

# 修订用于 RF IC 生产测试的 5G RF 校准程序

测试技术高级总监 Vineet Pancholi | Amkor Technology, Inc.

测试工程总监 HyeongSik Youn; 测试开发部门经理、总监 JeongYon Kim; 主测试工程高级总监 SangHo Byun; 测试开发部门经理、副总裁 MinHo Chang | Amkor Technology Korea

测试开发工程射频 (RF) 和 MEMS Venancio Kalaw; 开发部经理、总监 Mon Lopez | Amkor Technology Philippines

现代射频 (RF) 元件给外包半导体封装与测试 (OSAT) 供应商带来了许多挑战, 因为这些供应商的目标是确保产品的封装与测试符合产品测试规范。手机、导航仪器、全球定位系统、Wi-Fi、接收器/发射器 (Rx/Tx) 元件等不断更新迭代, 对 RF 产品的需求亦日益增长, 持续推动对更先进的 5G 手机和 Wi-Fi 元件的需求。

在任何 RF 测试系统中, 在被测设备 (DUT) 上实现仪器端口级精度, 有助于提高测量精度和可重复性。然而, 仪器和 DUT 之间路径中的缆线、元件、迹线和开关以及其他物品的非理想性质可能会降低测量精度。

目前的校准方法可能在过去奏效, 但 RF 技术中 mmWave 的进步要求针对规范扩展修订校准程序。重要的是要考虑信号路径校准的关键要点, 即: 系统校准、缆线校准、负载板迹线去嵌入和黄金单位校准, 以及开发校准标准的过程中如何利用好这些独特优势。

## mmWave RF 测试

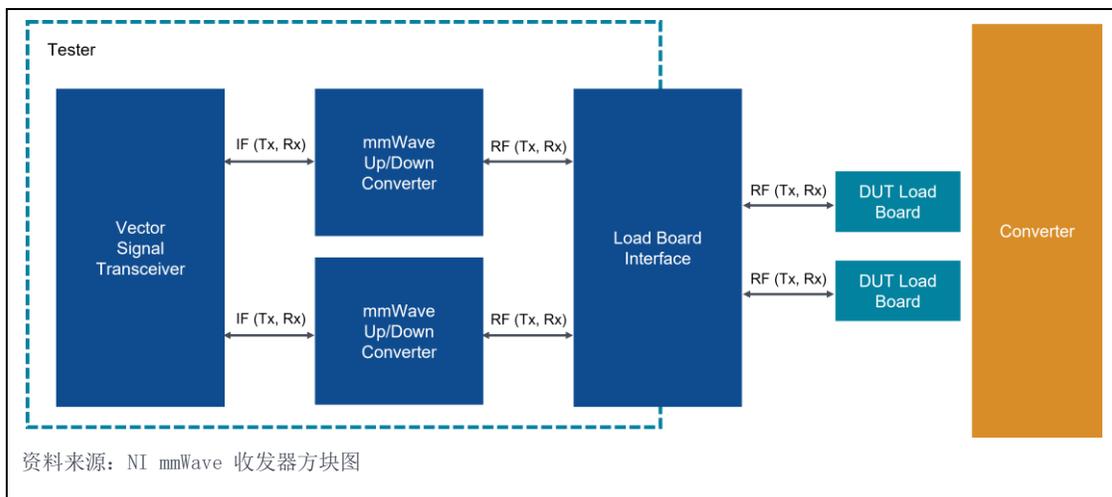


图 1. 用于 mmWave RF 测试的测试系统配置。

正确选择测试设备、连接器、适配器和系统级校准程序即可实现精确测量, 进而准确评估 5G 元件或设备的真实性能, 见图 1。在 mmWave 频率下, 信号更容易受损, 因此在选择测试解决方案、缆线和连接器时需要多加考虑。要实现精确测量, 系统级校准亦不可或缺。

## RF 校准

校准可确保测量系统产生精确的结果。测试系统仪器和被测设备之间路径中的所有非理想条件都会降低测量精度或造成平面度误差。如图 2 所示，必须将测量精度从测试系统信号源的输出或输入扩展到 DUT 的测试端口。要获得精确、经校准的测量，可能需要测量测试夹具、缆线和连接器的频率响应。

