

# 是德科技携手 Skyworks Solutions 将 5G 超宽带毫米波测试台应用于功率放大器 数字预失真

## 白皮书

### 致谢:

本白皮书所展示的工作是是德科技与 Skyworks Solutions, Inc. 携手合作的成果。是德科技谨向为此做出贡献的以下人士致谢:

### Skyworks Solutions:

Stephen J. Kovacic 博士, 先进技术小组总监 Foad Arfarei

Maleksadeh 博士, 先进技术小组高级设计师

Hassan Sarbishaei 博士, 多样化模拟解决方案小组高级设计师

### 是德科技:

Greg Jue, 5G 系统工程师

Michael Millhaem, 5G 系统架构师

Jin-Biao Xu, 应用工程师

Michel Gagne, 高级无线应用专家

Jean-Marc Moreau, 解决方案架构师

## 引言

尽管第四代 (4G) 蜂窝系统 (LTE 和 LTE-Advanced) 仍在部署当中, 不过对第五代或 5G 系统的研究和积极开发已经开始。5G 移动网络呈现出“随时随地万物互联”的愿景。

5G 系统的关键属性可能包括高度集成的密集网络, 这种网络由小信元组成, 信元支持 10Gbps 量级的数据速率, 往返时延为 1 ms 或更低。在大多数研究中, 研究人员假定多个空中接口在微波或毫米波频率下工作, 即新无线 (NR)。5G/NR 有三种基本用例: 增强型移动宽带 (eMBB)、海量机器类通信 (mMTC) 和超可靠低时延通信 (URLLC)。然而, 在 3GPP 的 TR 22.891 中, 还定义了 74 个基本用例, 其中许多用例直接或间接来自下一代移动网络 (NGMN)。

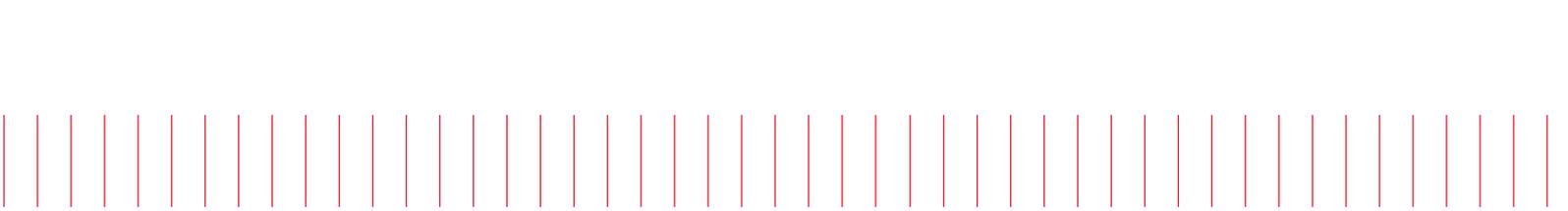
要实现这一愿景, 我们需要在技术、商业模式和政策层面共同演进和变革。例如, 在政策方面, 美国联邦通信委员会 (FCC) 最近宣布了一系列新规则, 以支持下一代 5G 技术和服务的快速开发和部署 [1]。这些规则在 28 GHz、37 GHz 和 39 GHz 频段上打造了新的微波柔性应用服务, 并在 64-71 GHz 创建了新的公共频段。这一新频段与现有的 57-64 GHz 公共频段一起, 将公共频谱的扫宽扩展到了 14 GHz (57-71 GHz)。

5G 应用需要使用宽带数字调制获得高数据吞吐量, 公共频谱的扩展为其创造了新的机会; 然而, 为了从这一公共频谱内的高频率带宽中受益 (如 5 GHz 的占用带宽), 我们需要新技术来实现最高的系统性能。

测试这些新设计需要测量技术的进步。举例来说, 当今的矢量信号发生器可提供高达 2 GHz 的调制带宽。我们需要采用不同的方式来生成信号, 以满足新频谱分配所允许的宽带要求。

数字预失真 (DPD) 是在 3G 和 4G 中引入的一种技术, 它通过修改输入信号, 让 AM/AM 和 AM/PM 转换在功率放大器 (PA) 工作在峰值信号电平上时发生, 从而使放大器得以在更高效率的工作点运行。通过测量放大器的 AM/AM 和 AM/PM 转换, 可以将这些函数的倒数应用于输入波形, 在放大器输出端产生理想的波形。

相比之下, AM/AM 和 AM/PM 图仅给出了对功率放大器特性的初步分析。考虑存储器效应同样也很重要。常用于功率放大器设计和仿真的电路模型不能预测存储器效应, 而处理这个问题的唯一实用方法是对功率放大器进行测试, 并捕获通过功率放大器之后的时域调制信号 [2]。



成熟的技术通常需要以三到五倍的信号带宽生成输入信号并进行测量。可用于测试 4G 功率放大器的测试设备可以轻松处理这样的采样率，甚至包括最宽的 20 MHz LTE 信号。对于带宽高达 2 GHz 的 5G 和 802.11ad 信号，用于 4G 的技术超出了当前可用的大多数矢量信号发生器和矢量信号分析仪的能力。

本白皮书探讨的是一种新的宽带毫米波测试台方法，使用数字技术和紧凑的毫米波变频器来生成带宽非常高的毫米波测试信号 (> 2 GHz 至 8 GHz) 并对其进行分析。虽然这种方法能为某些需要非常高带宽的应用提供足够的功能，但它并不能替代传统的矢量信号发生器和矢量信号分析仪。

测试台将用于生成和分析具有高达 8 GHz 占用带宽的 V 波段 (50-75 GHz) 和 E 波段 (60-90 GHz) 测试信号。然后，测试台解决方案软件将在 V 波段中运行的 Skyworks 功率放大器上执行数字预失真。邻道功率 (ACP) 和误差矢量幅度 (EVM) 的改进采用测试台中仿真的预失真算法展示。对于这一数字预失真应用，采用的是 7.5 GHz 的信号生成和分析带宽，具体而言就是功率放大器数字预失真采用的 QPSK 和 64QAM 波形的 1.5 GHz 符号速率 x 5。

