



应对毫米波 信号分析挑战

引言

毫米波技术为无线通信领域带来翻天覆地的变化。新一代 5G、卫星和车载雷达通信使用超大带宽，实现了更高的数据吞吐量和超精细的距离分辨率。毫米波技术是一个至关重要的推动因素，它为性能提升提供了充足的裕量，但同时也带来了路径损耗、设计裕量小、调制复杂、标准严格等挑战。

在毫米波频率下，路径损耗会比较大，这就使射频 (RF) 功率受到限制，成本也会增加。此外，使用空中接口 (OTA) 测试方法测量性能指标，也更难得出精确、可重复的结果。大带宽能够实现高数据吞吐量、高距离分辨率、高精度和低时延，但噪声也会增加。路径损耗和噪声过大会让测试变得更加复杂，测量不确定度随之增加。



本文探讨了为解决当今和未来毫米波应用所面临的测试难题，我们需要考虑哪些关键因素。

毫米波测试挑战

无线技术为了实现更快的数据速率，需要使用更宽的信号带宽和更高阶的调制方案。毫米波的一大优势是带宽更大。但是，更大的带宽和更高阶的调制方案会给毫米波频率上的链路质量带来挑战。法兰连接中的任何歪斜都会产生多余的反射，致使信号的质量和功率双双下降。工程师在准确评测毫米波元器件和设备的时候需要特别注意。

过大的路径损耗

在毫米波频率下，如果仪器与待测件 (DUT) 之间的路径损耗过大，那么信噪比 (SNR) 会降低。信噪比越低，误差矢量幅度 (EVM)、邻道功率和杂散发射等信号分析测量就会面临更大的挑战。

由于元器件紧凑且集成度高，没有足够的空间进行探测，因此需要进行辐射测试，也称为空中接口 (OTA) 测试，如图 1 所示。在这种测试场景中，信号电平会大幅下降，您需要控制并校准测试系统周围的辐射环境。

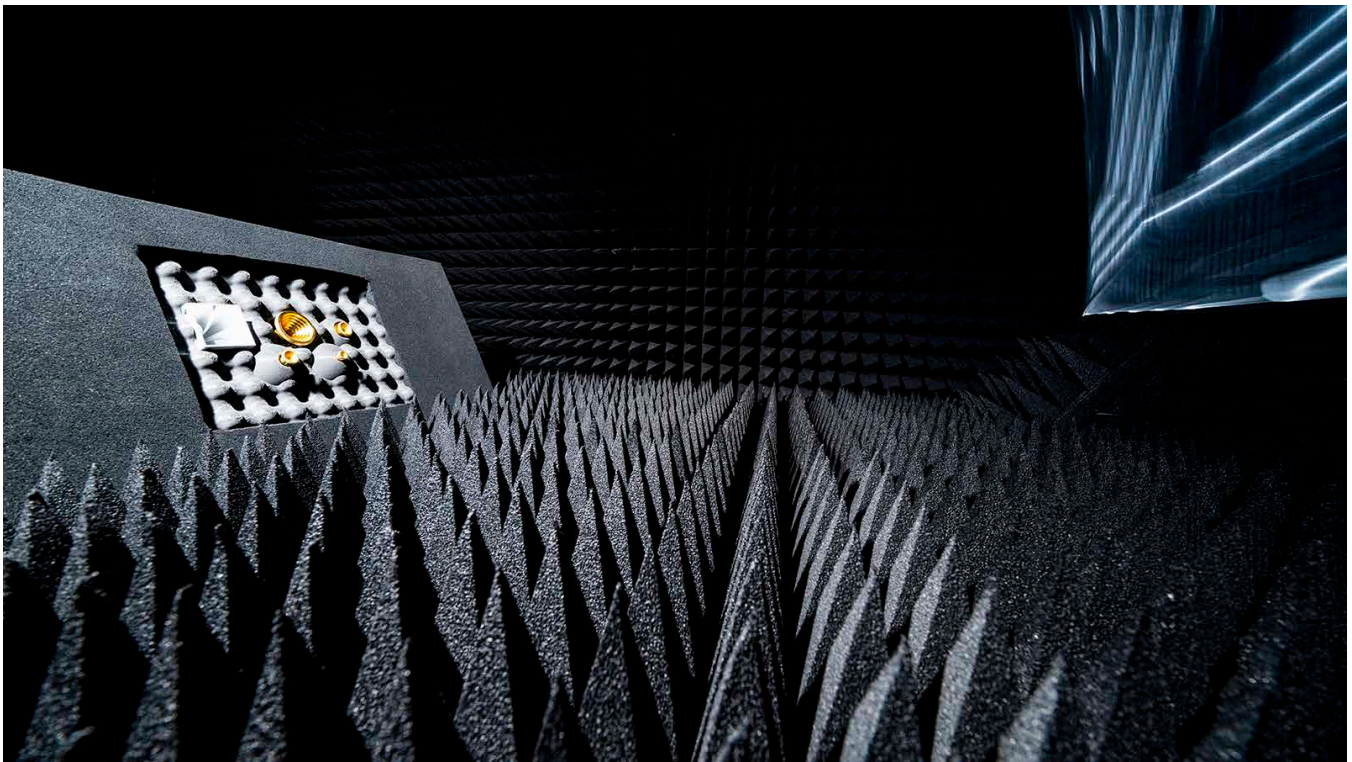


图 1. OTA 测试暗室

宽带噪声

毫米波频段可提供更大的可用带宽。但是，发射信号需要比信道的本底噪声强很多，才能更好地被接收机捕捉到。同样，增加分析带宽也会给信号分析仪带来更大噪声。噪声会导致测量中的 SNR 下降，给毫米波测量增加难度。

