

## 使用P2102A探头和E5061B VNA进行2端口阻抗测量

By Benjamin Dannan and Steven Sandler, Picotest.com

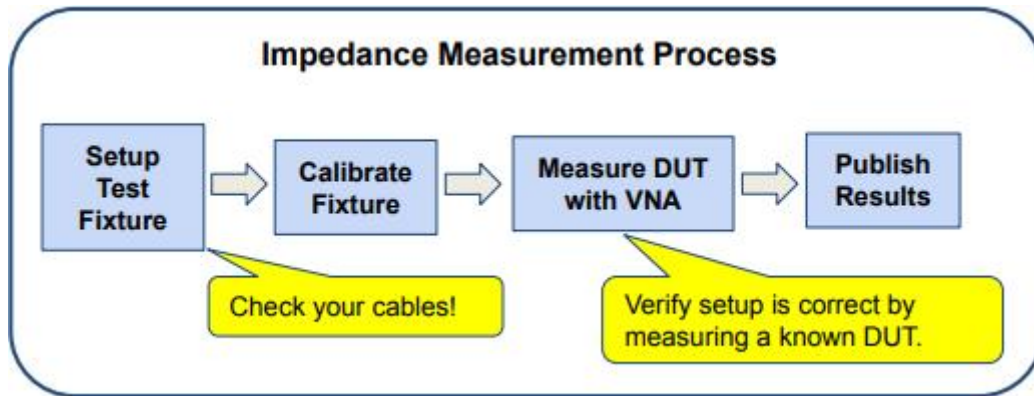
高速印刷电路板（PCB）设计需要精心设计的供电网络（PDN），以支持当今的FPGA和定制混合信号ASIC。PDN包含重要的阻抗信息，可以告诉设计人员系统如何对动态电流做出反应以及PCB布局的影响。如果我们将PDN视为稳压器模块（VRM）和负载（ASIC）之间的传输线，那么良好的PDN设计的起点就是VRM。

如今，VRM需要给使用多口千兆以太网，PCIe和DDR存储器接口的多个VDD内核供电，以支持FPGA和/或定制ASIC。话虽这么说，但有关VRM输出阻抗的信息一般是不会提供的，而且提供时也不一定准确。此外，对于任何设计工程师而言，在多个VRM或多拓扑DC-DC稳压器上测量超低阻抗都是一项挑战。

2端口并联-直通阻抗测量是在微欧和毫欧范围内测量VRM输出阻抗的黄金标准[1]。但是，并非总是可以通过同轴连接器连接PCB或被测器件（DUT）进行这些测量。因此，当设计人员使用矢量网络分析仪（VNA）进行这些类型的测量时，连接DUT的方法需要注意细节，以确保电感和各种误差最小化，从而可以进行精确的测量。为了充分利用您的VNA，您需要使用正确的探头和附件以确保您的特定测量的准确。使用P2102A这样的可调型探头，您可以快速表征多个VRM，以确保稳定性，甚至可以在初始PDN设计期间检查模型是否准确。

Picotest P2102A 2端口PDN传输线探头是一种可调型探针，其尖端的电感非常低，可降低在密集PCB上的空间限制导致的测试难度，同时无需焊接同轴器件，添加其他同轴连接器或其他必要的测试点用于阻抗测量。当要评估的传输线路数量很多且耗时，或者PCB迭代可用于为每个测试点进行测试时，此功能特别有用。重复测量得以简化，因为连接只需将尖端与现有的输出电容器焊盘接触即可。该可调型探头带有4个探针尖，可以在PCB上的各种SMD封装（例如1206、0805、0603或0402）上进行测量。P2102A探针尖具有1X，2X，5X和10X衰减。这使用户可以灵活地在宽范围的电压范围内进行测量。例如，2X探头可以测量6V<sub>rms</sub>，而无需DC隔离器。这样是衰减阻抗底噪增加的幅度。简而言之，这2端口P2102A探头最适合于VRM，电源平面和去耦测量。另一个好处是，您可以在评估PDN的同时使用非侵入式稳定性测量（NISM）来评估电源的稳定性[2]

本文档的目的是向设计和测试工程师展示如何设置和使用Keysight E5061B并将其与Picotest P2102A可调型探头配合使用的过程，以高效，快速地准确测量任何VRM或电源通路的阻抗。这还将向您展示如何使用此探头作为快速的GO / NO-GO测试仪。在本应用笔记中，将按照图1所示的过程对两个DUT进行测量。



**Fig. 1 - Impedance Measurement Process.**

**1.0 测试设备清单**

<b>Description</b>	<b>Model</b>	<b>QTY</b>
Vector Network Analyzer	Keysight E5061B [3]	1
2-port PDN Transmission Line Probe Kit	Picotest P2102A-1X [4]	1
Common Mode Transformer	Picotest J2102B-N [5]	1
2-Port Probe Adapter Panel	Picotest J2160A [6]	1
Picotest PDN Cable®, BNC-BNC, 0.25 meter	BNCJ/BNCJ-250 [7]	1
N Male to BNC Female Adapter	Pasternack PE9002 [8]	2
3D Probe Positioner	Keysight N2787A [9]	1
VRM Demo Boards (Flat and Varying Impedance)	LM20143B [10]	1
VRM - Infineon PS5401 Eval (DUT)	EVAL_PS5401-INT [11]	1
Calibration Board/Substrate	Included in Picotest P2102A kit	1