## 对 V 波段和 E 波段的超高宽带信号应用新的测试台方法

生成高频宽带信号的传统方法通常涉及模拟 I 波形和 Q 波形的生成，将这些波形调制到中频 (IF) 或射频 (RF) 载波上，然后使用外部上变频器将频率转换为毫米波。

在进行信号分析时，通常使用外部毫米波下变频器将输入信号下移到中频或射频，以便使用射频信号分析仪或数字示波器进行表征。虽然这种方法可以相对较好地用于宽度适中的调制带宽（如 2 GHz），但对于非常宽的调制带宽（如 > 2GHz）而言可能有点麻烦，因为诸如 I/Q 增益失衡以及振幅或相位相对于频率的变化会带来损害。

图 1 所示宽带毫米波测试台设计用于处理毫米波频率非常高的带宽。该测试台使用高性能数字技术进行宽带中频信号生成和中频信号分析，以克服模拟射频的缺点。

它还使用了一组来自 Virginia Diodes, Inc. (VDI) 的紧凑型上变频器和下变频器。这些使得中频输入能直接从任意波形发生器 (AWG) 驱动，并直接用数字示波器进行分析。紧凑型 VDI 上变频器和下变频器对本地振荡器 (LO) 频率采用有效的 2x 倍频系数，为上变频信号带来改进的信噪比 (S/N) 和显著降低的转换损耗，相对而言，传统系统中采用的是 6x 倍频系数。此外，2x 倍频系数支持高品质本振源的使用，确保在较高频率下的低相位噪声。



S 系列  
8 GHz Infiniium 示波器

M8195A  
65 GSa/s 任意波形发生器

N5183B MXG 信号发生器

注：此处所示 E 波段变频器也可以使用 V 波段变频器

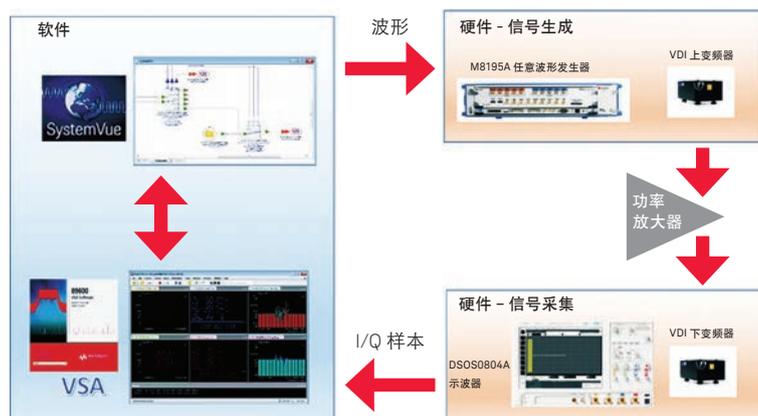


图 1. 建议的测试台包括各种功能强大的硬件和软件元素。

测试台的元素可满足几个关键功能：

- 多通道 8 位 Keysight M8195A 65 GSa/s 任意波形发生器用于生成宽带调制中频信号。
- 多通道 Keysight Infiniium S 系列 DSOS804A 高清示波器 (8 GHz, 20 GSa/s, 10 位分辨率) 用于使用 Keysight 89600 矢量信号分析仪软件对宽带中频信号进行数字化和分析。也可以使用带宽更高的示波器。
- VDI E 波段紧凑型上变频器 (N9029ACST-U12) 和下变频器 (N9029CST-D12) 都可以直接由任意波形发生器驱动, 并直接连接到高清示波器。也可以使用紧凑型 VDI V 波段变频器。
- 紧凑型 Keysight N5183B MXG X 系列微波模拟信号发生器用于给紧凑型 VDI 变频器提供高品质本振信号。
- 89600 矢量信号分析仪软件为 5G 候选波形提供先进的解调和分析。
- Keysight SystemVue 软件支持波形创建以及数字预失真数据的处理和提取。

下面将对这种测试方法相对于传统方法的一些关键考量展开探讨。

## 宽带信号生成

通常，有两种不同的方法可以生成超出任意波形发生器模拟带宽的宽带信号：模拟 I/Q 调制和数字上变频。图 2 所示为这两种方案的简化框图，每种方法都有其优缺点，具体探讨如下。

### 模拟 I/Q 调制与数字 I/Q 上变频

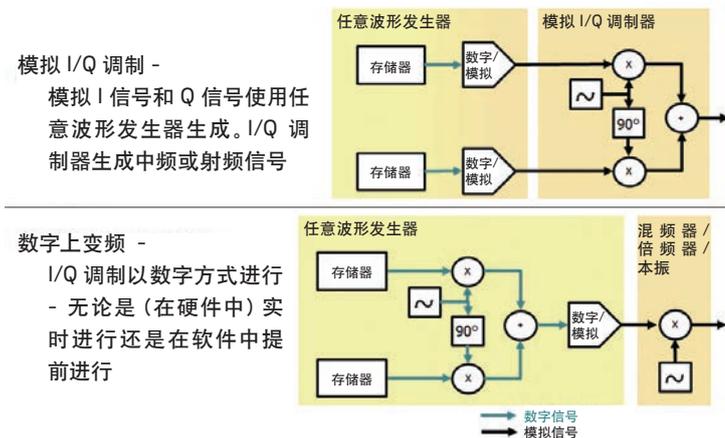


图 2. 这两种方法都采用任意波形发生器来生成宽带信号。

请注意两个图中的蓝色和黑色箭头：蓝色对应数学公式或数字信号，而黑色箭头则表示实际的模拟信号和电压。

上图所示为模拟 I/Q 调制。在这种情况下，任意波形发生器生成 I 信号和 Q 信号，信号馈送到通常内置于矢量信号发生器的 I/Q 调制器中。这种方法的一个优势在于，任意波形发生器输出端所需的模拟带宽仅为输出端射频信号中可以实现的调制带宽的一半。因此，使用 500 MHz 任意波形发生器时，此方法可以生成具有 1 GHz 调制带宽的信号。但在另一方面，模拟 I/Q 调制器会生成不需要的失真分量（如图像和载波馈通），这些分量只能部分偏置。此外，相对于频率的 I/Q 增益失衡可能会成为 EVM 误差的主要来源，特别是增加调制带宽时。

