应用指南

信号分析测量基础原理

优化本底噪声、分辨率带宽等

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

引言

对射频工程师来说，在其产品生命周期的各个阶段，都会用到一种基本而又不可或缺的测量工具：频谱分析仪或信号分析仪。仪器的关键指标，比如性能、精度和速度等，可协助研发工程师提升设计质量，并有助于制造工程师提高测试效率和产品质量。本文提供了多种技术方法，旨在帮助您轻松驾驭各种应用场景中的信号分析。重点是在保证速度和效率的前提下，协助您优化测量本底噪声、分辨率带宽、动态范围、灵敏度等属性。

“信号分析仪”通常是指具有以下特征的仪器：采用频谱分析仪架构和全数字中频（IF）区段，以复杂矢量方式处理信号，实现数字调制分析与时间捕获等多域操作。关于频谱分析仪、信号分析仪，以及它们的使用方法，可参阅是德科技应用指南 150：**《频谱分析基础》**。

提升测量精度的各种设置

了解信号分析仪的固有精度和鉴别被测器件（DUT）连接通道中的误差源，对于优化测量精度非常重要。良好的测量方法和实用的分析仪功能可以减少错误的发生，并且缩短测试时间。

利用数字中频技术，特别是在经过内部校准和校正的改进之后，可以实现高水平的基本精度。例如自带的修正功能和可高度重复的数字滤波器可以让用户在测量期间自由的更改设置，并且基本上不会影响到测试的可重复性。典型的示例包括分辨率带宽、量程、参考电平，中心频率和扫宽。

当 DUT 连接至经过校准的分析仪后，信号传递网络（图 1）可能会出现减损，或者致使被测信号发生改变。只有对这些效应进行适当修正或补偿，才能确保最佳精度。您可以通过一种方便、有效的方法来实现，那就是利用分析仪的内置幅度修正功能，并且与信号源和功率计结合使用。

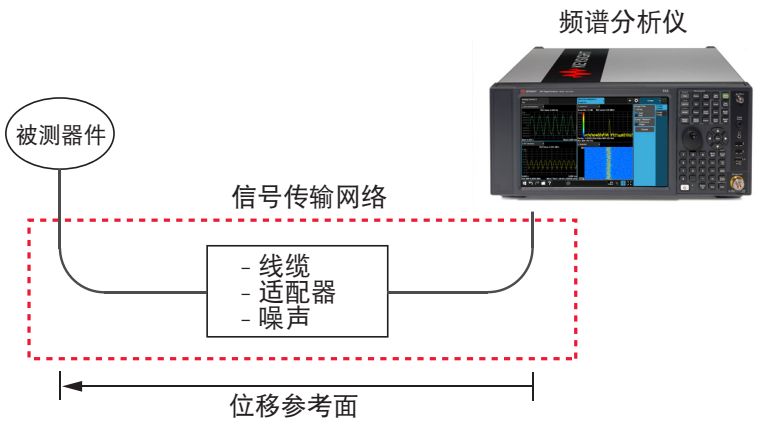

图 1. DUT 与分析仪的连接质量对测量精度和可重复性有很大影响。这种影响还会随频率的升高而变大。

图 2 显示了对信号传递网络的频响测量；该网络对 DUT 信号产生了衰减。为了消除多余的效应，首先应在指定扫宽的频率内测量信号传递网络的频率响应。在分析仪中，**幅度校正功能**采用一系列频率/幅度配对，将其进行线性连接，以产生对应测量显示点的校正系数。然后再依据修正结果调整显示的幅度。在图 3 中，测量结果中信号传递网络的不良衰减和增益均已被消除，这为信号分析仪提供了完全符合规范的精度。