**Fig. 2 - Picotest P2102A probe, P2102A probe tips, Picotest PDN Cable, J2102B ground isolator, adapters, calibration substrate, and probe holder for measurement (for use with the Port 1-Port-2, N-connector S-parameter ports).**



**Fig. 3 - Picotest P2102A probe, P2102A probe tips, J2160A, calibration substrate, and probe holder for measurement (for use with the low frequency-RF(T/R) BNC-connector ports).**

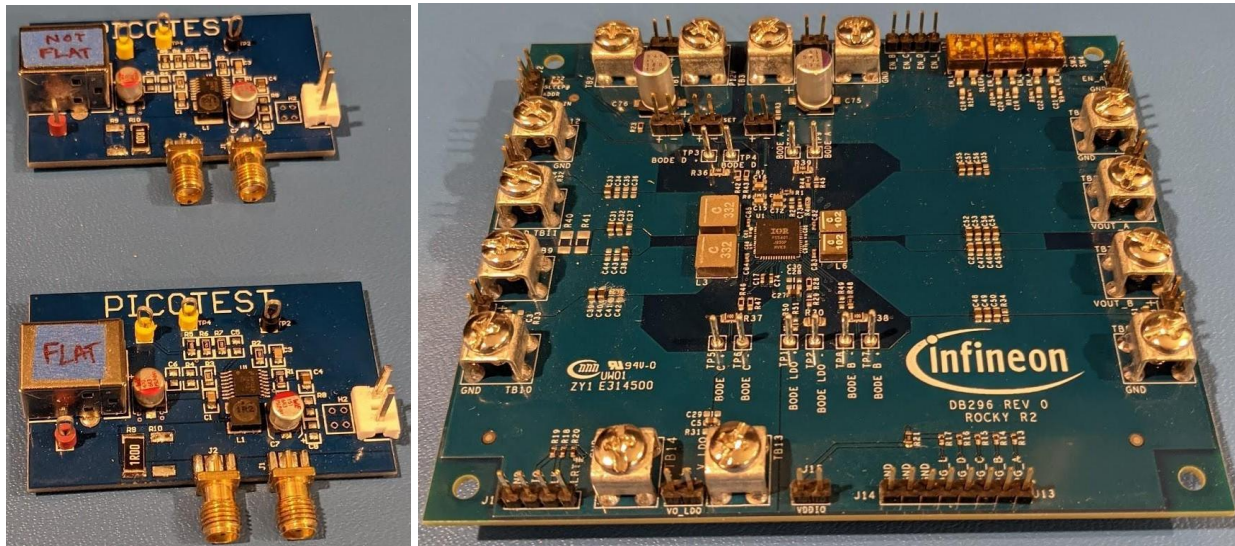


Fig. 4 - Picotest LM20143 DUTs\* (left) and Infineon PS5401 Eval DUT (right).

注意：在本文档中，Picotest LM20143测试板可能被称为Flat DUT和非平面（NF）DUT。

## 2.0 Measurement Setup

P2102A-2X探头的尖端包含50Ω串联电阻（ $R_s$ ），可以在E5061B的“校准”菜单中进行设置/说明。图5和图6描绘了DUT如何通过E5061B S参数端口连接到2端口P2102A探头。