频率响应

测试系统的主要目标是表征待测件。系统必须将待测件的测量结果与所有其他测试部分的影响区分开来。在构建测试系统时，信号分析仪与待测件之间的元器件（例如混频器、滤波器 and 放大器）会产生频率响应。这些响应在不同的频率出现，并且包含幅度和相位误差。调制信号的幅度和相位误差会使得调制质量下降。测试信号的带宽越大、频率越高，频率响应就会越糟糕。图 2 显示了一个正交频分复用信号在频率响应较差（左）和频率响应较平坦（右）时的波形。

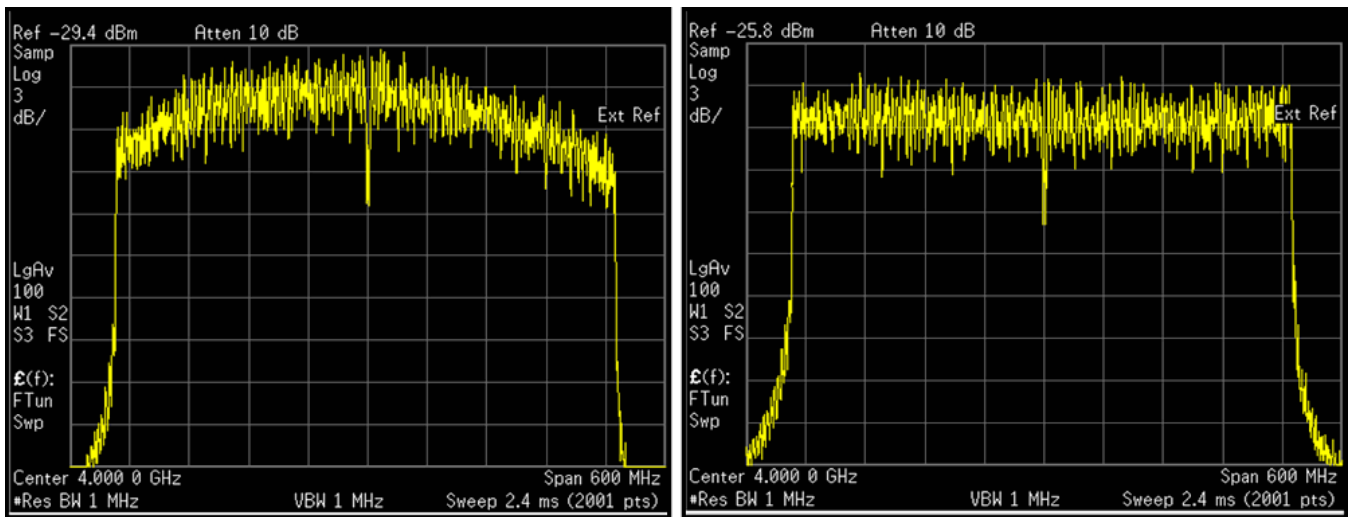


图 2. 频率响应对频域的影响

减少信号路径损耗

无论您是在评测发射机、诊断接收机故障还是分析空中接口信号，灵活的信号分析仪硬件和软件都能为您提供更佳解决方案。输入信号可能功率很大，也可能像噪声一样功率很小，频率从低频率到太赫兹不等，可能是连续波，也可能是经过复杂宽带调制的波形。为了测量种类如此繁多的输入信号，信号分析仪在遇到较大功率时使用衰减器，在遇到较小功率时使用前置放大器。信号分析仪提供多个射频信号路径——例如默认路径、微波预选器旁路、低噪声路径和全旁路路径——从而降低噪声，提高灵敏度并减少信号路径损耗，获得更好的 SNR。

默认路径——测量小信号

图 3 显示了信号分析仪的常规信号路径。输入信号在经过射频衰减器、前置放大器和预选器之后，才到达混频器。这个是默认路径，适合用于测量带宽在 45 MHz（受预选器带宽限制）以下的小信号。