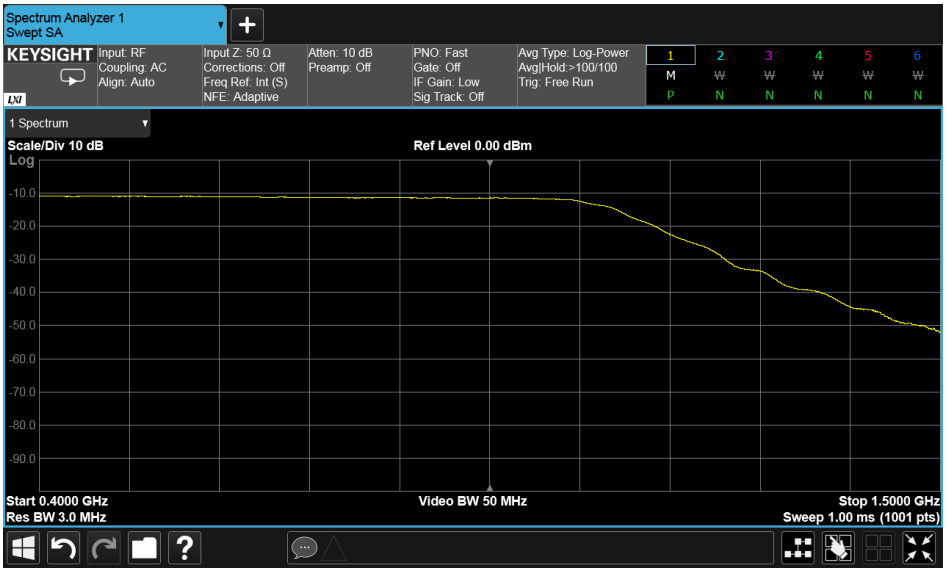

图 2. 这条迹线显示了针对 DUT 与分析仪的连接所测得的频率响应。

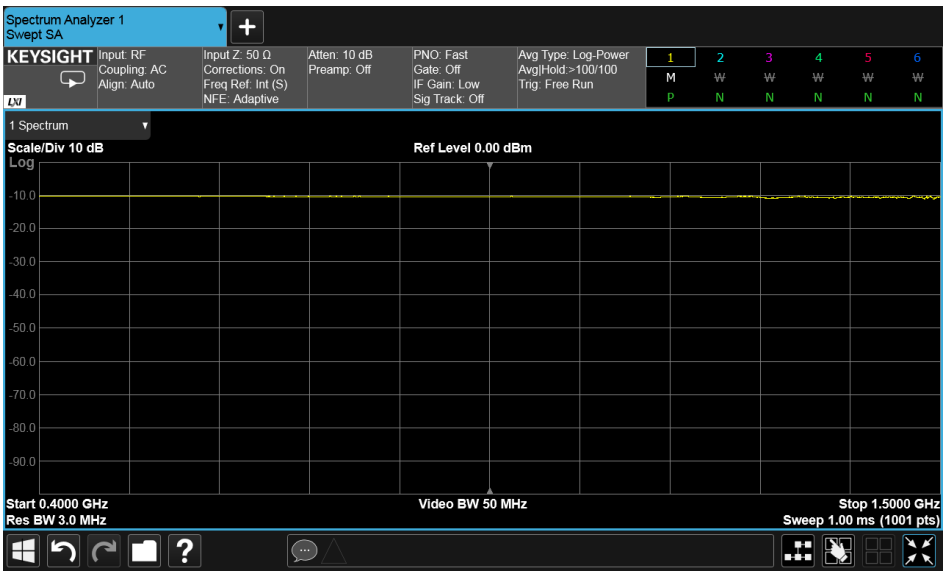

图 3. 使用分析仪的幅度修正功能，让频率响应更为平坦，并且提高了幅度精度。

通过这个过程，测量参考面就从分析仪的前面板移到了 DUT 上。在许多信号分析仪中，您都可以存储多种不同的校正值，以便用于不同的设备配置或分析仪设置。

针对不同的电缆与适配器组合，用户也可以在分析仪中储存相应的校正值。务必要特别留意 DUT 与分析仪之间的各项要素，包括电缆和连接器的长度、类型与质量。对连接器的维护（包括适当的扭矩）有助于把损耗降到最低，并确保良好的阻抗匹配和可重复性，特别是在微波和毫米波频率上。

针对高难度的测量，可以把分析仪的**有效输入**移到更接近于 DUT 的位置；这样可显著改善测量结果。例如，在测量极微小的信号时，我们可以把外部前置放大器连接至 DUT，以增加信号电平，从而缓解信号衰减或噪声增大等问题。如今的智能前置放大器可自动配置分析仪并上传增益和频率响应，以获得精确的校正值。

同样地，智能混频器可增强非常高频率下的测量。DUT 的输出端通常就是波导的直接连接端，您可以把混频器布置在此处。混频器会自动识别并下载其自身的转换系数，从而准确地显示测量结果。

设置分辨率带宽时需要权衡取舍

分辨率带宽是一项基本的分析参数。在以分离重要频谱分量和设置本底噪声为目标时，分辨率带宽所扮演的角色便更加重要。它能够让您更轻松地从分析仪或 DUT 引发的噪声中，识别出所需的信号。

在执行要求苛刻的测量时，频谱分析仪必须精确，并且要有测量速度与高动态范围的恰当配合。在大多数情况下，如果过于偏重一面，就会对另一面造成影响。采用或窄或宽的分辨率带宽就是一项重要取舍。

测量低电平信号时，较窄的设置较为有利：可以降低频谱分析仪的显示平均噪声电平（ DANL），从而增大动态范围和提高测量灵敏度。在图 4 中可看到，将分辨率带宽从 100 kHz 更改为 10 kHz，便能够对明显的 –103 dBm 信号进行更准确的测量：分辨率带宽减少 10 倍可使 DANL 提升 10 dB。

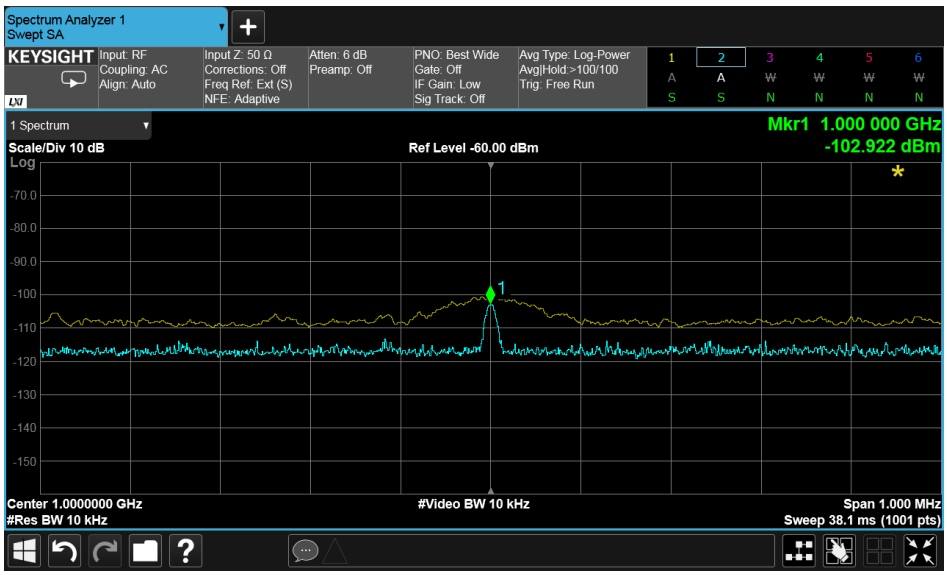

图 4. 将分辨率带宽从 100 kHz 降到 10 kHz 可提升 DANL，并可更轻松地看到所需的信号。

当然，较窄的设置不会永远都是最理想的选择。对于调制信号，必须将分辨率带宽设置得足够宽，使其能够包含边带。除非进行集成式频段功率测量（例如合并多个测量点以涵盖整个信号带宽），否则就会使功率的测量结果不够准确。通常，对排列紧密的宽带数字调制信号来说，这种测量方法 — 把使用窄分辨率带宽测得的多个测量点功率综合起来 — 最为实用。

窄带宽设置有一个重要的缺点：扫描速度慢。扫描速率通常与分辨率带宽的**平方**成正比，因此相较于较窄的设置，较宽的设置可以大幅加快扫描整个频率扫宽的速度。图 5 和图 6 比较了分别使用 10 kHz 和 3 kHz 的分辨率带宽，测量 200 MHz扫宽的扫描时间。