对于其他P2102A-#X探头型号，请按照下面E5061B VNA中的定义设置 $R_s$ ：

P2102A-1X -  $R_s = 0\Omega$

P2102A-5X -  $R_s = 200\Omega$

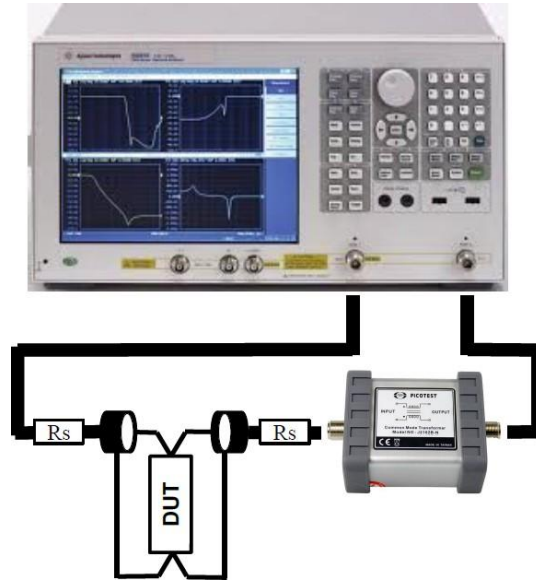
P2102A-10X -  $R_s = 450\Omega$

使用Keysight E5061B VNA，通过P2102A有两种2端口测试方法。

一种是使用包括Picotest J2102B公共模式变压器，在E5061B S参数端口上连接到端口1和2，如图5所示。此方法的必要测试设备如图2所示。



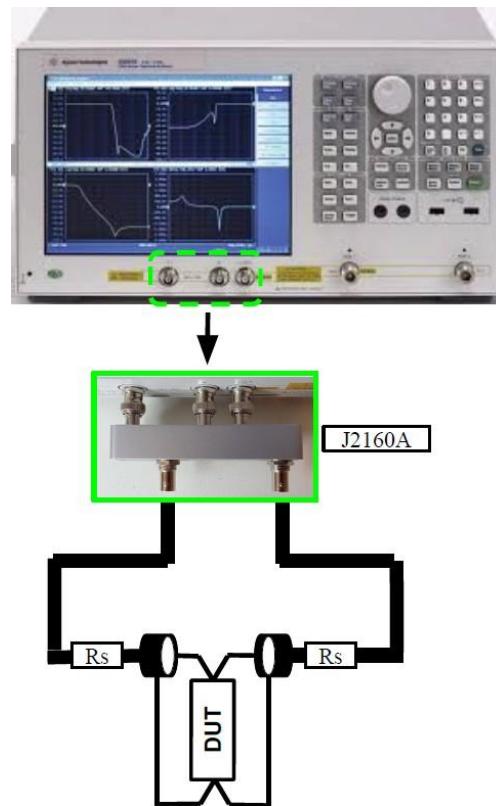
并联-直通器有地，在低频时遭受接地环路误差。通过连接到通道2接地的电缆屏蔽层的电流会引入测量误差，当测量非常低的阻抗值时，该误差在10 kHz至100 MHz之间的频率下会变得很明显。为了减少低频时的接地环路误差，请使用接地隔离器或共模变压器（例如，J2102B）或有源隔离设备，例如J2113A [12]。



**Fig. 5 - 2-port Shunt-Thru with series resistance impedance measurement setup using E5061B and Picotest ground isolator J2102B.**

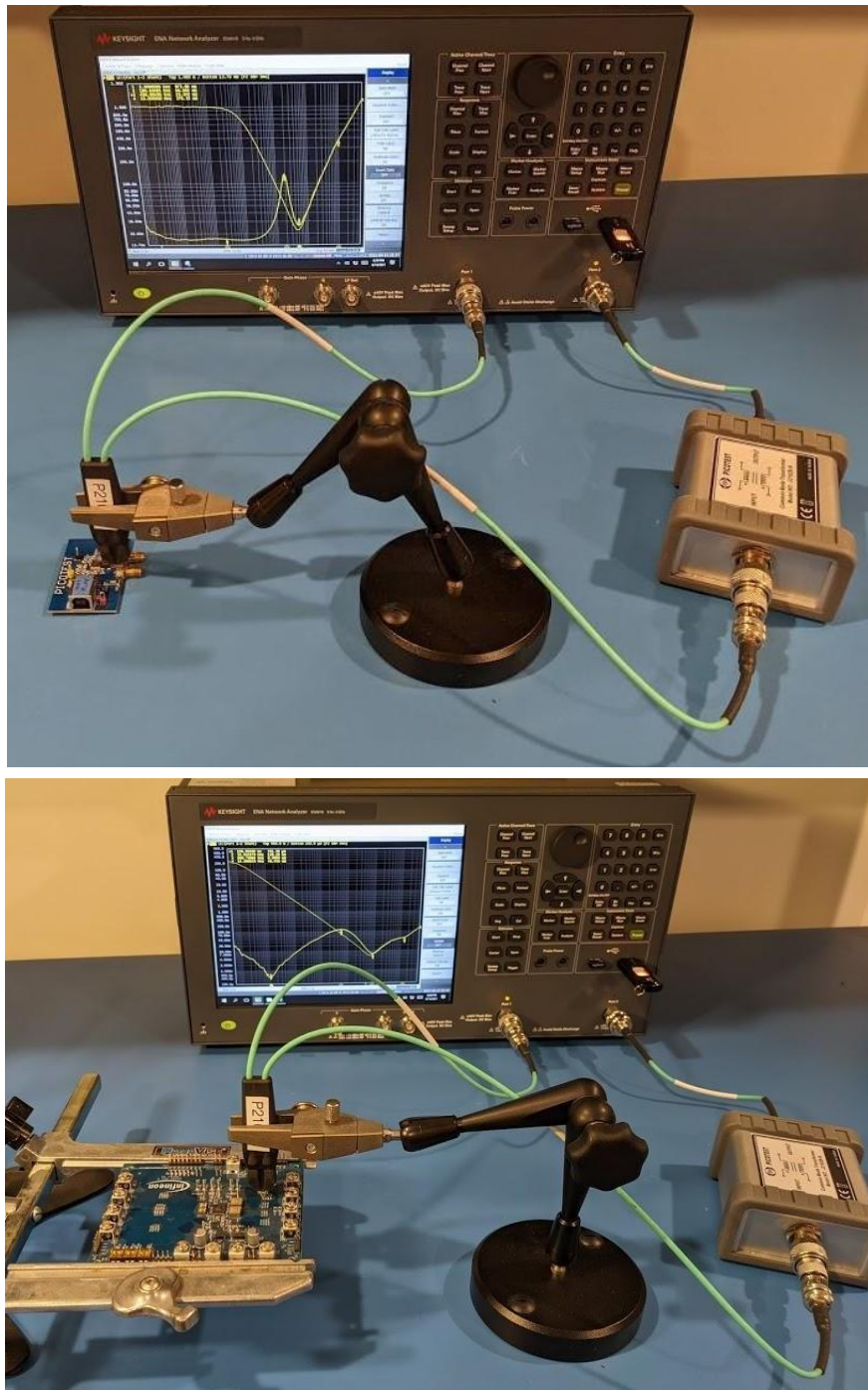
其他测量配置包括Picotest J2160A 2端口探头适配器，该适配器连接到E5061B上的T / R端口，低频增益VNA BNC端口，如图6所示。此配置所需的测试设备如图3所示。