5G 有望在无线通信方面实现实质性的改进，包括提供更高的吞吐量、更低的延迟、更高的可靠性和更高的效率。实现这些目标需要应用各种新的技术和工艺，例如更高的频率、更大的带宽、新型调制方案、大规模多输入多输出 (MIMO)、相控阵天线等。

这些技术为设备性能的验证带来新的挑战。其中一项关键测量指标是误差矢量幅度 (EVM)，它是向 DUT 输送和接收调制信号的系统级规范。在许多情况下，EVM 值必须保持在特定阈值以下—要获得精确测量，测试系统本身需要具有低本底噪声（即低 EVM）。

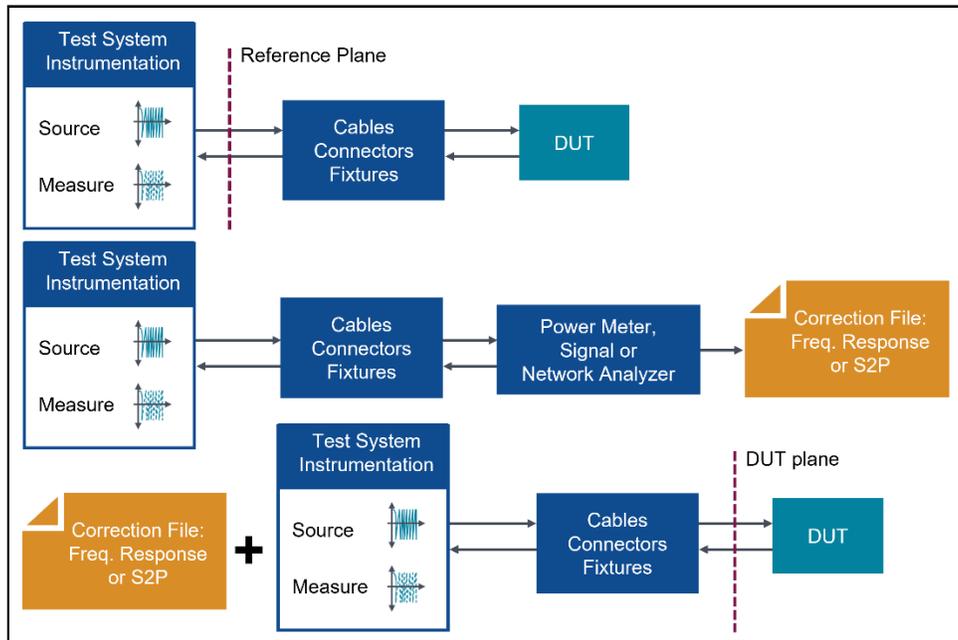


图 2. RF 校准设置。

矢量校准和标量校准是检测和纠正测量误差的两种校准方法。

### 矢量校准

矢量校准方法需要测量 RF 路径的幅度和相位特性。为此，可在 DUT 的输入和输出端口执行网络分析仪校准，或者运用经校准的网络分析仪测量 RF 路径的散射 (S) 参数<sup>3</sup>。后一种方法提供信号路径的完整复值参数描述。

### 标量校准

标量校准方法仅表示 RF 路径的幅度特性，相当于在矢量校准中仅测量 S21 传输系数的幅度部分。一种常见的技术是用信号发生器驱动路径的一端，然后用功率计测量另一端的信号。路径响应（损耗）的幅度部分通过从测量的功率电平（也以 dBm 为单位）中减去源功率电平（以 dBm 为单位）来确定。然后在跨频带的多个频率上重复进行此操作，以确定整体幅度特性。

当系统中使用的元件、适配器和缆线质量较高时，标量校准可以获得可接受的结果。这有助于最大限度地减少测量的不确定性并提高测量的可重复性。然而，与全矢量校准相比，标量校准不太可能检测到信号路径上阻抗匹配的变化。

图 3 所示为执行标量 RF 校准的过程。执行校准测试程序，指定 DUT 板和测试仪，执行路径校准。然后，通过使用外部设备（功率计、信号发生器、频谱分析仪）来收集校准数据。如果偏差在指定的误差范围内，则将收集到的校准数据与最近的校准数据进行比较，并应用校准数据。如果偏差超出误差范围，则进行检查和维修，并重复校准程序。