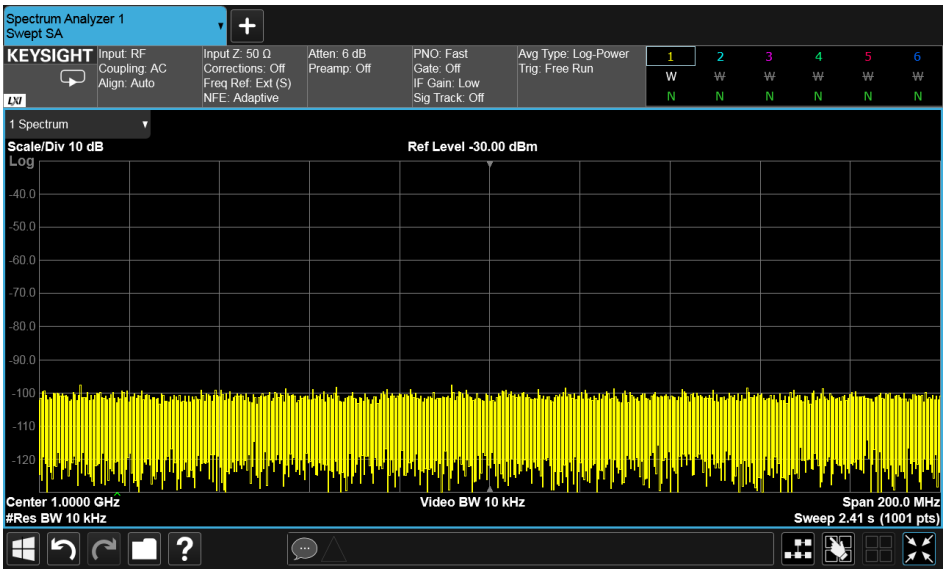

图 5. 以 10 kHz 分辨率带宽进行测量所用的扫描时间为 2.41 秒。

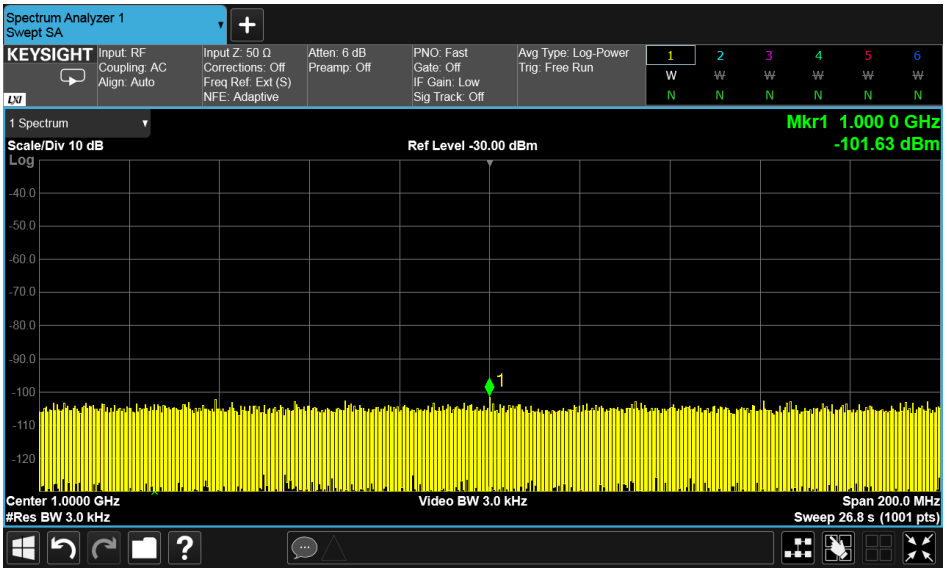

图 6. 将分辨率带宽降到 3 kHz 时，扫描时间增加到 26.8 秒，比上图慢了约 10 倍。

了解选择分辨率带宽的基本取舍可帮助您调整相关设置，把重点放在最重要的测量参数上。取舍不当的问题虽然难以完全消除，但现今的信号分析仪可以帮您减少甚至避免。

现在的分析仪可利用快速傅立叶变换（FFT）、数字分辨率带宽过滤以及扫描速度效应修正等数字信号处理，确保准确的测量结果；即使在使用窄分辨率带宽时也不例外。以“快速扫描”为例，该功能可将窄带宽测试的扫描速率提高 50 倍。信号分析仪可在中心频率/扫宽/RBW 自动耦合时，自动执行这些改善措施。用户还可以对速度和精度等特定的优先级进行手动优化，对相关设置执行进一步微调。

提升测量低电平信号时的灵敏度

分析仪自身产生的噪声会限制其测量低电平信号的能力；并且，许多设置都会影响该噪声的电平。例如图 7 就显示了分析仪的本底噪声是如何掩盖 50 MHz 信号的。

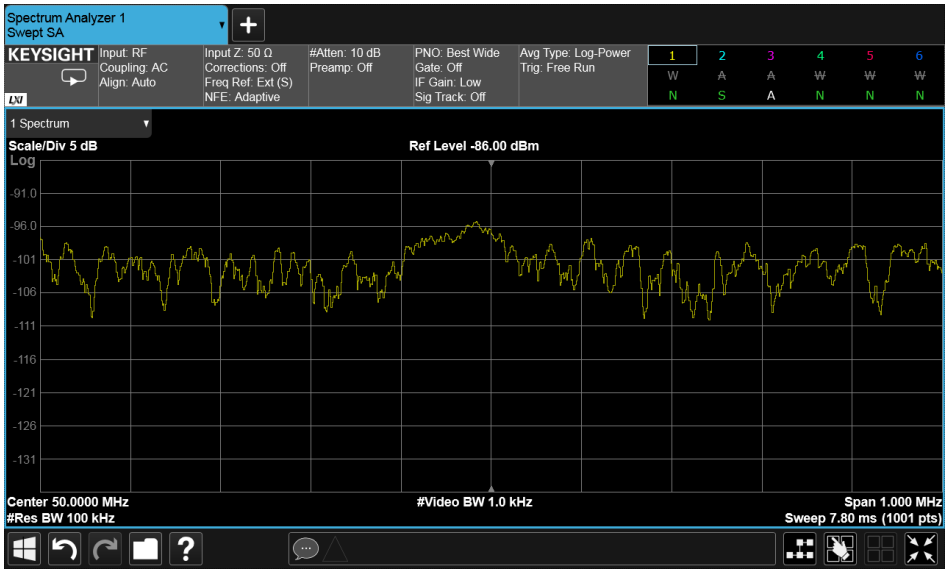

图 7. 在这里所示的配置中，分析仪的噪声掩盖了一个微小信号。

在测量这个低电平信号时，可以综合使用多种方法，来提升分析仪的灵敏度：最小化输入衰减、缩小滤波器的分辨率带宽（RBW），以及使用前置放大器。与早期技术相似，这些技术可降低 DANL，将微小信号与噪声分离，从而实现精确测量。

