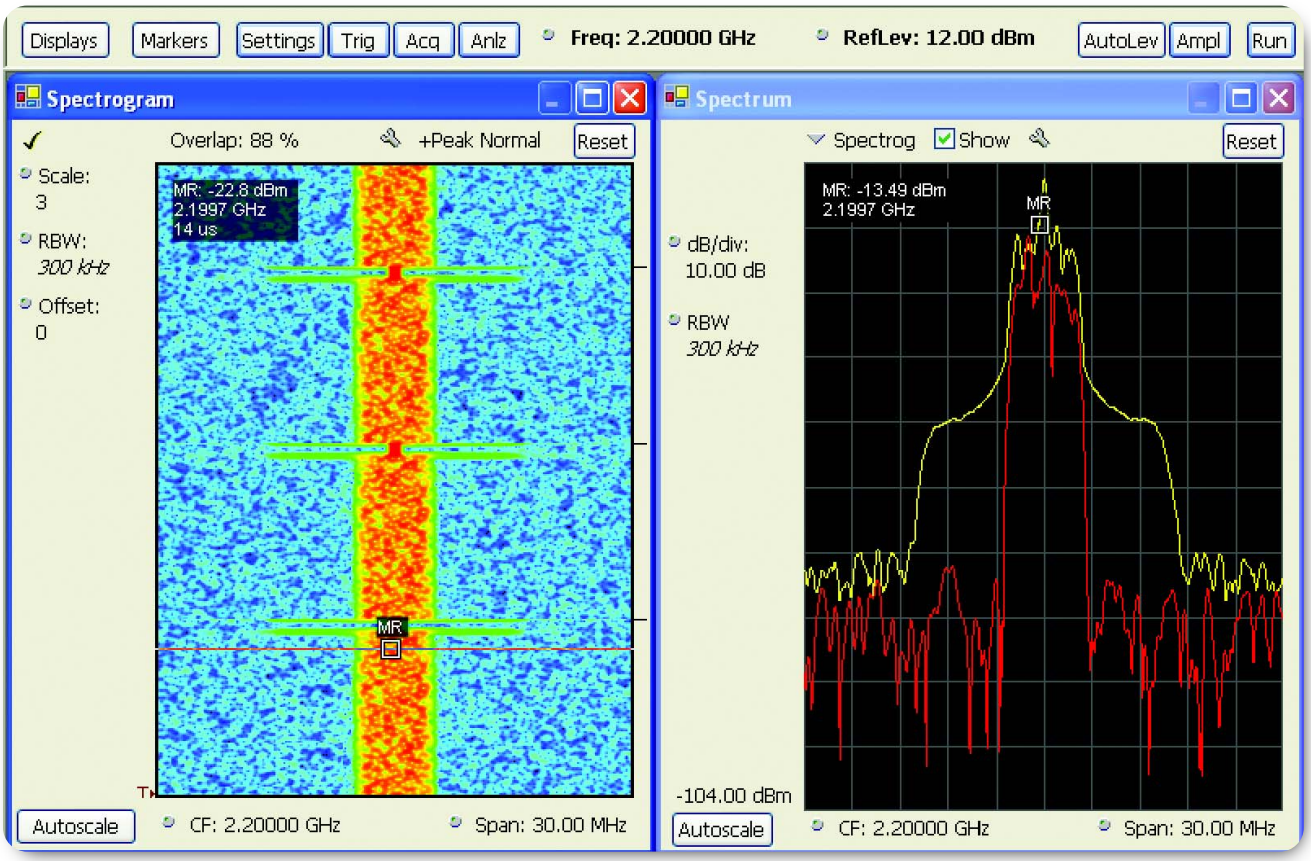
发现

发现问题可能是一个棘手的挑战。RSA6100A系列拥有DPX™频谱处理技术，特别适合完成这一任务。这个频域窗口可以以 100% 的捕获概率，分析最短 24 us 的任何信号时长，保证在屏幕上分析瞬变信号。依赖扫描技术的传统频谱分析仪要求的最低信号时长要比 DPX 频谱处理技术高 1000 倍，要么不可能识别问题，要么会耗费非常长的时间。



▸ **图 8.** *扫频分析仪，在分析 5 秒的信号之后，捕获概率最优设置下的图形。*

图 7 和图 8 说明了 DPX 频谱处理和传统扫频分析之间的差别。这里，在输出波形中出现了时长为 30 us 的问题，每秒发生两次。在 DPX™ 显示屏上，可以很容易识别这个问题，在 5 秒的时长上，每次发生问题时都显示在屏幕上。相比之下，扫频分析仪(图 8)的扫描速度最快，捕获概率最优设置下的图形。我们使用 Max–hold 在屏幕上显示信号，允许仪器扫描 5 秒钟的时间。很难确定信号是边带还是单个瞬变。使用DPX™频谱画面(图 7)则可以查看每个信号瞬间。