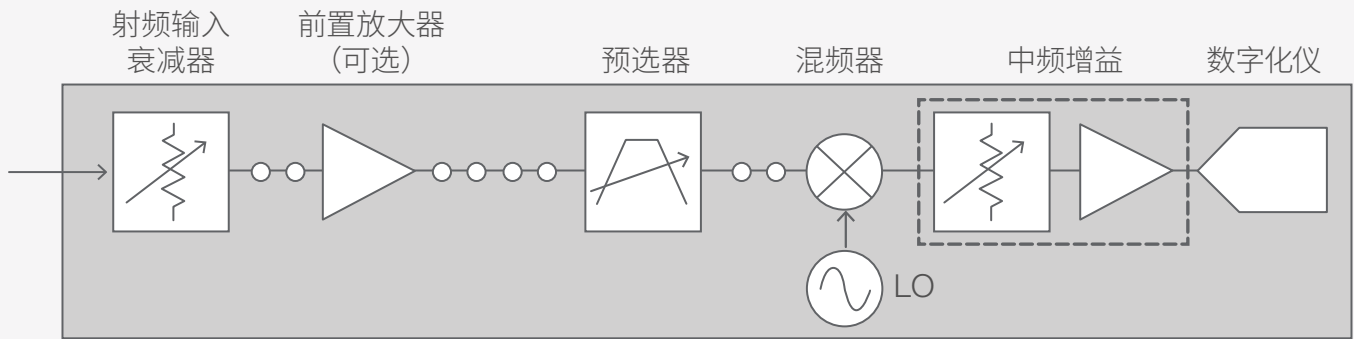


图 3. 信号分析仪的射频默认路径

微波预选器旁路——分析宽带矢量信号

射频预选器的带宽限制在 45 至 70 MHz 之间，具体取决于在进行无镜像分析时使用的调谐频率。但是，该带宽也给射频分析带宽造成了限制。绕过预选器有助于进行宽带分析，并且在数字化仪的带宽上具有平坦的频谱响应，如图 4 所示。此外，它还能提高幅度精度，而不受预选器幅度漂移和通带纹波的影响。您可以采取绕过微波预选器的方式来测量 5G、卫星通信、802.11ax/be 和雷达信号等宽带信号。

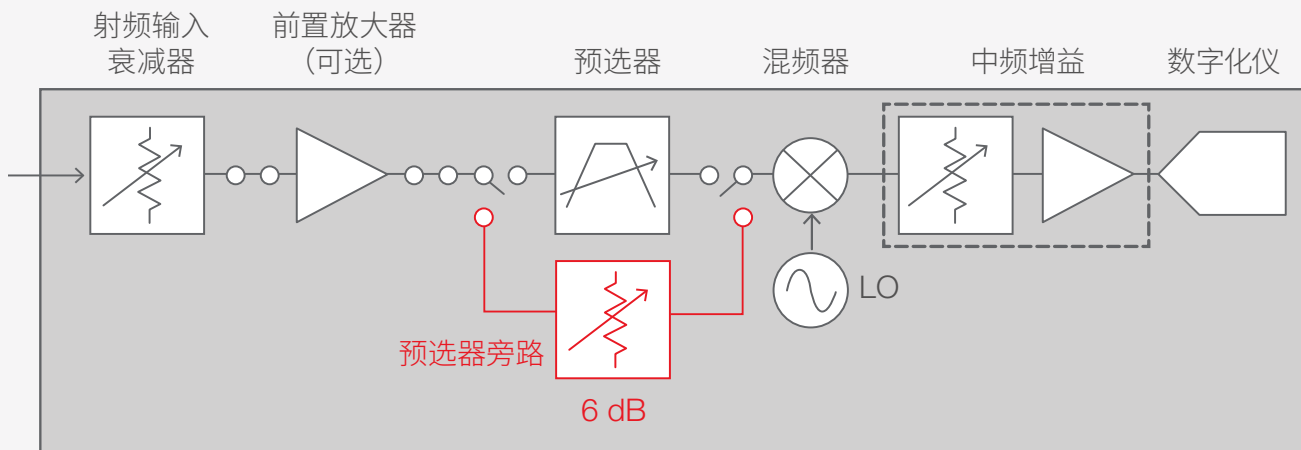


图 4. 微波预选器的旁路路径

当输入信号包含很强带外信号时，例如测试有本地振荡器 (LO) 泄漏或杂散的混频器时，这些信号会造成分析带宽中出现镜像和带内干扰。镜像可能会导致测量失败。在信号分析仪的输入端加上一个带通滤波器，可以避免产生这些多余的信号。

低噪声路径——改善调制分析

在信号功率较大的情况下测试发射机调制质量（例如 EVM 测量）时，您可以选择一条低噪声路径，绕过前置放大器路径上的有损开关和前置放大器，如图 5 所示。信号频率越高，放大器的增益、频率响应和插入损耗会变得越差。这个最优路径可以降低路径损耗，避免前置放大器和开关引起的频率响应和噪声。这个过程可以提高信号保真度和测量灵敏度，让高频下的宽带 EVM 测量得出最佳结果。