在数字上变频（图 2 的下部）中，I/Q 调制作为数学运算进行，既可以由数字信号处理器实时进行，也可以在软件中提前进行。该计算的结果被馈送到数模变频器（DAC）中，并使用混频器上变频。使用这种方法时，由于信号和本振具有较高的频率分离，因此图像和本振馈通可以被滤波或抑制。因为这种技术采用数字或软件 I/Q 调制，所以与模拟 I/Q 上变频相比，I/Q 增益失衡并不会成为问题。任意波形发生器的调制中评输出可以使用外部上变频器直接转换为毫米波频率，无需使用模拟 I/Q 上变频器。它的缺点在于，这种改进的高频信号生成技术需要更高的任意波形发生器带宽。

有一种类型的损害会对这两种方法都造成影响：对应频率产生的非理想振幅和相位变化。这些变化会沿着从任意波形发生器到变频器射频输出以及从变频器的射频输入到数字化示波器的信号路径发生。变化的来源包括 I/Q 调制器，变频器混频器或倍频器级，各种通带滤波器或放大器的变化，以及示波器输入通道的平坦度。

这些频率响应误差中的大多数都为线性，并且可以使用矢量信号分析仪软件中的可用自适应均衡器来加以表征。一旦均衡之后，来自自适应均衡器的频率响应就可以用于预先校正波形，以补偿信号路径的线性频率响应（图 3）。

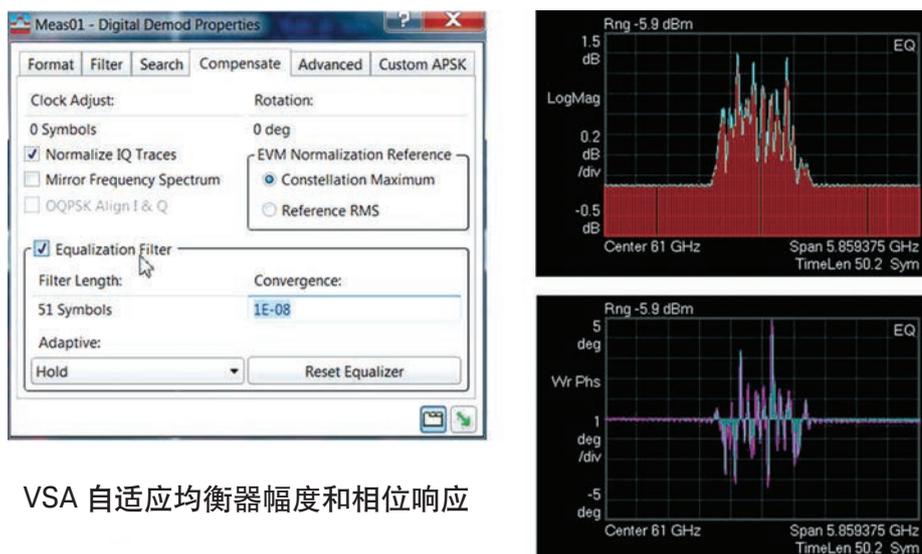


图 3. 在本例中，自适应均衡器用于表征 61 GHz 中心频率处信号路径的频率响应。

在此测试台中，M8195A 任意波形发生器用于提供具有数字上变频的宽带中频调制信号。M8195A 任意波形发生器提供高达 65 GSa/s 的采样率及高达 25 GHz 的模拟带宽。一个 AXIe 卡最多可同时使用四个通道，一个机箱最多可容纳四个卡。扩展存储器选件提供总共 16 GB 的波形存储器，最大访问速率为 65 GSa/s。如果使用超过一个通道，每个通道的数据速率会下降。数模变频器仍然以全数据速率运行，并且每个通道中的 FIR 滤波器用于内插数据（数据范围为数模变频器速率除以 4 或除以 2 到数模变频器速率）。

使用任意波形发生器作为信号源有一个方面的权衡，因为它缺少传统射频信号发生器的信号调节和功率控制功能。如果使用 M8195A 任意波形发生器，八位垂直分辨率则是另一个方面的权衡。幸运的是，M8195A 具有非常低的 EVM，即使对 4 GHz 中频频率下带宽高达 5 GHz 的信号也是如此。表 1 所示为单载波 16QAM 信号的测量结果以及从 2 GHz 到 4 GHz 的相关符号速率 (SR)。占用带宽 (OBW) 使用  $\alpha$  值为 0.35 的根升余弦 (RRC) 滤波器来计算 (如 3.7 GHz SR \* 1.35 = ~5 GHz 的 OBW)。EVM 测量使用 S 系列高清示波器和 89600 VSA 软件进行。

表 1. M8195A 任意波形发生器在各种符号速率上都能提供良好的 EVM 性能。

	2 GHz SR (~2.7 GHz 占用带宽)	3 GHz SR (~4 GHz 占用带宽)	3.7 GHz SR (~5 GHz 占用带宽)	4 GHz SR (~5.4 GHz 占用带宽)
M8195A 4 GHz 中频 EVM (%)	1.1%	1.3%	1.4%	1.5%

注：EVM 结果使用最大星座图作为 EVM 归一化参考，对所有 EVM 结果启用均衡。

虽然 M8195A 具有八位垂直分辨率，高达 65 GSa/s 的最大采样率仍会在低中频频率下提供过采样处理增益，产生低 EVM 结果。即便如此，EVM 可以随着峰值平均功率比 (PAPR) 而变化，对于多载波和 OFDM 波形可能不同。

## 毫米波调制信号的上/下变频

本测试台旨在采用 VDI 的新紧凑型毫米波上变频器和下变频器。在上变频器中，中频驱动电平与 M8195A 任意波形发生器的输出电压兼容，实现直接连接。由于下变频器中频输出采用中频增益级进行调节，因此可以使用 S 系列高清示波器直接进行分析。要使用 VDI 变频器在 V 波段和 E 波段中产生信号，需要的本振频率为 30-40 GHz。这样的频率可以使用是德科技的 PSG、MXG 或 EXG 信号发生器生成。

与可重新配置的上一代 VDI 变频器 (N9029V12) 不同，此处使用的紧凑型 VDI 上变频器和下变频器是单一功能设备。但是，在 Skyworks 功率放大器数字预失真应用和其它需要将变频器放置在探头前端附近的应用中，它们小巧的尺寸大有裨益。