当在2端口并联-直通测量中使用E5061B T / R端口时，Picotest J2160A探头适配器可提供低噪声，紧凑的解决方案。它将仪器的三个GP端口转换为执行2端口并联-直通测量所需的2个端口。T / R端口是低频2端口测量所需要的，因为接收器端口是半浮地的，因此无需使用同轴共模变压器（例如J2102B）即可进行低阻抗测量。浮地端口即使在非常低的频率和高达30 MHz的T / R端口范围内也可以进行毫欧测量。



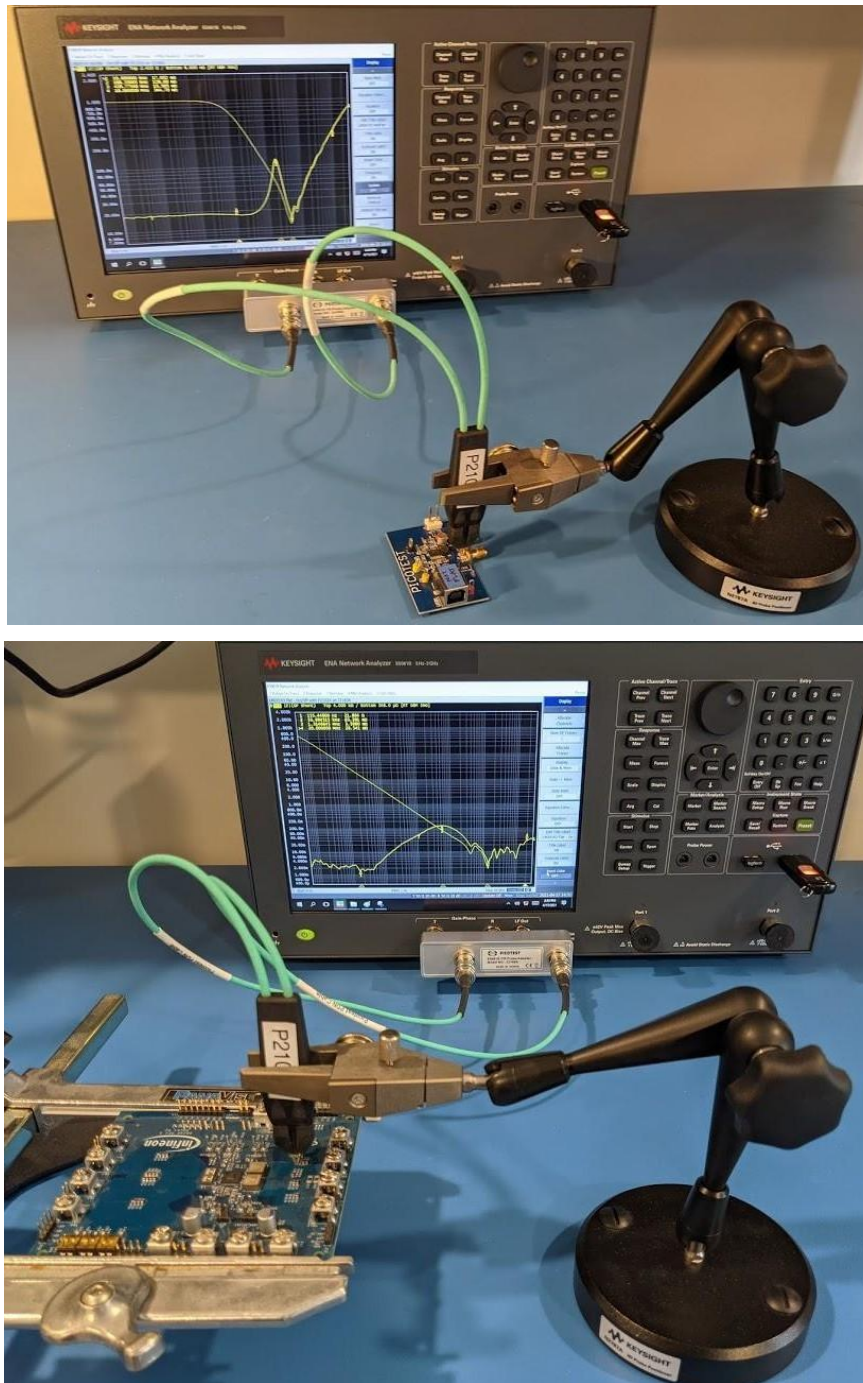
**Fig. 6- 2-Port Shunt-Thru with series resistance impedance measurement setup using E5061B and Picotest J2160A 2-port probe adapter.**