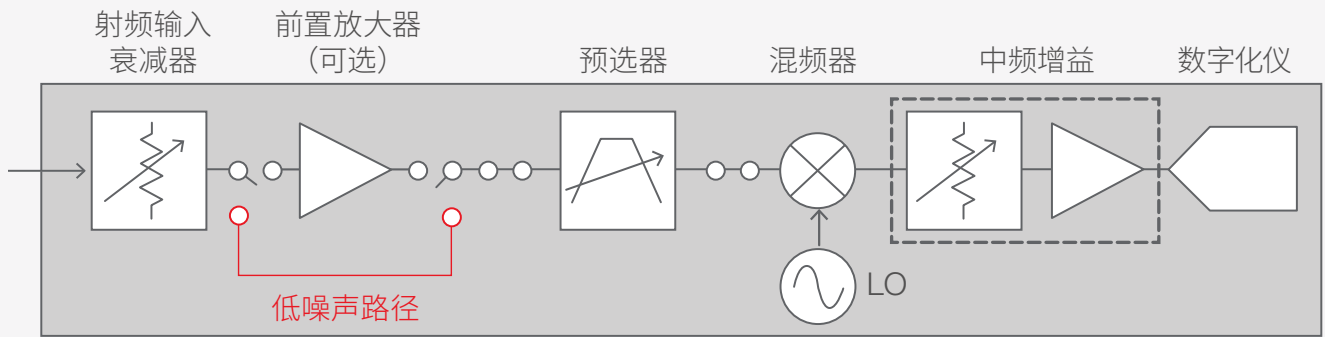


图 5. 低噪声路径绕过了前置放大器路径上的有损开关

对于 OTA 测试等信号功率较小的测试，您仍然需要使用内部或外部前置放大器来实现足够的 SNR，以便进行调制分析。

全旁路路径——测试宽带调制分析

图 6 显示了结合使用低噪声路径与微波预选器旁路路径的全旁路路径。这个射频路径能够避免在低频段切换电路中使用多个切换开关，并且绕过了微波预选器。在毫米波频率下，全旁路路径的损耗比默认路径最多小 10 dB。

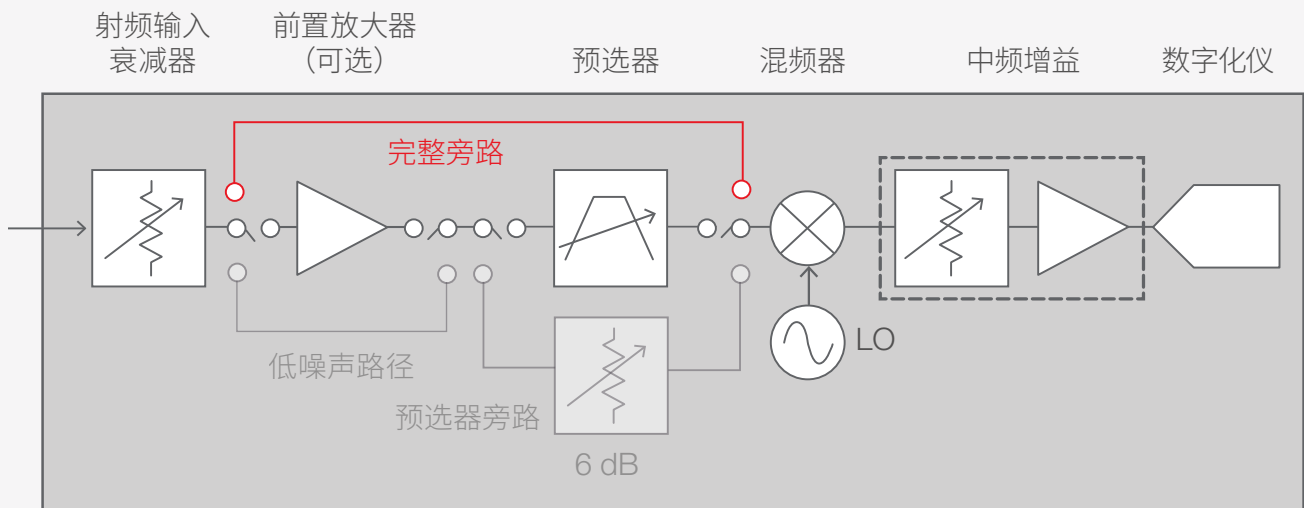


图 6. 全旁路路径绕过前置放大器和预选器

全旁路具有路径损耗低、信号保真度和测量灵敏度高的优点。但是，它也有一些缺点，譬如在测试小功率信号时会产生带内镜像信号且 SNR 较低。通过添加一个带通滤波器，可以消除相关频段中的镜像信号，从而让 EVM 结果得到 1 到 2 dB 的改善。此外，在测试小功率信号时，添加外部前置放大器可以改善 SNR。

外部混频——扩展频率范围和测量端面

构建毫米波测试系统时，信号分析仪和被测器件之间路径上的电缆和附件会增加插入损耗。电缆损耗最高可达 5 dB，可能导致测试系统的 SNR 下降。添加外部混频器能够以较低的成本有效地扩展信号分析仪的频率范围。如此一来，您可以将混频器转移到被测器件附近，缩短毫米波信号路由，从而降低路径损耗并改善 SNR。

分析仪向外部混频器提供微波本振信号，并从混频器接收中频 (IF) 信号。分析仪还可以像处理内部混频信号一样，对 IF 信号进行滤波、数字化转换、分析和显示。Keysight **USB 智能混频器** 可以简化连接和测量设置。分析仪能够检测到该混频器，并自动下载变频系数，监测驱动电平。图 7 显示了包含外部混频器的信号分析仪扩频解决方案。