在分析仪的输入混频器端，减少输入衰减可提升输入信号的电平。由于分析仪本身的噪声是在衰减器之后产生，因此衰减设置会影响测量的信噪比（SNR）。如果将分析仪中的增益与输入衰减器耦合以补偿变化，真正的信号便会在显示器上静止不动。但 DANL 会随 IF 增益而改变，以反映出因衰减器设置的任何更改而导致的 SNR 变化。因此，将输入衰减降至最低，对改善 DANL 非常重要。

通过混频器和任何内部放大之后，重新被放大的信号会进入包含分辨率带宽滤波器的中频区段。通过缩小滤波器宽度，会使到达分析仪包络检波器的噪声能量减少，进而降低 DANL 的测量值。

图 8 显示了 DANL 的连续减小（注意参考电平的降低）。最上方的迹线表示 CW 信号在分辨率带宽降到最小时高于本底噪声。中间的迹线显示了把衰减降到最小后的改善效果。最下方的迹线是，采用对数功率平均法（使用对数标度的 dB 读数），将本底噪声再减小 2.5 dB，而未影响到 CW 信号的测量。这种方法结合峰值检测（显示检波器设置），可以有效地测量本底噪声附近的杂波信号；后者是一项常见的信号分析任务。

图 8. 在这些信号测量的过程中，减少分辨率带宽（黄色），降低输入衰减（蓝色）以及切换至对数功率平均（紫色）之后，DANL 逐步降低。

若要达到最高灵敏度，必须使用具有低噪声和高增益的前置放大器。如果放大器的增益足够高（例如显示的噪声增大至少 10 dB），放大器的噪声系数就会严重影响前置放大器与分析仪的联合本底噪声。

从特定测量中减去分析仪的噪声功率，是降低频谱测量噪声的有效途径。这当然可以通过测量每个测量的本底噪声来实现。但是，是德科技的某些 X 系列信号分析仪还提供了更实用的方法：本底噪声扩展（NFE）。通过 NFE，分析仪可以精确地模拟和分析各测量点的噪声功率，并自动从测量结果中将其去除。如此便可将实际的本底噪声降低 10 dB 或更多，而不需更改扫描时间。除了前述的步骤以外，您也可采用这种技术。

如同前面所述，当测量噪声附近的杂散信号时，对数功率平均与峰值检波的结合可以提供 2.5 dB 的信噪比效益。或者，如果优先考虑将本底噪声中的测量差降到最低（例如较平滑的迹线），那么使用“平均”显示测波器来进行功率平均可能会是最佳的选择。平均检波器结合较慢的扫描时间，可以最有效地减少噪声变动（例如使本底噪声更平滑）。

在特殊情况下，例如测量规律性重复的时变信号时，可以考虑使用同步法或时间平均技术。这是矢量信号分析仪的一项功能，它可在计算频谱之前对时域中的输入信号进行平均采样。使用一个触发器，让时域样本与重复信号同步。如此，可显著降低时域、频域和调制域测量的有效本底噪声。

优化测量失真时的动态范围

仪器对信号中较大的基音和较小的失真进行区分的能力，是频谱分析的一项基本要素。这就是分析仪的动态范围，亦即信号与失真、信号与噪声，或信号与相位噪声之间的最大差值。

测量信号与失真的组合时，输入混频器的电平决定了动态范围的大小。混频器电平主要用来优化动态范围，电平值取决于三项技术指标：二次谐波失真（SHD）、三阶交调（TOI）失真，以及DANL。将这三个技术指标合并显示于单一图形中，即可形成混频器电平与内部产生的失真和噪声的对比图。

图 9 绘出了当混频器电平在 –40 dBm 时的 –75 dBc SHD 点；混频器电平在 –30 dBm 时的 –85 dBc TOI 点；以及对应 10 kHz 分辨率带宽时 –110 dBm 的本底噪声。因混频器基本电平每增加 1 dB，SHD就会增加 2 dB，因此 SHD 线按斜率 1 进行了绘制。但是由于失真是由基音与失真间的差异决定的，因而其差异只有 1 dB。相同的，TOI 是按斜率 2 所绘制：混频器电平每改变 1 dB，三阶产物就会变动 3 dB，或者说相差 2 dB。通过设置衰减器，将混频器信号的电平设置在二阶失真和三阶失真与本底噪声相等时所对应的点上（图中的注释表明了混频器电平），可以使二阶和三阶的动态范围达到最大。请注意，最低点处在一个小曲线上；该曲线是由于对数（dB）标尺上增加了失真与噪声而造成的。

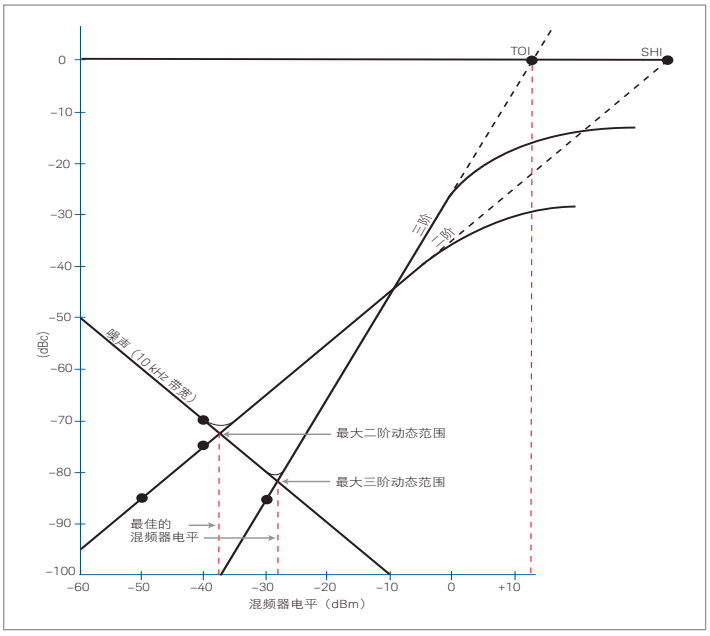

图 9. 显示的二阶和三阶动态范围是依 DANL 与对应失真曲线相交处的最小失真区域而定。

要增大动态范围，就必须采用窄分辨率带宽。如图 10 所示，当 RBW 设置从 10 kHz 降至 1 kHz 时，动态范围会增大。请注意：二阶增加了 5 dB，三阶失真超过了 6 dB。