2端口探针用户通常拥有一个探针台。但是，设置摄像机，显微镜，校准等的必要性比简单的VRM阻抗甚至稳定性测量有时需要的要大得多。如图7和8所示，这就是P2102A可调型探头在使用中更加适合的方案。



**Fig. 7 - Measurement Setup after calibration with DUTs, the P2102A probe and the J2102B Common Mode Transformer.**

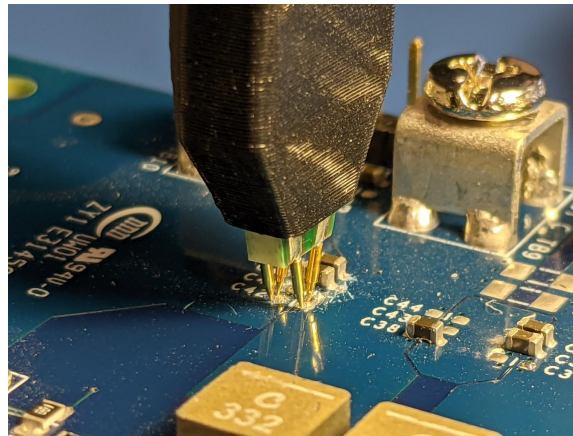




**Fig. 8 - Measurement Setup after calibration with DUTs, the P2102A probe and the J2160A 2-Port Probe Adapter.**

在进行任何测量之前，您应确保使用正确的校准方法对设置进行了校准。E5061B VNA具有多个校准选项，如E5061B用户手册的表4-1所示。正确的校准至关重要，因为它可以校正接触电阻，尖端电感，耦合和热电偶效应。为了获得最高的测量精度，Picotest的建议是使用全2端口校准，其中包括E5061B的SHORT-OPEN-LOAD-THRU-ISOLATION校准方法。通过要求8个标准测量值（如图18所示），可以确保使用12项误差校正模型的高精度。本文稍后将说明其重要性的示例。另外，为确保一致的接触电阻，建议在校准和测量过程中使用探头支架。E5061B还提供其他校准选项，例如增强响应校准，其中包括提供5项误差校正模型的OPEN-SHORT-LOAD-THRU校准方法，以及提供2项误差校正的响应校准。包括开-短负载或直通负载校准的模型。

图9和10提供了每个DUT上探针尖端位置的图示。对于图9，在测量之前先取下0603电容器（C42），然后如图所示使用0603探头尖端；但是，无需移除电容器即可进行此测量。为了识别起见，探头在外壳的顶端侧有一个凹口，而接地侧则平整，光滑，以免混淆。



**Fig. 9 - Probe location on DUT - Infineon PS5401 Eval at C42.**

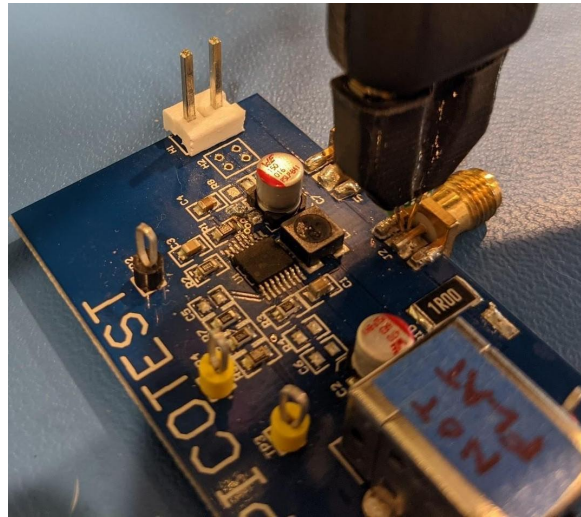


Fig. 10 - Probe location on DUT - LM20143 at J2.