如需详细了解如何减少信号路径损耗，获得更好的 SNR，请下载应用指南《X 系列信号分析仪的全旁路路径》。



图 7. 使用智能混频器将第一个混频阶段转移到分析仪之外

对于生产测试而言，毫米波测试系统的集成和测试成本对研发转至量产时造成很大的障碍。分频段解决方案是量产测试通常采用的方法。例如，在 5G 频率范围 1 (FR1) 带内射频测试例中，射频矢量信号分析仪 (VSA) 和射频矢量信号发生器 (VSG) 是必不可少。这些射频 VSA 和 VSG 可以作为 IF 信号分析仪和信号发生器，与外部毫米波收发信机相结合，进行 FR2 的带内测试，如图 8 所示。与使用高性能微波信号分析仪和信号发生器相比，这种方式的成本更低。



图 8. Keysight S9130A 5G 高性能多频段矢量收发信机的测试范围涵盖 5G FR1 和 FR2

外部混频为毫米波信号分析提供了一种经济高效的解决方案，同时将测试端口转移到了被测器件附近。然而，混频器前端没有预选器。带外信号较强的话，可能会导致相关频段中出现多余的镜像信号，测量精度下降。在测量超出混频器频段的频率时（例如，Keysight M1970W 的频率范围是 75 至 110 GHz），您需要将测试信号重新连接到信号分析仪的射频输入端口或具有不同频段的另一个混频器。然后，您需要在操作界面上对输入源做相应的变更。这些步骤会让测试变得更复杂，测量不确定度增加。

Keysight V3050A 外部扩频器将预选器和射频开关整合到一个高动态范围混频器中，该混频器可以与信号分析仪无缝连接，如图 9 (中) 所示。该解决方案可实现从 2 Hz 到 110 GHz 不分频段且经过预选的扫频功率测量谱，您无需处理频段中断和镜像的影响。矢量模式下的中频带宽最高可达 11 GHz。您还可以借助 Keysight U9361 RCal 接收机校准仪消除最高 110 GHz 测量系统中的幅度和相位误差，从而获得尽可能准确的测量结果，查看待测件的真实性能，如图 9 (右) 所示。系统校准将在稍后介绍。



图 9. Keysight V3050A 扩频器 (中) 和 U9361 RCal 接收机校准仪 (右) 实现创新的毫米波测试和测量

改善信号条件

更高数据速率应用面临的需求飞速增长，因此需要能够在较高频率下提供大信号带宽的技术。然而，带宽越大，汇集的噪声就越多。毫米波频率下仪器与被测器件之间的宽带噪声以及过大的路径损耗会导致数字化仪的 SNR 降低。低 SNR 使得发射机测量的 EVM 和邻道功率比性能下降，无法表征被测器件的性能。

图 10 是 VSA 的简化方框图。在进行 EVM 测量时，您需要设置信号分析仪输入混频器的最佳电平，并配置好本振的相位噪声和数字化仪，才能获得最佳的测量结果。这些元器件均有其各自的限制和使用场景。

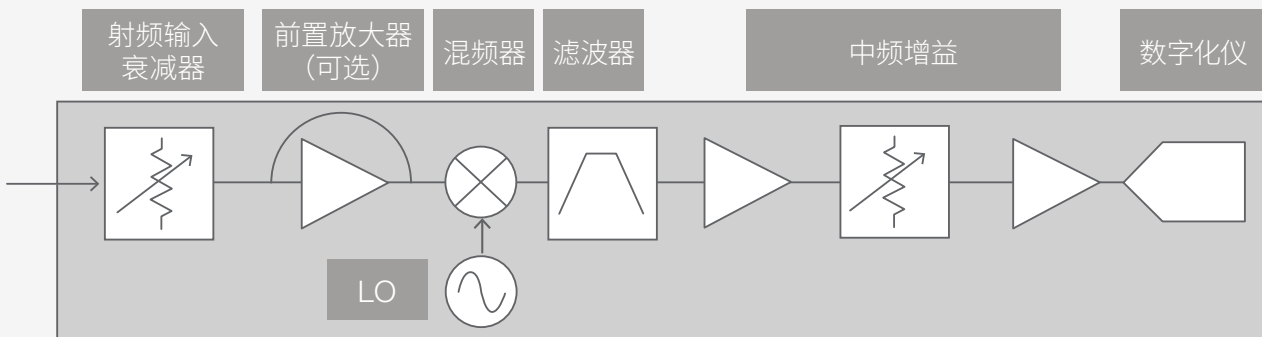


图 10. 信号分析仪框图

优化输入混频器电平

所有无线标准都规定了在最大输出功率下的发射机测量。您可以衰减信号分析仪中第一级混频器的功率电平，以确保大功率输入信号不会导致信号分析仪失真。在 OTA 测试以及测试系统有较大插入损耗等场景中，输入信号电平可能会比最佳混频器电平低一些。内置的前置放大器可提供更好的噪声系数，但互调失真至本底噪声动态范围较小。您可以在低输入电平测试场景中打开这一设置。

设置输入混频器电平时，需要在失真性能与噪声灵敏度进行权衡。在较高的输入混频器电平下，信噪比较高；而在较低的输入混频器电平下，失真性能较好。设置混频器电平时，最好要综合考虑测量硬件、输入信号的特性以及规范测试要求。

您还可以在前端使用外部低噪声放大器 (LNA) (无论是否有内部前置放大器)，从而优化混频器的输入电平。是德科技的新型信号分析仪针对各种测试场景提供了内置的 LNA 和前置放大器，如图 11 所示。这两级增益为平衡噪声和失真提供了更大的灵活性，从而可以优化低输入电平测量的性能。