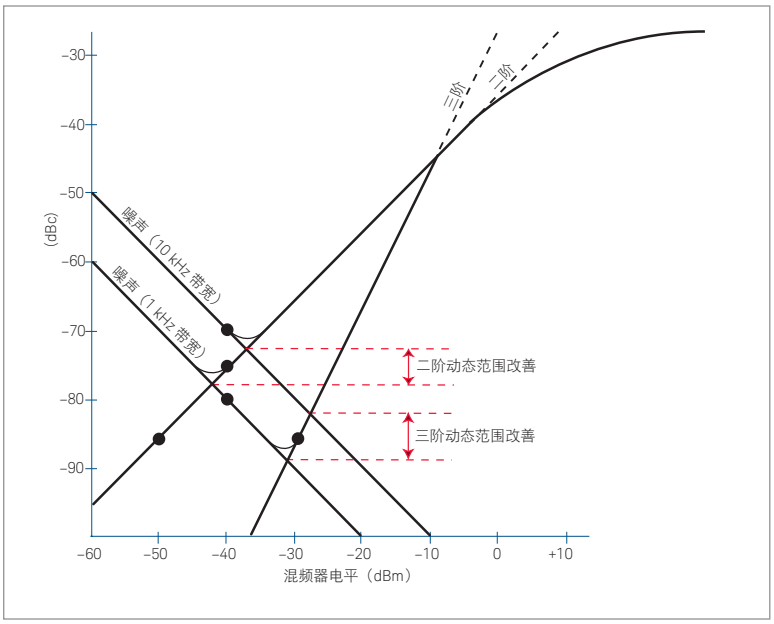

图 10. 减小 RBW 可降低分析仪的 DANL（从左下角开始的线），并改善二阶与三阶动态范围的操作点。

最后一点，分析仪的相位噪声也会影响互调失真（IMD）的动态范围。原因是 各种频谱分量（例如测试音调和失真）之间的频率间隔与互调测试音调间的间隔相同。例如，以 10 kHz 分离并以 1 kHz 分辨率带宽测量的测试音调，会造成图 11 所示的噪声曲线。如果分析仪在 10 kHz 偏移时的相位噪声仅为 –80 dBc，那么此测量的最大动态范围会是 80 dB，而非 DANL 与三阶失真交叉点所指示的 88 dB。

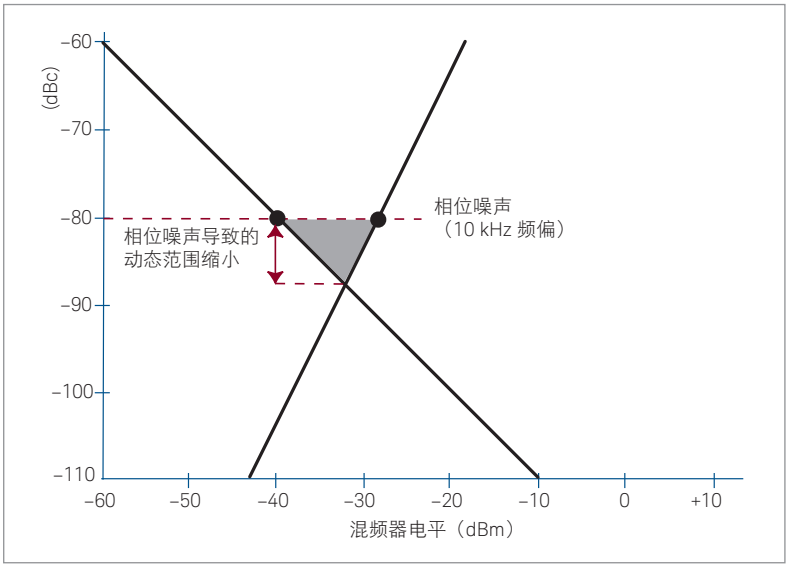

图 11. 对于像互调测试音调这样间距很小的信号，相位噪声可能会将测量动态范围限制为低于图表中所显示的值。

准确隔离并测量猝发与瞬态

使用扫描频谱分析仪时很难准确地测量猝发或脉冲信号，特别是携带调制的信号。分析仪会以组合形式显示脉冲携带的信息及有关脉冲形状的频率内容（例如脉冲包络）。急剧的上升与下降时间会在频谱中产生不需要的频率分量。这些干扰可能会掩盖用户想要看到的信号，并降低测量精度。

有两项测量技术可解决这些问题：时间选通频谱分析法，和用矢量信号分析仪（VSA）触发的快速傅立叶变换分析法。Keysight X 系列等信号分析仪可以提供这两项功能。

扫描分析中最灵活（且常用）的技术为**选通扫描**或**选通 LO**。在此方法中，将分析仪设置为只对想要测试的输入信号部分进行扫描和获取数据。可能会使用一个外部触发器进行同步测量；但有些分析仪可以从脉冲中自行产生触发。请务必注意：这种选择时间的频谱分析需要一个持续重复的信号。分析仪会通过积累成功的测量来建立完整的频谱结果，并且提供稳定且准确的结果。

通常的预期效果是：在信号脉冲或猝发期间测量它的频谱，并且避开脉冲在开关转换时的频谱效应。这样，我们便可利用自动功率测量功能来进行选通。自动功率测量功能包括信道功率、邻近信道功率（ACP），和频谱发射模板（SEM）等。

另一种技术涉及到利用快速傅立叶变换处理信号，有时也称为选通 FFT。此方法不需要重复信号；但如果信号重复，信噪比就会因时间平均而得到改善（如前面所述）。

使用信号分析仪和 VSA 软件执行选通快速傅立叶变换分析时，效果最好，并且具有最高的灵活性。VSA 软件用以执行触发，通过精确地调整触发时序、选通或 FFT 的记录时长，准确匹配被测信号的猝发情况。

VSA 软件还允许调整 FFT 点的数量和选择测试窗口的形状（例如加权）。窗口形状已在测量结果中的幅度精度、频率分辨率与动态范围之间做出取舍。优化这些取舍设置有助您从简单的信号猝发中获取最有效的信息。