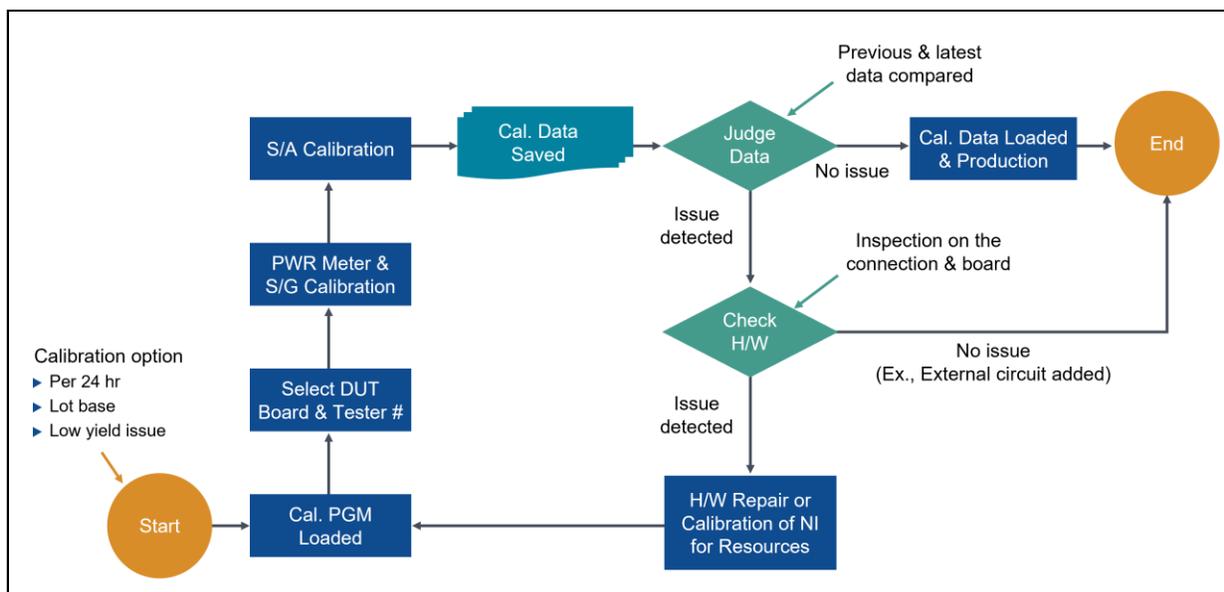


图 3. 标量 RF 校准程序。

## DUT 插座校准

RF 校准分两步执行，即 DUT Rx 信号路径的校准和 DUT Tx 信号路径的校准。对此，可设计和制造校准套件。

在步骤 1 中，校准 DUT Rx 信号路径，由此得出校准损耗系数测量环境。连接探针 RF 信号引脚的校准套件应与信号迹线完美匹配。要借助功率感应器来精确测量输入信号的功率电平，首先使用功率计将功率感应器归零，然后应用信号发生器和功率感应器来精确测量被测设备输入信号迹线的损耗系数。这些损耗测量取决于频率，并且必须在每个生产测试频率下进行。所有校准损耗系数均存储在一个文件中，以便在生产测试期间应用。

在步骤 2 中，对校准损耗系数测量环境进行配置，以执行 DUT Tx 信号路径的校准。借助信号发生器和频谱分析仪，可以测量所有输入和输出探针 RF 信号引脚的损耗系数，从而精确校准输入探针 RF 信号引脚和输出探针 RF 信号引脚之间的 RF 信号迹线。此外，可将之前在步骤 1 中测量的输入探针 RF 信号引脚的损耗系数代入，仅计算输出探针 RF 信号引脚的损耗系数。借此，通过校准从每个生产测试频率的负载板中往返的 RF 信号路径，可以得出损耗系数。

要完全校准到 DUT 的整个迹线，必须考虑基板 (PCB) 和 DUT 之间连接探针的损耗系数。在相对较低的频率下，探针的损耗系数可以忽略不计，并且可能被排除在 RF 校准之外。但是，由于 5G 新无线电 (NR) 使用 mmWave 频段，即使在相同类型的探针中，也可能出现相当数量的 RF 信号损耗。因此在校准时需将探针的损耗分摊作