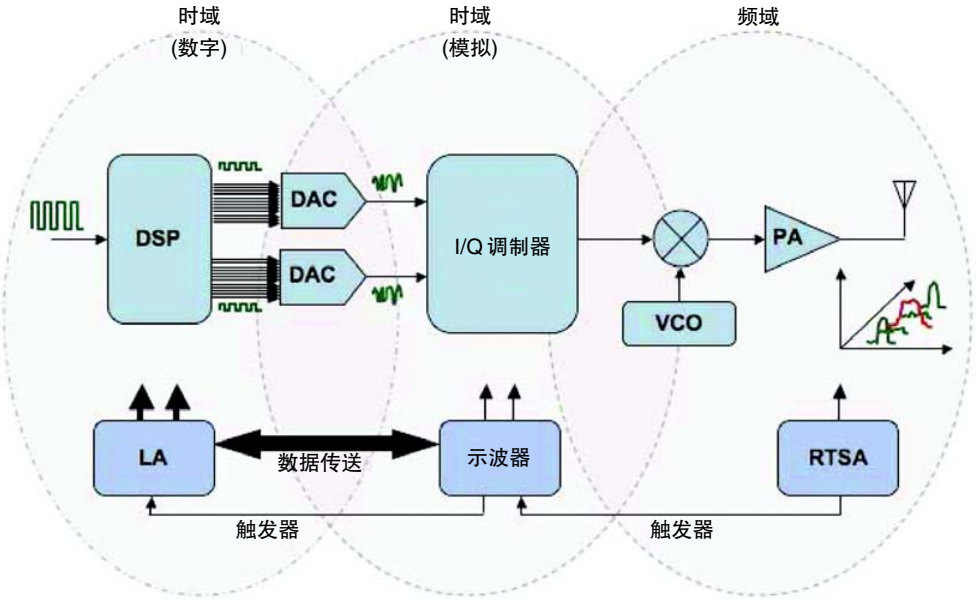


▸ 图 9. *频率模板触发捕获每个出现的有问题信号。左边面板中的频谱图显示了三次触发的捕获。在右边面板中，显示了整个事件的峰值检测频谱。红色的频谱是捕获正常调制部分过程中的频谱能量。黄色频谱是一个完整的捕获中的峰值检测结果，包括了导致频谱扩散的瞬变干扰信号*

触发和捕获

一旦已经识别问题、了解其特点，用户可以设置频率模板触发(FMT)，捕获信号，全面进行分析。通过查看DPX™显示屏，确定想要的信号所在的位置，并画一个模板，触发在这个区域外面的任何信号，可以简便地实现这一点。现在使用频率模板触发捕获图7中看到的信号实例，如图 9 所示。

在设置 FMT 时，用户可以选择捕获数据的时长及触发时刻点。用户还可以定义触发数量。在本例中，FMT设置成触发五次，在每次发生问题时捕获1 ms的数据，它把触时刻点放在每个采集的波形开头附近。



▸ 图 10. *信号路径中使用示波器、逻辑分析仪和 RTSA 查找问题。*

跟踪问题

现在我们已经确定问题发生在RF输出上，这时可以在电路的基带和IF部分使用逻辑分析仪和示波器，跟踪问题，直到问题来源。可以使用FMT的触发输出，触发任何其它测试设备，帮助定位问题。其它泰克应用指南中更加全面地解释了这些混合信号调试技术。

总结

由于其宽捕获带宽、长内存和固有的相关测量功能，RTSA 为分析和调试宽带宽 RF 通信系统提供了理想的工具。可以在高达 110 MHz 的带宽上，以很高的动态范围和低残余 EVM 进行频谱和矢量测量。所有测量域都是相关的，大大改善了调试能力。新型信号处理结构 DPX™ 可以在频域中立即分析最短 24 us 的瞬变，改善了发现瞬时频谱现象的能力。可以使用频率模板触发，可靠地触发频率瞬变，降低调试时间。

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) 6235 1210/1230
传真：(86 10) 6235 1236

泰克上海办事处
上海市静安区延安中路841号
东方海外大厦18楼1802-06室
邮编：200040
电话：(86 21) 6289 6908
传真：(86 21) 6289 7267

泰克广州办事处
广州市环市东路403号
广州国际电子大厦2807A室
邮编：510095
电话：(86 20) 8732 2008
传真：(86 20) 8732 2108

泰克深圳办事处
深圳市罗湖区深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦G1-02室
邮编：518008
电话：(86 755) 8246 0909
传真：(86 755) 8246 1539

泰克成都办事处
成都市人民南路一段86号
城市之心23层D-F座
邮编：610016
电话：(86 28) 8620 3028
传真：(86 28) 8620 3038

泰克西安办事处
西安市东大街
西安凯悦(阿房宫)饭店345室
邮编：710001
电话：(86 29) 8723 1794
传真：(86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处
武汉市武昌区民主路788号
白玫瑰大酒店924室
邮编：430071
电话：(86 27) 8781 2760/2831
传真：(86 27) 8730 5230

泰克香港办事处
香港铜锣湾希慎道33号
利园3501室
电话：(852) 2585 6688
传真：(852) 2598 6260

如需了解更多产品信息，请访问泰克公司网站 **www.tektronix.com.cn**

© 2006 年 Tektronix, Inc. 版权所有。全权所有。Tektronix 产品，不论已获得专利和正在申请专利者，均受美国和外国专利法的保护。本文提供的信息取代所有以前出版的资料。本公司保留变更技术规格和售价的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc. 的注册商标。本文提及的所有其它商号分别为其各自所有公司的服务标志、商标或注册商标。

7/06 DV/WOW 37C-19560-1

Tektronix
Enabling Innovation