对于选择时间的信号分析，“自定义测试时间（self-windowing）”功能可以实现非常有效的信号分析。该功能会以特定的时间间隔定期分析信号。比如，无线通信系统中常用的正交频分复用（OFDM）信号即是其中的一个范例。执行的方式是，将时间记录长度或选通长度设为单一的 OFDM 符号，或设成该符号的整数倍，而后选择一个“统一制式”窗口。此窗口在时域中呈现平坦状态；这种状态对被测信号的周期与 FFT 窗口（即时间记录）之间的相互匹配有一定依赖性。

图 12 是测量两个 OFDM 训练序列符号时的平顶窗口与统一制式窗口的对比图；平顶窗口是专为幅度精度而设计的，它在频域显示下，顶部呈现平坦状态。在这种情况下，统一制式窗口提供了高精度的最佳频率分辨率。

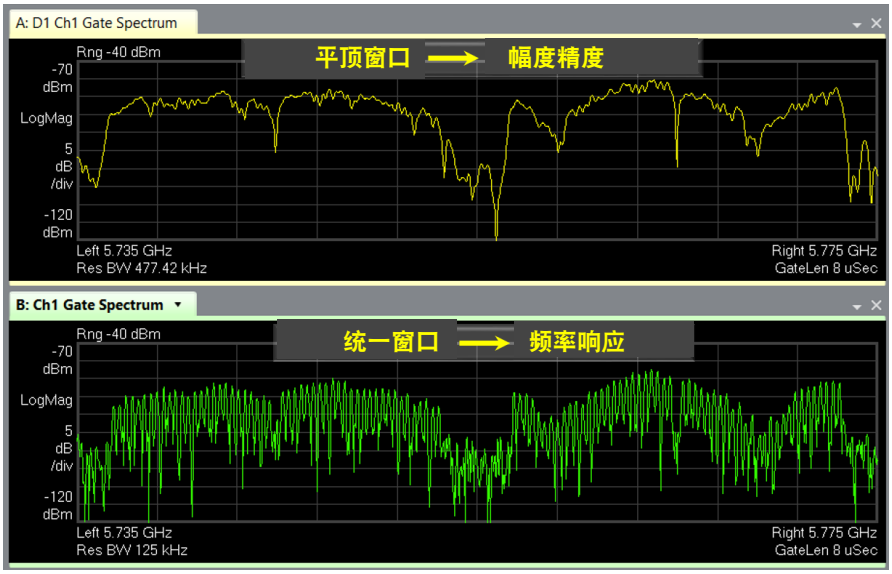

图 12. 两条迹线都显示了在 5 GHz 频段时，OFDM WLAN 波形的空中捕获。在每项测量中，选通都与一部分“自定义测试时间（self-windowing）”训练序列相符。在下方的迹线中，统一制式窗口提供了足够的分辨率，从而显示出了每个 OFDM 的副载波。

使用测量应用软件提升速度、精度和可靠性

无线应用及航空航天与国防应用中的信号越来越复杂，这就使得对某些频谱进行手动设置，以及进行调制质量的测量也变得愈加困难，有时甚至无法执行。幸运的是，现今信号分析仪的处理能力不但让复杂的测量变得简单，也让猝发、谐波和相位噪声等传统测量变得更容易执行。

要把处理能力与智能测量结合起来，最简单的方式就是在信号分析仪中配备测量应用软件。这些应用软件可以分为两大类：通用型和专用标准型。

通用型应用软件侧重于传统分析任务，可使仪器中的自动测试能力得到进一步延伸，使其能够处理更广泛的常规测试需求。这些应用软件对于开发和制造射频、微波收发信机及其相关元件非常实用。PowerSuite 是德科技 X 系列信号分析仪的标配。这是一款全面的测量套件，其测量能力涵盖了信道功率、ACP、占用带宽、互补累积分布函数（CCDF）、谐波失真、杂散发射、TOI 以及 SEM。

其他的通用型应用软件可处理相位噪声、噪声系数、电磁兼容性（EMC）及综合的脉冲分析（参见图 13 和图14）。在所有情况下，测量应用软件均可大幅简化测量设置（降低繁琐程度，减少误差），并提供将大量测量结果简化解读的定制显示，或者提供合格/不合格的指示（参见图 13 和图 14）。