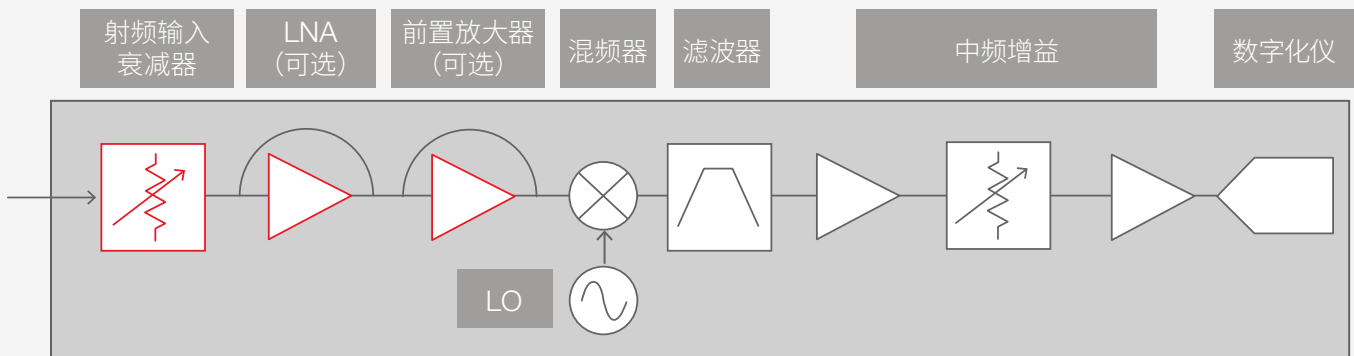


图 11. 内置 LNA 可以降低噪声，而两级增益为平衡噪声和失真提供了更大的灵活性

优化中频数字化仪的 SNR

信号分析仪的系统中频 (IF) 噪声必须要足够低，才能获得最佳的 EVM 测量结果。而另一方面，数字化仪的输入信号必须要足够强，且不得导致数字化仪过载。因此，我们需要根据测得的信号峰值电平对射频衰减器、前置放大器和中频增益值进行综合设置。

如果使用新款信号分析仪，您可以一键优化这些硬件设置，进而改善 SNR 并避免数字化仪过载，如图 12 所示。优化过程需要测量信号峰值电平并设置分析仪。但是，测得的周期可能无法体现输入信号的完整功率特性。用户可以手动微调中频增益和射频衰减器等设置，以便获得最佳的测量结果。

如需了解精确实施和优化 EVM 测量的优秀经验，请下载白皮书《优化宽带信号 EVM 测量的三个优秀经验》。

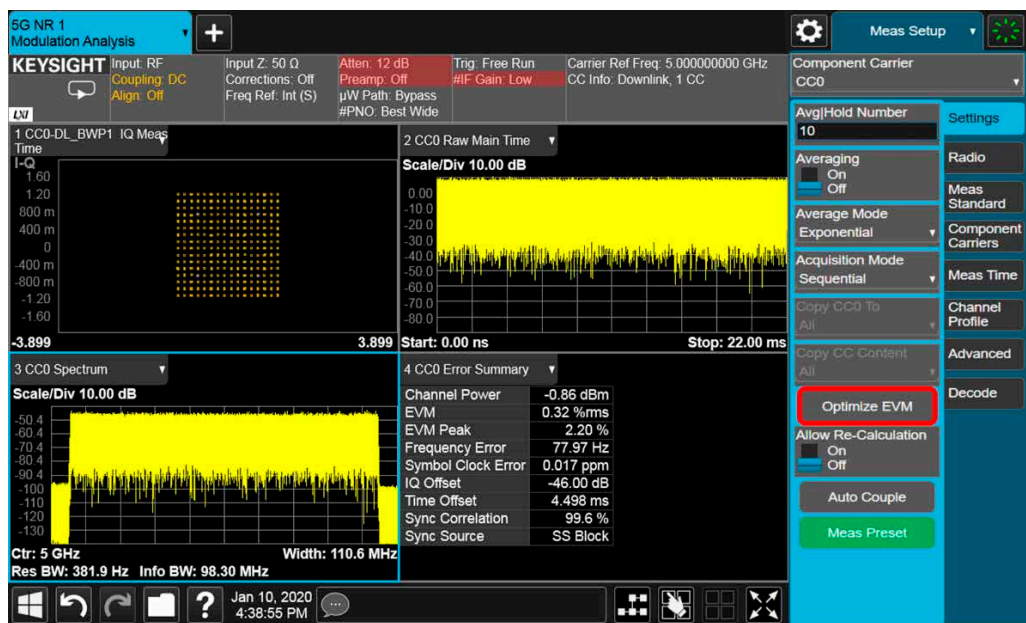


图 12. 优化 EVM 测量，改善 5G NR 调制分析

将参考端面转移至被测器件

仪器的技术指标决定了测试设备或信号分析仪的精度。信号分析仪的技术指标在仪器的输入或输出连接器之前一直有效，仪器将参考面设置在连接器处。在测试仪器外部，您需要考虑测试仪器与被测器件之间路径上元器件的影响。这种影响可能会降低系统的整体测量精度。