### 3.0 测量结果

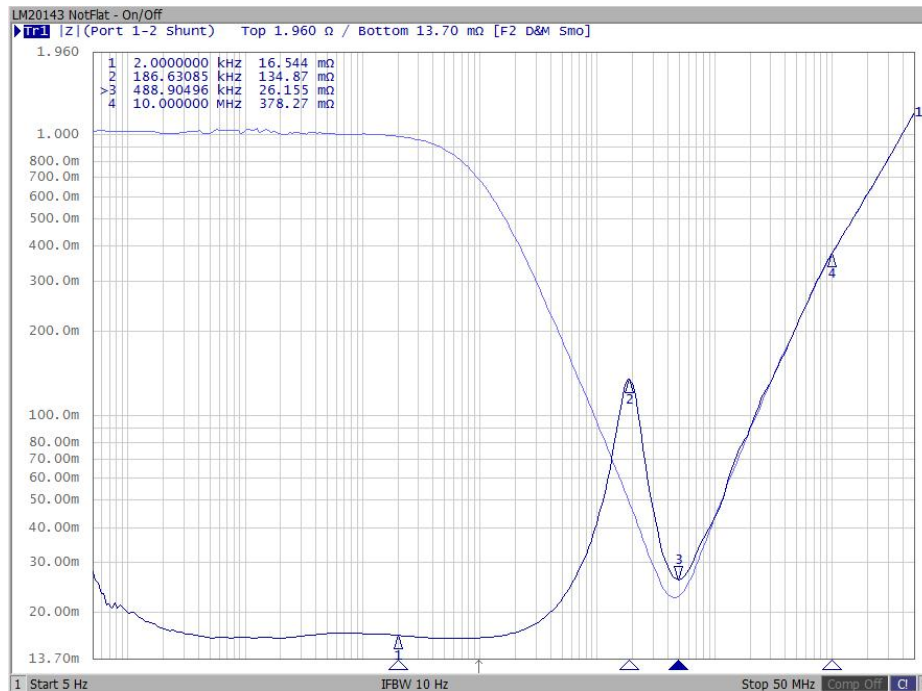
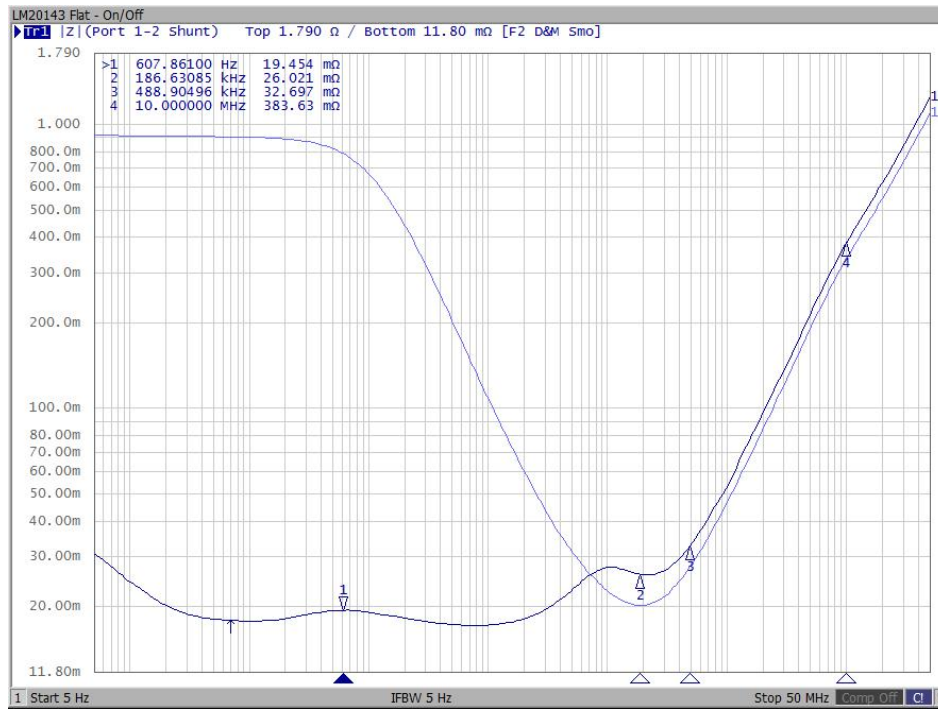
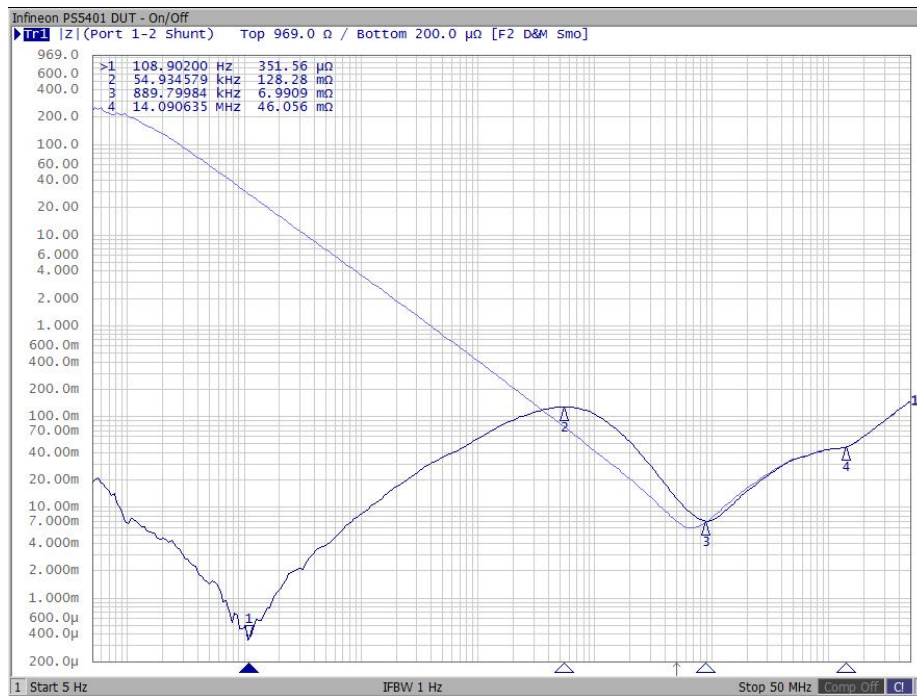


Fig. 11 - LM20143 NF VRM Output Impedance results OFF and ON (Full 2-port calibration method) with J2102B.