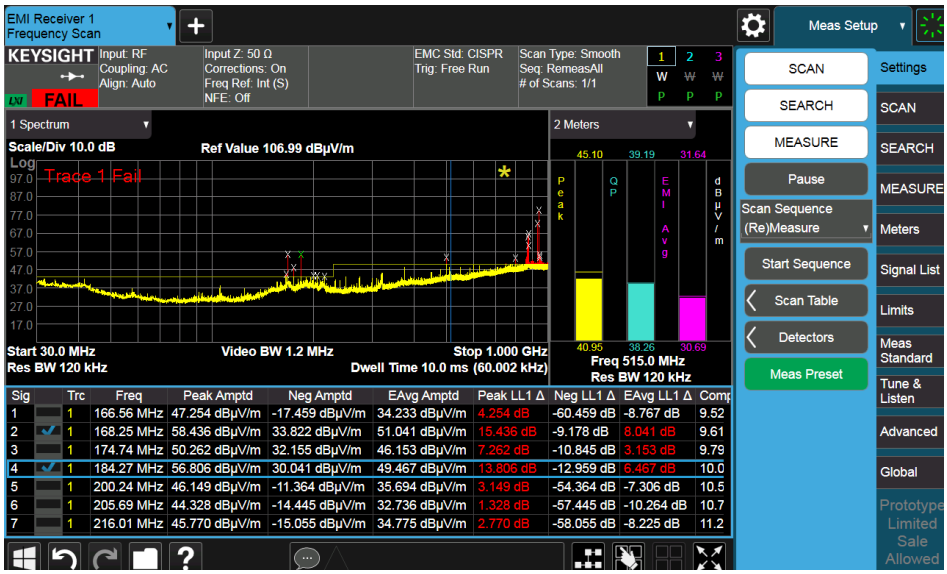

图 13. N6141C EMC 应用软件在执行传导和辐射发射的先期认证测量时，图中的测量配置符合 CISPR 16-1-1 或 MIL-STD 要求。

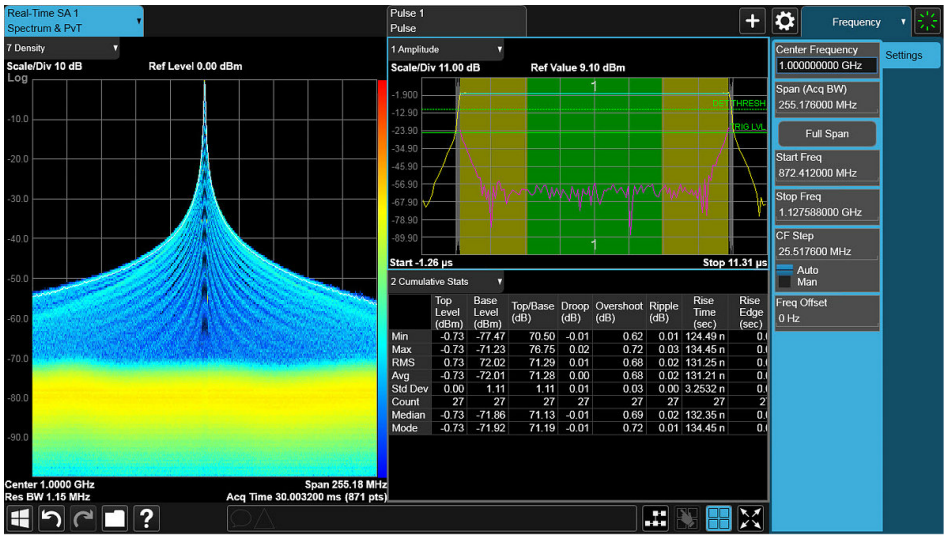

图 14. N9067C 脉冲测量应用软件可以收集大量的脉冲信息，进而执行各种参数计算，比如计算周期、宽度、脉冲重复间隔（PRI）、上升/下降时间、过冲、平均功率和峰值功率等。

识别内部失真产物

当高电平信号到达频谱分析仪的输出端时，可能会造成失真产物，使输入信号上的真实失真受到掩蔽。利用双迹线和分析仪的射频衰减器，您可判断分析仪内部产生的失真是否对测量造成任何影响。

这是一种实用的测量方式，因其可对特定设置（信号、分析仪与连接）的严重衰减进行优化。通常，这种有针对性的优化要好于单纯按照仪器规范计算出的结果。

首先要把分析仪的输入衰减器设置好，让输入信号电平减去衰减器设置后约为 0 dBm。为了识别这些产物，需将输入信号调至二次谐波，并将输入衰减器设置为 0 dBm。接下来，储存迹线 B 的屏幕数据，将迹线 A 选为活动迹线，然后启动游标 Δ。现在频谱分析仪显示迹线 B 的储存数据与迹线 A 的测量数据，游标 Δ 则显示了两条迹线间的幅度差和频率差。最后，将射频衰减增加大约 15 dB，并将迹线 A 的响应与迹线 B 做比较。

用于信号分析仪的专用标准型应用软件也有数十种之多，它们主要面向传统和新兴的无线标准，比如 LTE/LTE-Advanced、GSM、W-CDMA、WLAN、蓝牙以及数字视频等。这些软件可将基本的射频工具（信号分析仪）转换为基于标准的发射器测试仪，用以执行射频一致性测试，以及全面显示测试和故障诊断信息。在某些情况下，为了分析复杂的、高度专业的无线标准，唯一可行的办法就是选择一种专用软件。

图 15 和图 16 中显示了 N9080/9082C 测量应用软件的典型 LTE 测量示例。这些图形化和表格式的测量数据显示结果还可以通过配置来执行合格/不合格测试。

图 15. 在这个 LTE 下行链路解调制结果中，包含了各种信号层的星座图（图中上方）以及检测到的资源分配（图中右下方）。

针对高级数字调制方案中的信道功率测量，如果进行手动配置将会十分复杂，解读起来也很繁杂。例如，在 LTE-Advanced 标准中，针对非连续载波聚合的信号，还会进行累积 ACLR（CACLR）测量。

图 16. 由于信号分析仪决定着输入衰减和参考电平，因此分析仪的失真导致了二次谐波幅度显示出差异。

如果迹线 A 和迹线 B 的响应不同（如图 16 所示），就表明分析仪的混频器因输入信号的高电平而产生了内部失真产物。这时就会需要有更高的衰减，以便得到图 17 所示的结果。针对某些分析仪，您可以用最小 1 dB 的步长试验衰减值。

图 17. 二次谐波测量结果显示了相同的幅度，表明分析仪本身的失真未在结果中造成误差。

利用实时分析寻找并测量不稳定的信号

在无线应用或航空航天与国防领域中，都会有许多脉冲或猝发信号，或是出现必须进行表征的复杂瞬态特性。在某些情况下，不良信号或特性会被掩盖，因此不容易被检测或隔离。了解这些信号或特性对故障诊断或系统优化非常重要。

许多信号分析仪所采用的数字化架构和高速 DSP 可以通过两种方式来满足这些需求：实时频谱分析仪和矢量信号分析仪的信号记录/回放。以前，这两种功能是由独立的专用产品分别执行。现在，这两种功能都已成为是德科技 X 系列等主流信号分析仪的选配功能。

实时频谱分析仪（RTSA）采用专门的处理方式，在中频区段计算连续采样数据流的频谱结果。连续采样数据流代表中频输入。此类分析仪能以足够的速度处理所有的信号样本，执行频谱计算，并且生成无间隙的频谱结果。不会漏失任何信号或特性。

RTSA 会以非常高的速率产生频谱，每秒可达数千。这就另我们无法通过肉眼来看到或解读各个频谱。因此，显示器通常会采用不同的颜色，在结果中展示出特定的幅度/频率组合是以怎样的频次呈现的。这些**频谱密度**显示的颜色与阴影可以进行调整，以表示或强调非常频繁、比较频繁或非常不频繁的事件（图 18）。