紧凑型变频器的另一个主要优势在于本振采用 2x 倍频系数，这样就能使用高品质本振源（如 MXG）来确保高频下的低相位噪声。残余本振相位噪声是两种基本噪声机制（加性噪声和乘性噪声）的和（图 4）。

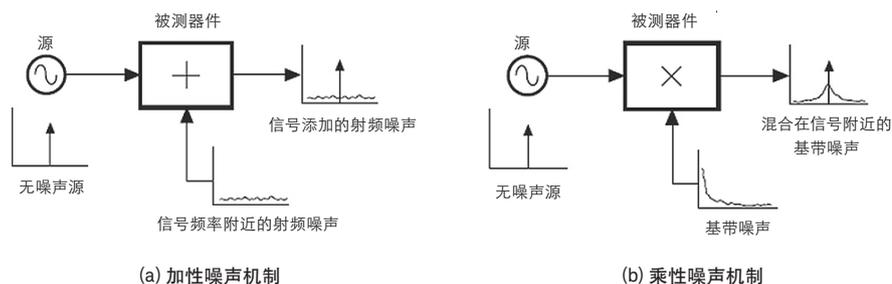


图 4. 在测试配置中，加性和乘性噪声来自被测器件。

加性噪声是由处于信号频率或接近信号频率的两端口设备产生的噪声，并且该噪声以线性方式添加到信号中。与之相反的是，乘性噪声通常源自两端口被测器件的非线性特性对输入信号产生的内在调制 [3]。

由于前面的变频器将输入本振乘以 6，乘性噪声增加了  $20 \cdot \log(6)$  即 15.6 dB。新变频器的有效倍频系数为 2，将乘性噪声降低至 6 dB ( $20 \cdot \log(2)$ )。VDI 本振路径中可能存在一些加性相位噪声，但是，在选择具有期望的相位噪声性能的信号发生器时，有效的 2x 倍频系数能提供更大的灵活性。例如，如果需要出色的相位噪声，那么可以使用带选件 UNY (增强型超低相位噪声性能) 的 Keysight E8267D PSG 矢量信号发生器来替代 N5183B MXG。

紧凑型 VDI 变频器可用于 V 波段 (WR15) 或 E 波段 (WR12)。E 波段变频器具有以下典型特性：

- 射频: 60-90 GHz, WR12 UG-387/U 法兰
- 本振: 30-45 GHz, 2.4 mm 同轴 (f) 法兰
- 本振功率: 需要 3-6 dBm
- 典型性能: Lmix: 典型值为 10 dB (SSB)

由于这些变频器以双边带模式工作，因此，通常推荐使用外部带通滤波器 (如 71-76 GHz 带通滤波器) 来衰减或去除不需要的信号图像。VDI 可以提供一部分这样的滤波器。

## 宽带信号分析

信号分析仪 (如 N9040B UXA) 具有高达 1 GHz 的集成分析带宽和高达 50 GHz 的频率范围。通常使用高性能数字示波器 (如 DSOS804A) 来分析带宽超过 1 GHz 的信号。

本测试台使用了 Infiniium S 系列高清示波器，因为它具有 8 GHz 的模拟带宽和 10 位垂直分辨率。V 波段和 E 波段 VDI 下变频器分别具有高达 9 GHz 和 12 GHz 的中频带宽，因此 8 GHz 带宽非常适合 4 GHz 或 5 GHz 的中频频率。更宽的带宽范围 (如 Keysight Infiniium Z 系列) 则可用于利用 VDI 下变频器的全中频带宽。

## 获取高达 110 GHz 频率范围的真实结果



新 N9041B UXA X 系列信号分析仪可提供更宽、更深的毫米波信号视图，具有 3 Hz 至 110 GHz 的连续频率覆盖范围。其显示的平均噪声电平 (DANL) 在 50 GHz 以上低至 -150 dBm，从而增强了毫米波段宽带调制信号的表征。最大分析带宽为 5 GHz，外部中频输出与 Keysight 示波器相连，完全集成的瞬时带宽为 1 GHz。

为了避免影响其他性能，N9041B UXA 提供了两种输入连接器。专用的 1.0 mm 输入连接器经过精密加工，符合精确的容限要求，可以确在高达 110 GHz 的频率范围内实施连续扫描和有效测量。坚固耐用且成本经济的 2.4 mm 输入连接器支持高达 50 GHz 的测量。

在毫米波频率应用中，您很可能会对测量挑战估计不足。我们为您提供全新的 N9041B UXA，帮助您在高达 110 GHz 的频率范围内获得真实的测量结果。

## 查看 73.5 GHz (E 波段) 的测量结果

宽带测试台用于生成和分析 73.5 GHz 的信号，具有变化的符号速率和高达 5 GHz 的占用带宽。图 5 所示为具有 3.7 GHz 符号速率的单载波 16 QAM 波形的测量结果。RRC 使用 0.35 的  $\alpha$  值，因此占用带宽约为 5GHz ( $3.7 \text{ GHz SR} * 1.35 = \sim 5 \text{ GHz}$  的占用带宽)。在蓝色迹线中，89600 矢量信号分析仪软件显示出占用带宽为 5 GHz。图 6 所示为 EVM 测量结果：在应用了自适应均衡时，测得的 EVM 值约为 2.15%。