为损耗要素包含在内。鉴于现有插座结构中的探针损耗难以精确测量，我们为此开发了一种新的校准和测试插座功能来实现对有关损耗的精确测量。

我们使用两种基本技术来纠正系统误差项：短路、开路、负载、直通（SOLT）和直通、反射、线路（TRL）。校准的差异与所用校准标准的类型及标准的定义方式有关。根据频率范围和应用，它们各有优势。

## 案例研究<sup>12</sup>

在 5G 载波频率和带宽下，测试夹具会对测试系统施加显著的通道频率响应，并对 EVM 结果产生不利影响。测量包括测试夹具和 DUT 的特性—因此就算有可能，也很难确定 DUT 的真实性能。校准可将测试平面从测试系统连接器移动到 DUT 的输入连接器（见图 4）。

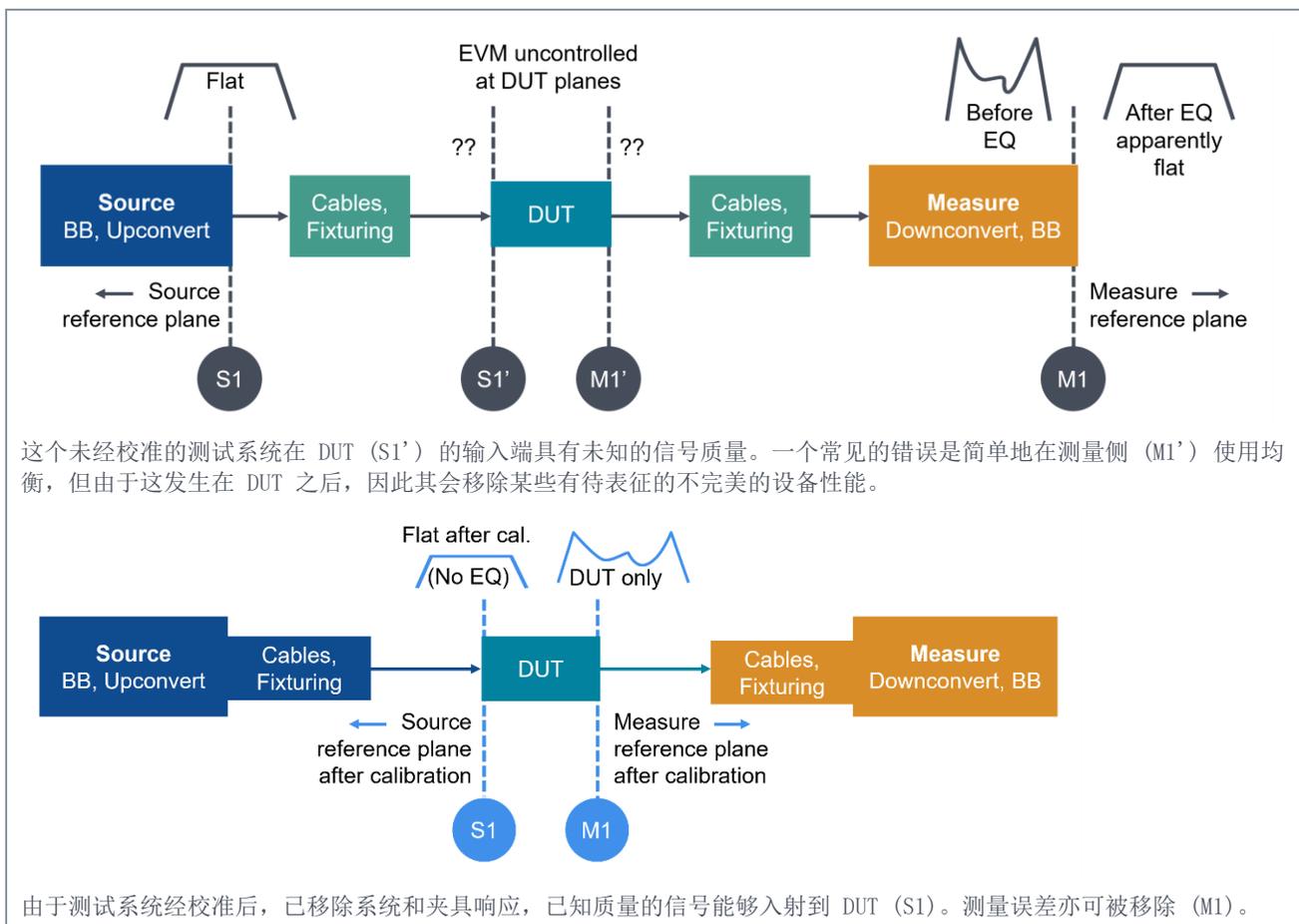


图 4. 通过校准，将测试平面移动到 DUT。