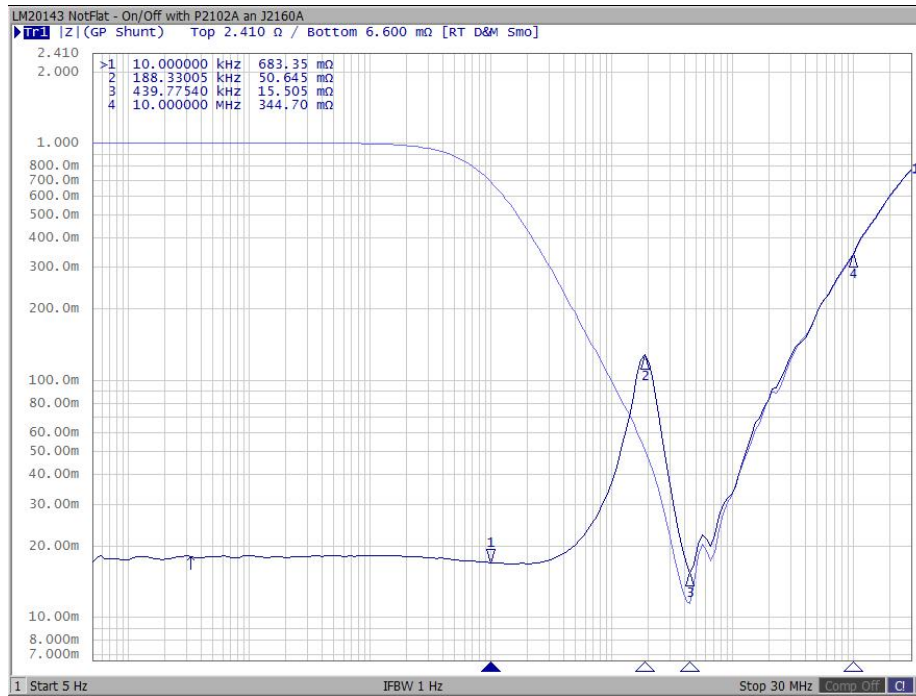


**Fig. 12 - LM20143 FLAT VRM Output Impedance results OFF and ON (Full 2-port calibration method) with J2102B.**

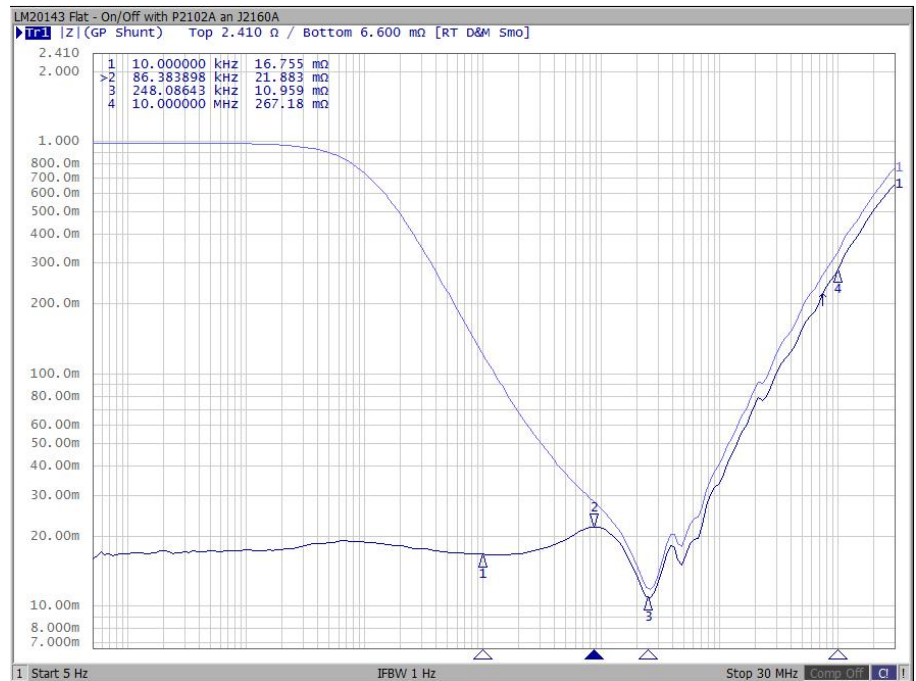


**Fig. 13 - PS5401 VRM Output Impedance results OFF and ON (Full 2-port calibration method) with J2102B.**



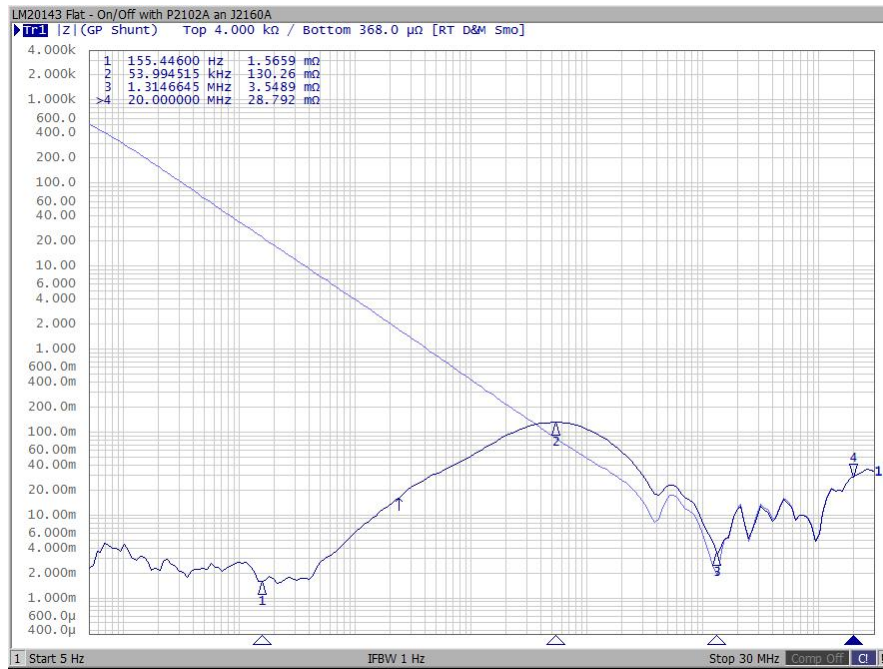


**Fig. 14 - LM20143 NF VRM Output Impedance results OFF and ON (Full 2-port calibration method) with J2160A.**



**Fig. 15 - LM20143 FLAT VRM Output Impedance results OFF and ON (Full 2-port calibration method) with J2160A.**





**Fig. 16 - PS4501 VRM Output Impedance results OFF and ON (Full 2-port calibration method) with J2160A.**

如图13和16中的结果所示，使用任一测量设置，都可以使用P2102A探头精确测量1mΩ以下的阻抗。

#### 4.0 P2102A— 使用 E5061B时的校准对照表

使用J2102B共模变压器和J2160A 2端口探头适配器通过串联电阻测量对并联-直通阻抗的测试设置进行校准。

##### 4.1 使用E5061B和J2102B共模变压器的2端口校准方法

接通E5061B的电源后，如图7所示，连接好用于校准的电缆。在DUT上进行测量之前，请按照以下步骤校准测量设置。

Step 1: (On the E5061B) Press > **Cal** button

Step 2: Set > **Rs**, by specifying under  $Z_0$  (as shown by Figure 17)

**\*注意：**仅需要为P2102A-2X，5X，10X探头指定Rs。对于1X探针，可以忽略此步骤。对于DC Block，请使用1X设置。

Step 3: Select > **Calibrate**

Step 4: Select > **2-Port Cal\***

Step 5: Select > **Reflection**

Step 6: 将探头适当地放在校准基板上

Step 7: Select > **Port1 Open**

✓将出现在“ Port1 Open” LSK的旁边

Step 8: Select > **Port2 Open**

✓将出现在“ Port2 Open” LSK的旁边