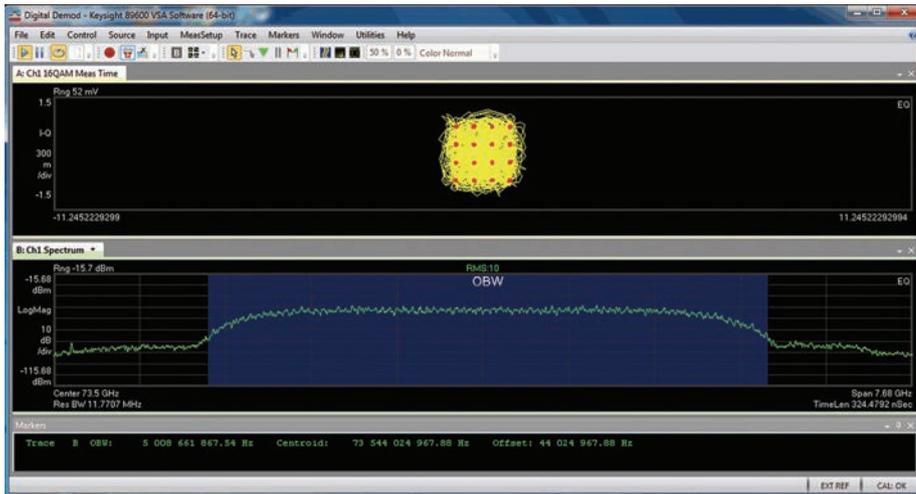


图 5. 使用此测试台时，89600 矢量信号分析仪软件在 73.5 GHz 下测得占用带宽为 5 GHz。

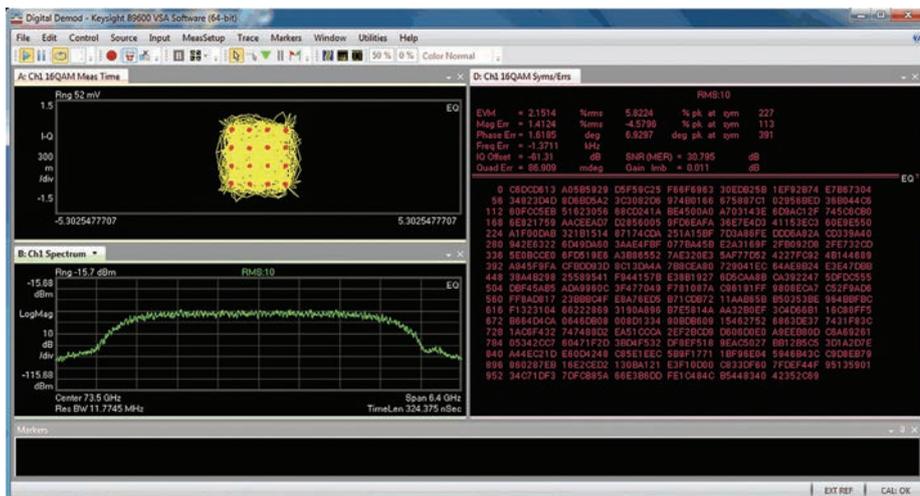


图 6. 同样使用此测试台时，89600 矢量信号分析仪软件在具有 3.7 GHz 符号速率的 16QAM 波形中测得的 EVM 约为 2.15%。

表 2 所示为从 M8195A 任意波形发生器的 4 GHz 中频上变频到 73.5 GHz, 以及从 73.5 GHz 下变频到 4 GHz 中频之后的单载波 16 QAM 波形的测量结果, 使用 S 系列示波器测得。第一行所示为使用 S 系列示波器和 VSA 软件在 M8195A 任意波形发生器输出端测得的 EVM 结果。这些值与表 1 中所示的值相同, 这里重复这些值, 以便与最后一行进行比较: 端到端 EVM 值是上变频到 73.5 GHz 以及从 73.5 GHz 下变频的结果。这些值是使用连接在 VDI 上变频器和下变频器之间的 71-76 GHz 波导带通滤波器获得的。可以看出, 对于基于数字的信号生成和分析方法而言, 残余 EVM 值相当低。

表 2. 使用基于数字的方法和波导带通滤波器, M8195A 再次生成良好的 EVM 值。

	2 GHz SR (~2.7 GHz 占用带宽)	3 GHz SR (~4 GHz 占用带宽)	3.7 GHz SR (~5 GHz 占用带宽)	4 GHz SR (~5.4 GHz 占用带宽)
M8195A 4 GHz 中频 EVM (%)	1.1%	1.3%	1.4%	1.5%
M8195A 4 GHz 中频 73.5 GHz EVM 端到端 (%)	1.5%	1.75%	2.1%	2.2%

注: EVM 结果使用最大星座图作为 EVM 归一化参考, 对所有 EVM 结果启用均衡, 使用带 BPF 的 71-76 GHz 波导滤波器连接发射机和接收机。

## 将测试台应用于功率放大器数字预失真

测试台用于毫米波数字预失真应用，并且测试要求需要以 2 GHz 的调制带宽对 60 GHz 上运行的放大器进行数字预失真。图 7 中的高级硬件框图所示为用于在 Skyworks 功率放大器上执行数字预失真的配置。

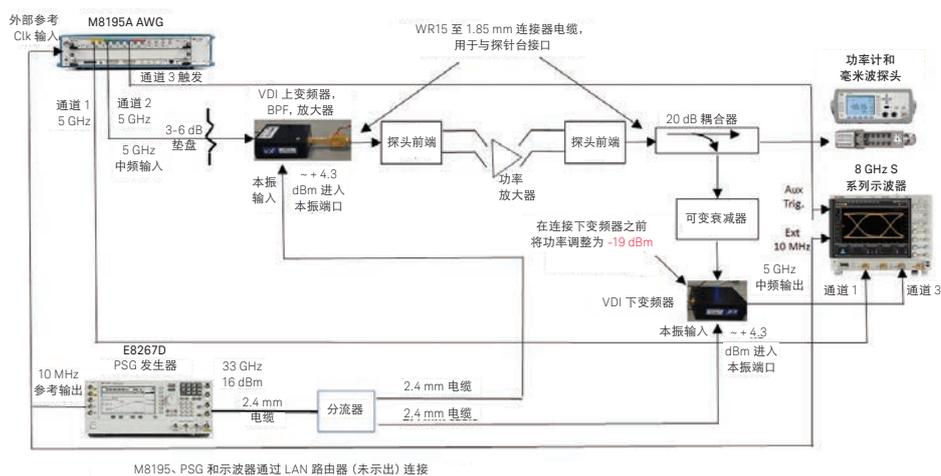


图 7. 此配置支持在毫米波功率放大器上进行基于数字预失真的测量。

有几个关键点和连接值得强调：

- 系统使用 M8195A 任意波形发生器的三个通道：
  - 通道 1 直接连接到 S 系列示波器的通道 1，在计算增益压缩和 AM 到 PM 转换时为 89600 矢量信号分析仪软件提供参考信号。
  - 通道 2 连接到 VDI 上变频器的中频输入，成为被测器件的射频输入。
  - 通道 3 连接到 S 系列示波器的辅助输入，提供触发信号。触发为数字预失真模型提取采集的 I/Q 数据，以便对输出 I/Q 数据和参考波形进行同步。
- 三个输入连接到 S 系列示波器：
  - 通道 1 和辅助输入连接到 M8195A 的通道 1 和 3，如上所述。
  - 通道 2 连接到 VDI 下变频器的中频输出，这是被测器件的输出信号。
- 上变频器和下变频器的本振信号由 44 GHz E8267D PSG 提供。功率分配器将本振提供给 VDI 紧凑型上变频器和下变频器。