随着带宽变得更大，以及通信频率飙升至毫米波甚至更高频段，宽带测量中的误差容限变得越来越大，因此射频工程师必须寻求新的方法来减少频率响应误差。响应会出现在各个频率上，给相位和幅度响应造成影响。信号分析仪提供内部校准例程，用于校正其频率响应。

在信号分析仪和被测器件之间的路径上连接电缆、连接器、开关和夹具时，这些元器件带来的频率响应误差可能会导致测量精度下降。您必须将测量精度考量从信号分析仪的输入端口（参考面）扩展到被测器件的测试端口（测量面），如图 13 所示。信号分析仪允许您配置幅度校正和复合校正（幅度和相位）来消除频率响应。通过校正测试网络中的幅度和相位误差，您将能够获得更准确的测量结果，了解器件的真实性能。

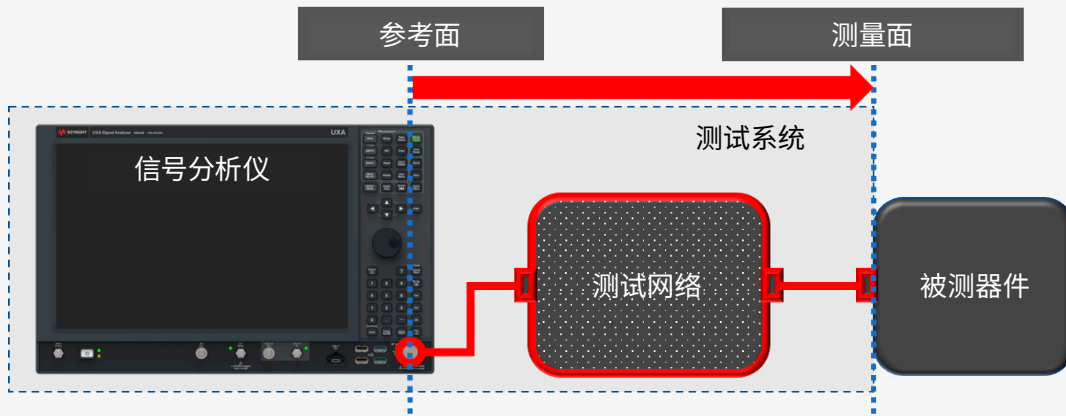


图 13. 在进行通道校正时需要考虑测试网络各元件的影响

使用信号发生器和功率传感器进行幅度校正

借助信号分析仪，您可以配置幅度校正和复合校正（幅度和相位校正），从而校正频率响应。在进行幅度校正时，您可以使用信号发生器、功率计和传感器来测量测试网络的幅度频率响应，然后将校正值输入信号分析仪。

使用矢量网络分析仪进行复合校正

在进行复合校正时，您可以使用矢量网络分析仪对测试网络进行频率响应测量，并将测量结果保存为 .s2p 格式。Keysight X 系列信号分析仪允许您加载 .s2p 文件并校正幅度和相位频率响应。

使用梳状信号发生器进行复合校正

还有一种校准方法是使用梳状信号发生器。梳状信号发生器是一种通用的接收机系统校准仪，可以轻松注入到所需的校准面（测试网络的输入）。它能够生成幅度和相位已知的连续波 (CW) 音频信号，如图 14 所示。信号分析仪会在测试网络的输出端测量每个音频信号的幅度和相位，并将其与已知的幅度和相位进行比较。图 15 显示了测试网络幅度和相位的通道响应。