图 5 所示为正交频分复用 (OFDM) RF 调制测试的校准影响的分析结果。已比较 28 GHz 下 900 MHz 带宽 (BW) 信号的频率响应特性。上方迹线显示了幅度响应，在带宽的上端有明显的滚降。下方迹线显示了相位响应，相位响应在 BW 上也有相当大的变化。

未应用校准时，频率响应特性的幅度（7 dB）和相位（45 度）出现较大偏差。应用校准后，获取频率响应特性的幅度（0.2 dB）和相位（2 度）的变化。

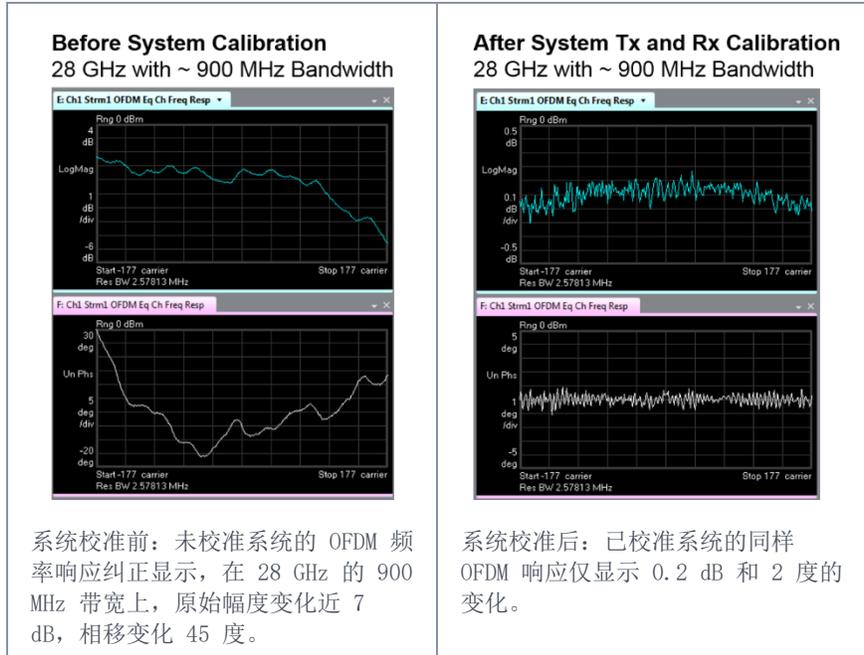


图 5. 校准前后的 OFDM 调制频率响应。

图 6 所示为单载波 16 正交幅度调制 (QAM) 信号校准后的解调制结果。左上方的迹线显示了一个非常清晰的星座图。这意味着均衡器的幅度和相位响应都没有特殊变化并且在规格范围内，表明均衡器没有补偿测试夹具中的任何残余通道响应。左下方的迹线显示了带宽接近 1 GHz 的频谱。中下方的迹线显示了误差汇总：EVM 约为 0.7%，与设备规格相比，这是可以接受的容差。该系统非常适合用来确定设备的特性。