功率计被用来定义探头前端的毫米波功率 vs 任意波形发生器电压电平的查找表。这是一个前提，它使射频驱动电平能够得以控制并改变为功率放大器被测器件。被测器件本身是具有 15 dB 功率增益和 16 dBm Psat 的功率放大器，在 5 dB 的压缩下发生。电缆和功率放大器之间的接口是 MPI 接地-信号-接地 (GSG) 探头，间距为 100 $\mu$ m。

在被测器件输出端使用了一个 20 dB 耦合器来监控输出功率。耦合器上的直通路径用于监测功率放大器的输出功率（直通路径插入损耗通过将功率偏置输入功率计来进行补偿）。由于功率放大器输出功率超出模块的最大输入功率，因此采用了 -20 dB 的耦合路径来进行衰减以及保护 VDI 紧凑型下变频器模块。WR-12 可变衰减器用于进一步调整进入 VDI 下变频器的射频功率。

图 8 所示为测试设置的总体照片，图 9 所示为两个特写。

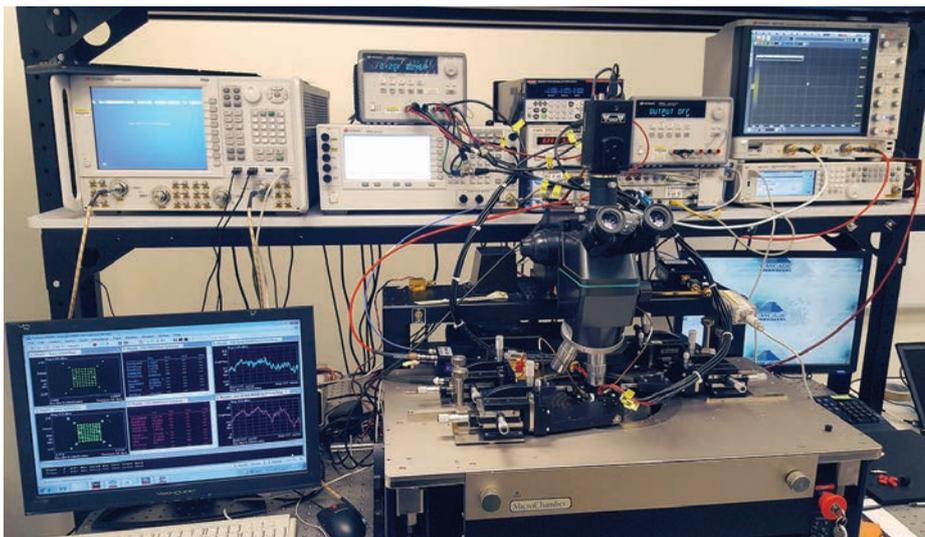


图 8. Skyworks 测试台设置的总体照片包括毫米波测试台以及其他仪器，如矢量网络分析仪和各种直流电源。

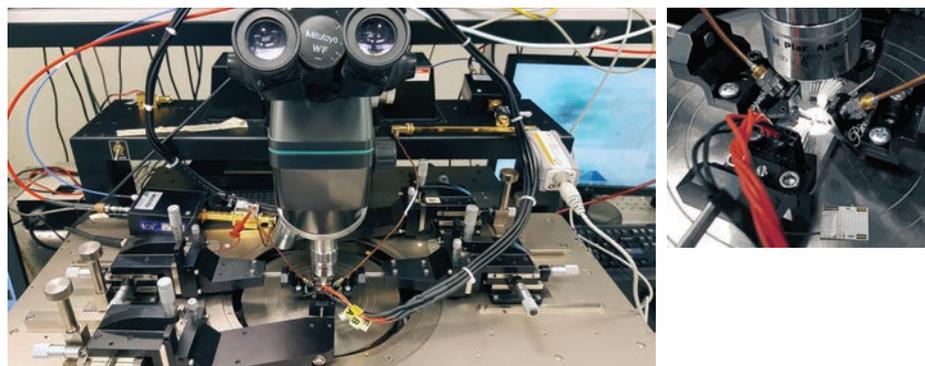


图 9. 这些测试设置的特写照片所示为探针台显微镜（左）和功率放大器本身（右）。

数字预失真测量系统的软件采用了 SystemVue 和 89600 矢量信号分析仪。SystemVue 用于生成测试波形，执行数字预失真模型提取，然后应用数字预失真模型生成预失真波形。矢量信号分析仪软件用于测量 EVM 和 ACPR，呈现 AM/AM 和 AM/PM 失真，并提取测得的 I/Q 数据，用于数字预失真模型提取。C# 程序用于协调软件应用及控制 M8195A 任意波形发生器和本振信号发生器。图 10 中的框图所示为软件结构。