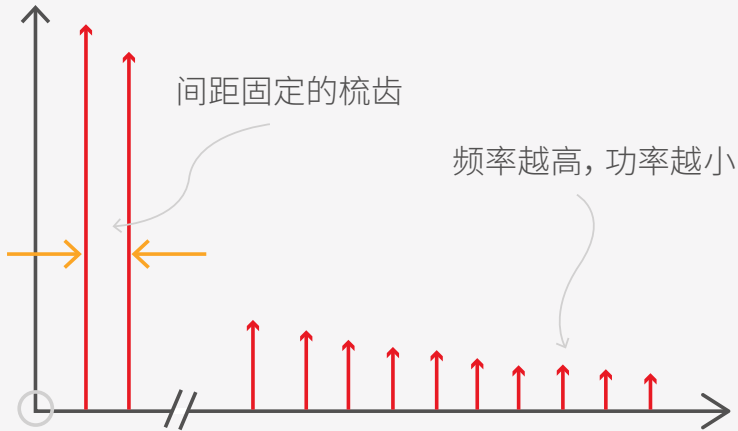


图 14. 梳状信号发生器生成幅度和相位已知的连续波音频信号

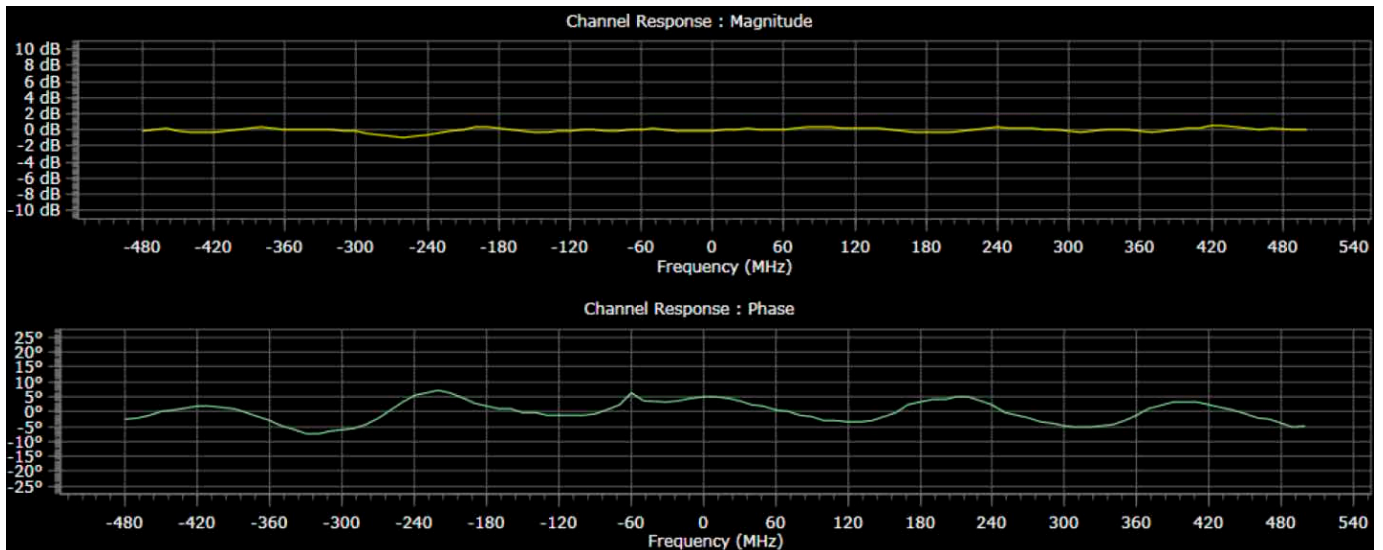


图 15. 测得的测试网络频率响应

使用 RCal 接收机校准仪

U9361 RCal 接收机校准仪使您可以将参考端面转移至被测器件，从而提高测试接收机系统的校准精度、效率和价值。不同于梳状信号发生器在较高频率下音频信号间隔固定且功率较小，RCal 的中心频率可以更改，并且梳齿间隔可以调节，如图 16 所示。因此它适合用于在较高频率下测试较大带宽。

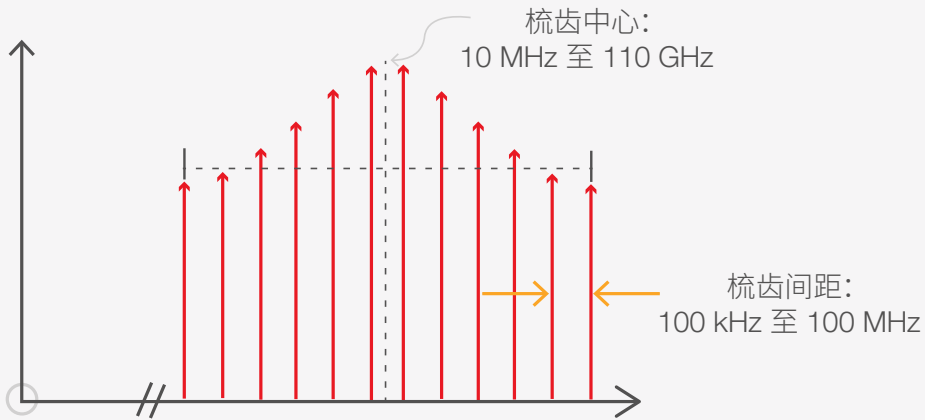


图 16. RCal 接收机校准仪生成中心频率和间隔可调的音频信号

RCal 外型小巧，通过 USB 接口上电和控制。因此在使用 RCal 时，为了不影响测试系统的效率，它会通过即插即用的 USB 接口自动将数据从存储器传输到信号分析仪，如图 17 所示。分析仪还会自动检测校准仪的型号、序列号和选件。这种设置可以减少对测试接收机系统进行校准时的工作量和复杂程度。



图 17. 配备了 RCal 的信号分析仪。RCal 只有手掌大小，并通过 USB 接口上电和控制

您只需使用 RCal 这样一个部件，即可校正绝对功率精度、幅度平坦度和相位平坦度。使用 RCal 即无需使用多台设备来校准信号分析仪测量系统。

如需了解如何提高信号分析仪的测试精度，请下载应用指南《接收机校准基础指南》。

推进毫米波测量发展

5G、卫星和车载雷达等新一代无线通信系统需要更高的频率、更大的带宽和更复杂的调制方案。您面临着一系列新的挑战，包括测试越来越复杂、测量不确定度增加、路径损耗和噪声过大，这些都会影响待测件的性能。

是德科技的测试解决方案能够提供更好的可视性、精度和可重复性，帮助您信心十足地确定器件的性能，从而可以集中精力开发下一个创新产品。

如欲了解更多信息，请访问：www.keysight.com

如欲获得是德科技的产品、应用和服务信息，请与是德科技联系。

如需完整的联系方式，请访问：www.keysight.com/find/contactus