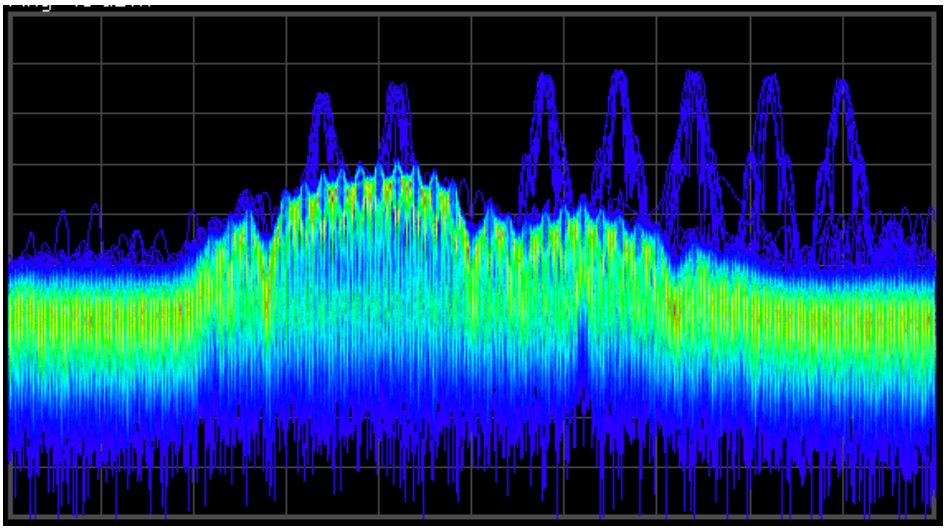

图 18. 2.4 GHz ISM 频段的无线频谱密度测量包含短暂的蓝牙跳频和较长的 WLAN 传输。较频繁出现的幅度与频率值以红色和黄色表示，不频繁的值则以蓝色表示（例如蓝牙跳频）。

实时显示频谱密度在追踪间歇性信号或特性时非常实用。而在这种显示的背后是由大量测量来支持的。这些测量还可以产生触发，以便用来隔离特定的信号或特性。可手动或自动建立频率模板，当信号违反模板规则时，就会引起触发事件（图 19）。

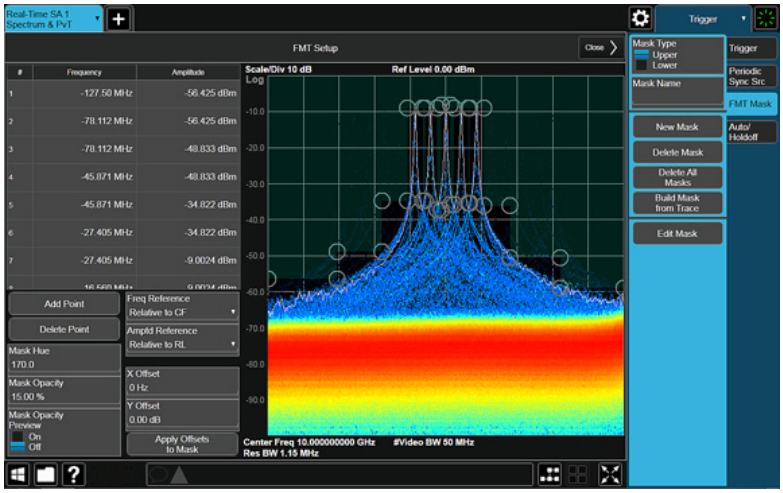

图 19. 在 RTSA 选项中，频率模板触发会以频谱上方的深绿色阴影表示，而电平/频率组合则以圆圈表示。发生在模板以外的信号跳频也会产生触发。

在寻找不稳定的信号或特性时，最强大的分析技术是，将频率模板触发与 VSA 的信号捕获/回放功能结合使用。频率模板触发所产生的 RTSA 测量仅有功率频谱，而 VSA 信号捕获或时间捕获则会记录信号的**完整时间记录**，此记录是一种矢量形式。通过对此完整记录的后续处理，VSA 可执行多种类型的分析，包括频谱、时域与解调（图 20）。

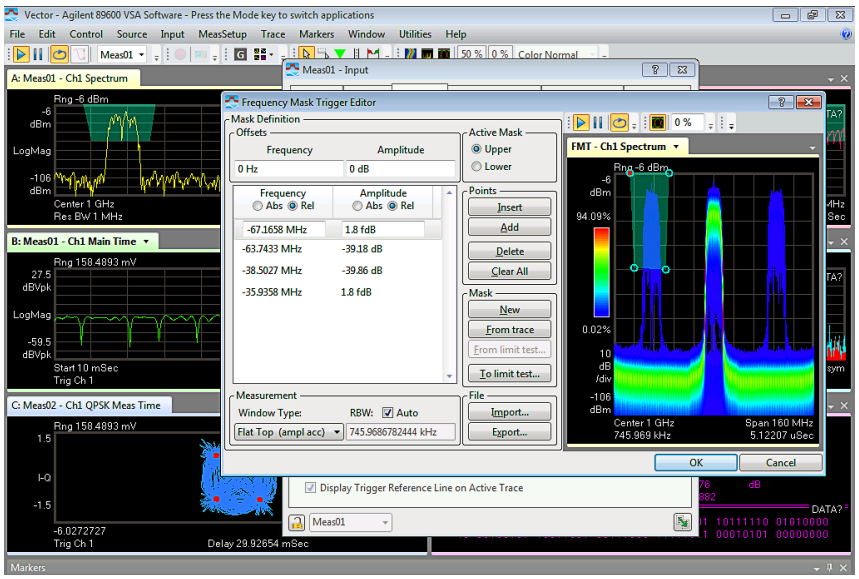

图 20. 在这个矢量信号分析仪的显示屏上，有一个频率模板触发启动了对某个单一跳频的捕获和后续解调。

为了呈现更多信号特性的相关信息，可对由频率模板触发所启动的捕获动作进行调整，使其在触发事件前或触发后开始。在寻找特定信号特性的起因，或是当原因与特性发生在不同时间时，这种灵活的时序对故障诊断很有帮助。

结论

工程的内涵就是将各种创意有机地联系起来，并解决遇到的问题。这种经验推动了 X 系列信号分析仪持续演进。它们树立了全新的性能标杆，让您能轻松关联因果关系，进而快速找到答案。从 CXA 到 UXA，X 系列分析仪提供了十分广泛的选择。选择 X 系列，建立创新桥梁。

如欲了解更多信息，请阅读**《频谱分析基础》**或访问 www.keysight.com/find/X-Series

如欲了解更多信息，请访问：www.keysight.com

如需了解关于是德科技产品、应用和服务的更多信息，请与是德科技联系。
如需完整的联系方式，请访问：www.keysight.com/find/contactus

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

此信息如有更改，恕不另行通知。© Keysight Technologies, 2016-2017, 2019, Published in USA, April 19, 2019, 5965-7009CHCN