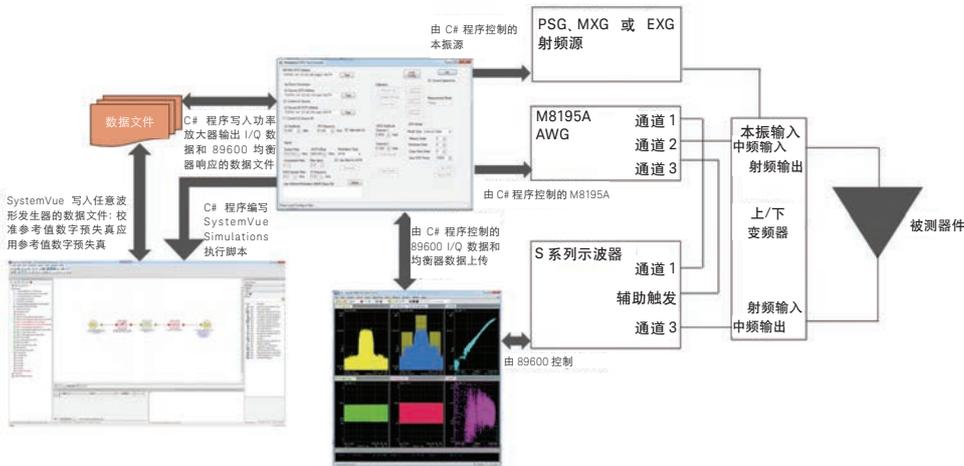


图 10. 系统使用现成和自定义编码软件的组合，如图所示一起工作。

这一过程的核心是以与用于数字预失真模型提取相同的采样率（如 7.5 GHz 或 5 倍的 1.5 GHz 符号速率）生成参考波形。将校准数据应用于该波形，并进一步上采样至 M8195A 任意波形发生器的 ~64 GHz 采样率。

C# 程序在软件中执行 I/Q 调制，并将中频波形下载到任意波形发生器中。89600 矢量信号分析仪软件配置为以 7.5 GHz 的分析采样率提取 I/Q 数据。矢量信号分析仪还配置为测量 EVM、ACPR 增益压缩和 AM/PM 转换。

在被测器件输出端测得的 I/Q 数据被发送到 SystemVue，用于数字预失真模型提取和波形预失真；所得波形加载到任意波形发生器中。然后可以使用各种 89600 测量模式观察由数字预失真过程带来的改善。然后可以使用各种 89600 测量模式观察由数字预失真过程带来的改善。

数字预失真模型提取可以配置为使用查询列表、存储多项式或 volterra。此外，各种参数包括查询列表大小和多项式阶数也可以进行配置。这些值可通过 C# 程序进行调整，从而简化确定最佳数字预失真模型参数的过程。

## 评估实际数字预失真测量结果

我们对具有 1.5 GHz 符号速率的 QPSK 和 64 QAM 进行了数字预失真测量。根升余弦滤波器的过量带宽对应大约 2 GHz 的占用带宽。测量带宽为符号速率的 5 倍，或者是 7.5 GHz。要实现这一带宽，我们需要使用 M8195A 任意波形发生器作为宽带源，并且使用 8 GHz S 系列示波器作为宽带数字化仪。

我们测量了两个不同的被测器件。一个是基于 45 nm SOI CMOS 技术的单级功率放大器，具有大约 7.5 dB 的增益和大约 11 dBm 的连续波 (CW) 1 dB 压缩点 (P1dB) 以及大约 15 dBm 的 Psat。另一个被测器件 (基于同一半导体平台) 是一个三级功率放大器，增益为 14 dB，连续波 P1dB 约为 15 dBm。在设计功率放大器时，我们的目标是让存在最低 AM-AM 和 AM-PM 失真的放大器具有很少的记忆效应或没有记忆效应。跨越设计频段的 AM/PM 变化是放大器记忆效应大小的量度，AM/PM 与频率的突然变化是线性化问题的征兆 [2]。

数字预失真测量可在单级功率放大器的几个射频输入功率上进行，也可以在三级功率放大器的射频输入功率范围内进行。三级功率放大器对客户更为重要。通常，相对于没有应用数字预失真得出的结果，数字预失真可提供相邻信道功率 2 至 4 dB 的改善以及 EVM 的 1 至 2% 的改善。图 11 和图 12 所示为三级功率放大器单个测试用例的 ACP 和 EVM 结果。我们采用了几种方法来给功率放大器正确建模，并最终发现具有一个存储宽度的三阶存储多项式能最准确地表述功率放大器的特性。如此一来，即使压缩值高，也可避免使用更复杂的 Volterra 模型。

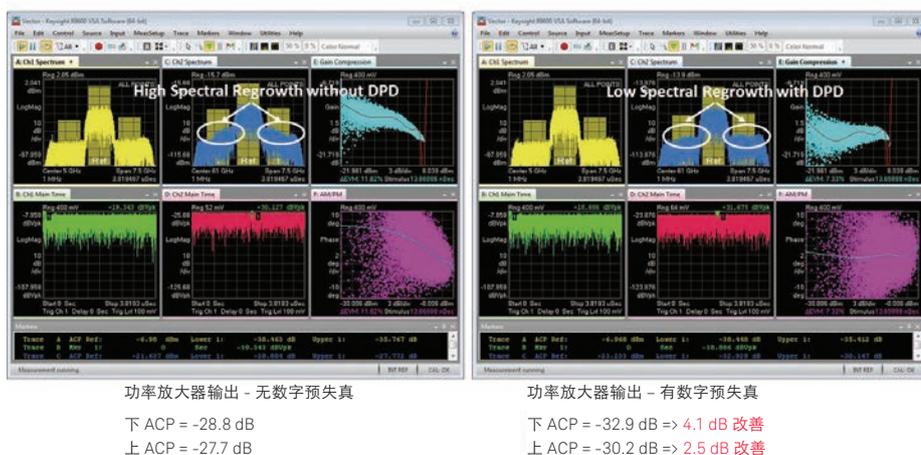


图 11. 如右图所示，应用数字预失真改善三级功率放大器中产生的 ACP。

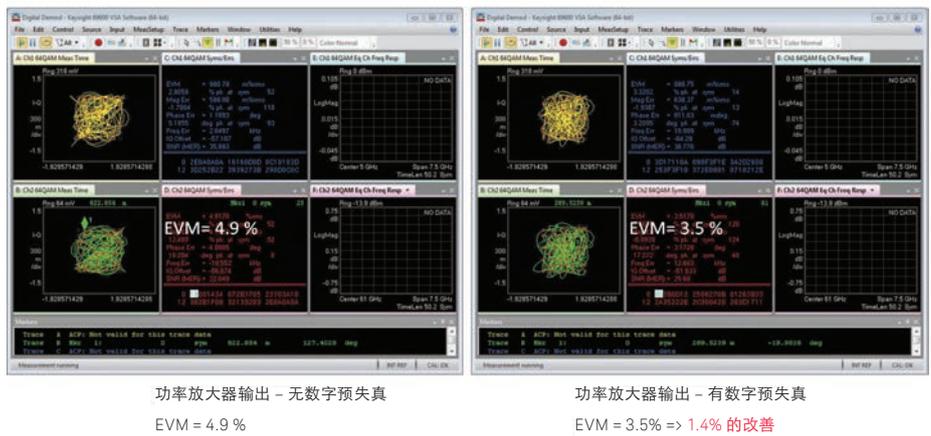


图 12. 如右图所示，应用数字预失真还可改善三级功率放大器中的 ACP。

## 总结

新分配的频谱的可用性为 5G 应用创造了新的可能性。在这些应用中，将使用宽带数字调制来提供高数据吞吐量。在扩展的带宽上工作将会对测试方法提出挑战，而从模拟向数字技术的转变则会加速 5G 设计的验证。