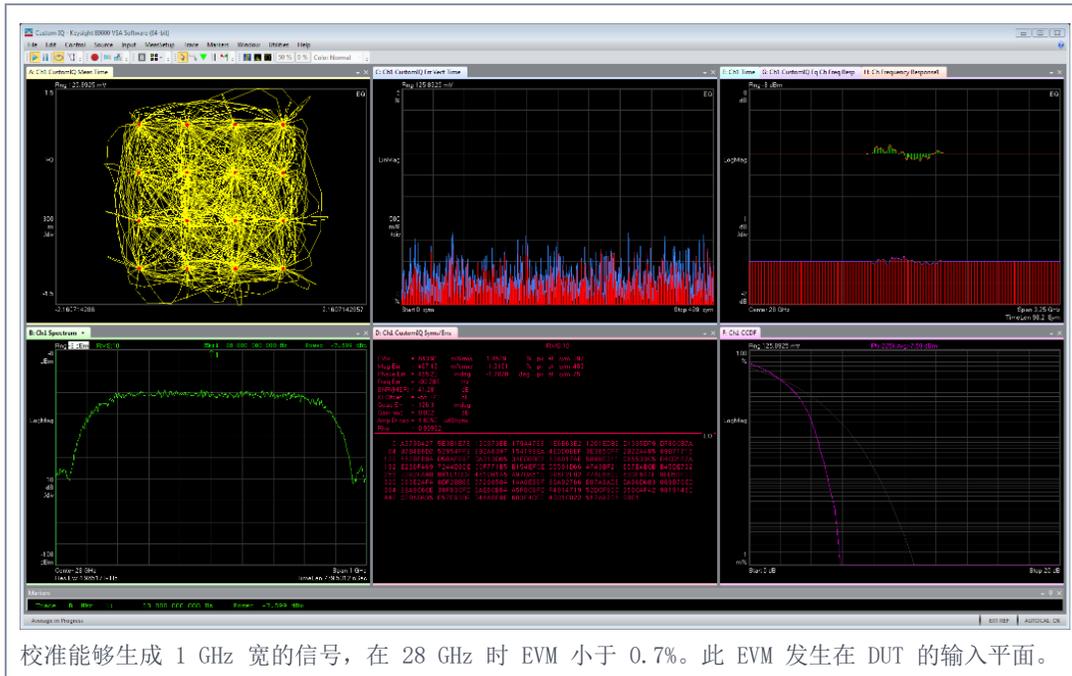


图 6. 校准前后的 OFDM 频率响应。

## 总结

RF 校准是半导体 RFIC 生产测试过程中必不可少的环节，可确保吞吐量、容差和成品率在可接受的范围。可靠且可重复的校准可确保提供一致的结果，便于查明产品或设计问题，从而最大限度地减少开发和制造的延迟。在 Amkor，RF 校准对成功完成客户部件生产测试至关重要。

## 参考资料：

1. “Using Calibration to Optimize Performance in Crucial Measurements”，(Keysight, 5992-0891)。
2. “Accelerate 5G Testing: 5G Manufacturing Test Considerations”，(Keysight, 5992-3659)。
3. “S-Parameters”，Microwaves101.com, 链接。
4. “4 Hints for Better Millimeter-wave Signal Analysis”，白皮书, (Keysight, 5992-2970)。
5. “A Novel BiST and Calibration Technique for CMOS Down-Converters”，2008 年第 4 届 IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications (ICCS 2008)。
6. “Self-calibration of input-match in RF front-end circuitry”，《IEEE Transactions》第 52 卷第 12 期, 2005 年 12 月。
7. “Calibration techniques of active BiCMOS mixers”，《IEEE Journal of Solid-State Circuits》第 37 卷第 6 期, 2002 年 6 月。
8. “Digital calibration of gain and linearity in a CMOS RF mixer”，2008 年 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)。
9. “Verification of wafer-level calibration accuracy at high temperatures”，2008 年第 71 届 ARFTG Microwave Measurement Conference。

10. “A multiline method of network analyzer calibration”, 《IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques》第 39 卷第 7 期, 1991 年 7 月。
11. “On-wafer calibration techniques for giga-hertz CMOS measurements”, Proceedings of 1999 International Conference on Microelectronic Test Structures.
12. “Comparison of the “pad-open-short” and “open-short-load” deembedding techniques for accurate on-wafer RF characterization of high-quality passives”, 《IEEE Transactions》第 53 卷第 2 期, 2005 年 2 月。
13. “我应该担心 5G 校准吗?” Keysight Community 博客。