其中一个例子就是本白皮书中所描述的宽带毫米波测试台。这一创新的方式采用数字技术和紧凑的毫米波变频器来生成带宽非常高的毫米波测试信号 (> 2 GHz 至 5 GHz) 并对其加以分析。占用带宽高达 5 GHz 的测试信号展现出了低 EVM 性能。

与 Skyworks 联合进行的功率放大器数字预失真协作成功地展示了这种应用于毫米波功率放大器的宽带毫米波测试台。此线性预失真应用需要 7.5 GHz 的信号生成和分析带宽，或 5 倍的 1.5 GHz QPSK 和 64QAM 符号速率。使用这一测试台，我们通过单载波 QPSK 和 64QAM 调制，成功地对两个不同的功率放大器进行了线性化。

## 参考资料

- [1] 新闻稿: FCC 采取措施推进 24 GHz 以上频谱的移动宽带和下一代无线技术, [https://apps.fcc.gov/edocs\\_public/attachmatch/DOC-340301A1.pdf](https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DOC-340301A1.pdf)
- [2] O.Hammi, S. Carichner, B.Vassilakis 和 F. M. Ghannouchi, 《使用无存储器后补偿技术对功率放大器进行型号评测和存储器效应强度量化》, *IEEE 微波理论与技术汇刊*, 第 56 卷, 第 12 期, 第 3170-3179 页, 2008 年 12 月
- [3] 选型指南: 相位噪声测量解决方案, <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-5729EN.pdf>

## 演进

我们独有的硬件、软件和技术人员资源组合能够帮助您实现下一次突破。  
我们正在开启技术的未来。



从惠普到安捷伦再到是德科技



**myKeysight**

myKeysight  
[www.keysight.com/find/mykeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)  
个性化视图为您提供最适合自己的信息！

**KEYSIGHT SERVICES**

是德科技服务  
[www.keysight.com/find/services](http://www.keysight.com/find/services)  
我们拥有业界领先的技术人员、流程和工具，可以提供深度的设计、测试和测量服务。最终的结果就是：我们帮助您应用新技术，以及经工程师改进的流程，从而降低成本。



3 年保修  
[www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty](http://www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty)  
是德科技卓越的产品可靠性和广泛的 3 年保修服务完美结合，从另一途径帮助您实现业务目标：增强测量信心、降低拥有成本、增强操作方便性。



Keysight Assurance Plans  
[www.keysight.com/find/AssurancePlans](http://www.keysight.com/find/AssurancePlans)  
10 年的周密保护以及持续的巨大预算投入，可确保您的仪器符合规范要求，精确的测量让您可以继续高枕无忧。



[www.keysight.com/go/quality](http://www.keysight.com/go/quality)  
是德科技公司  
DEKRA 认证 ISO 9001:2015  
质量管理体系

是德科技渠道合作伙伴  
[www.keysight.com/find/channelpartners](http://www.keysight.com/find/channelpartners)  
黄金搭档：是德科技的专业测量技术和丰富产品与渠道合作伙伴的便捷供货渠道完美结合。

Copyright (c) 2016 Skyworks Solutions, Inc.

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。如欲获得完整的产品列表，请访问：[www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)

**是德科技客户服务热线**  
热线电话：800-810-0189、400-810-0189  
热线传真：800-820-2816、400-820-3863  
电子邮件：[tm\\_asia@keysight.com](mailto:tm_asia@keysight.com)

**是德科技(中国)有限公司**  
北京市朝阳区望京北路 3 号是德科技大厦  
电话：86 010 64396888  
传真：86 010 64390156  
邮编：100102

**是德科技(成都)有限公司**  
成都市高新区南部园区天府四街 116 号  
电话：86 28 83108888  
传真：86 28 85330931  
邮编：610041

**是德科技香港有限公司**  
香港北角电器道 169 号康宏汇 25 楼  
电话：852 31977777  
传真：852 25069233

**上海分公司**  
上海市虹口区四川北路 1350 号  
利通广场 19 楼  
电话：86 21 26102888  
传真：86 21 26102688  
邮编：200080

**深圳分公司**  
深圳市福田区福华一路 6 号  
免税商务大厦裙楼东 3 层 3B-8 单元  
电话：86 755 83079588  
传真：86 755 82763181  
邮编：518048

**广州分公司**  
广州市天河区黄埔大道西 76 号  
富力盈隆广场 1307 室  
电话：86 20 38390680  
传真：86 20 38390712  
邮编：510623

**西安办事处**  
西安市碑林区南关正街 88 号  
长安国际大厦 D 座 501  
电话：86 29 88861357  
传真：86 29 88861355  
邮编：710068

**南京办事处**  
南京市鼓楼区汉中路 2 号  
金陵饭店亚太商务楼 8 层  
电话：86 25 66102588  
传真：86 25 66102641  
邮编：210005

**苏州办事处**  
苏州市工业园区苏华路一号  
世纪金融大厦 1611 室  
电话：86 512 62532023  
传真：86 512 62887307  
邮编：215021

**武汉办事处**  
武汉市武昌区中南路 99 号  
武汉保利广场 18 楼 A 座  
电话：86 27 87119188  
传真：86 27 87119177  
邮编：430071

**上海MSD办事处**  
上海市虹口区欧阳路 196 号  
26 号楼一楼 J+H 单元  
电话：86 21 26102888  
传真：86 21 26102688  
邮编：200083