Step 9: 重复所有6个反射校准步骤，直到反射✓，如图19所示。参考图18以完成所有全2端口校准步骤。

Step 10: Select > **Return**

Step 11: Select > **Transmission**

Step 12: Select > **Port 1-2 Thru**

✓将出现在“ Port 1-2 Thru” LSK旁边

Step 13: Select > **Return**

Step 14: Select > **Isolation (Optional)**

Step 15: Select > **Port 1-2 Isol**

✓将出现在“ Port 1-2 Isol” LSK旁边

Step 16: Select > **Return**

**\*Note:** 当反射，透射，隔离显示为✓时，如图2所示，完成了全2端口校准。

Step 17: Select > **Done**

Step 18: Select > **Return**

#### 4.1 使用E5061B和J2160A 2端口探头适配器的2端口校准方法

接通E5061B的电源后，如图8所示，连接好校准电缆。在DUT上进行测量之前，请按照以下步骤校准测量设置。

Step 1: (On the E5061B) Press > **Meas** button

Step 2: Select > **Impedance Analysis Menu**

Step 3: Select > **Method Port 1 ReFl**

Step 4: Select > **GP Shunt T 50Ω, R 50Ω**

Step 5: Select > **|Z|**

Step 6: Select > **Gain-Phase Setup**

Step 7: Set > **T input Z = 50 Ω**

Step 8: Set > **R Input Z = 50 Ω**

根据需要设置T衰减器和R衰减器的衰减Step 9: Press > **Cal** button

Step 10: Set > **Rs**, 通过在Z0下指定（如图17所示）

**\*Note:** 仅需要为P2102A-2X, 5X, 10X探针指定Rs。对于1X探针，可以忽略此步骤。

Step 11: Select > **Calibrate**

Step 12: Select > **Response (Open)**

Step 13: Ensure **Select Port > GP Port\***

Step 14: 将探头适当地放在校准基板上

Step 15: Select > **Open(f)**

Step 16: 将探头适当地放在校准基板上

Step 17: Select > **Load (Optional)**

Step 18: Select > **Done**

Step 19: Select > **Return**

Step 20: 重复进行响应（短）和响应（直通）校准步骤，直到反映出✓。参考图18完成所有全2端口校准步骤。

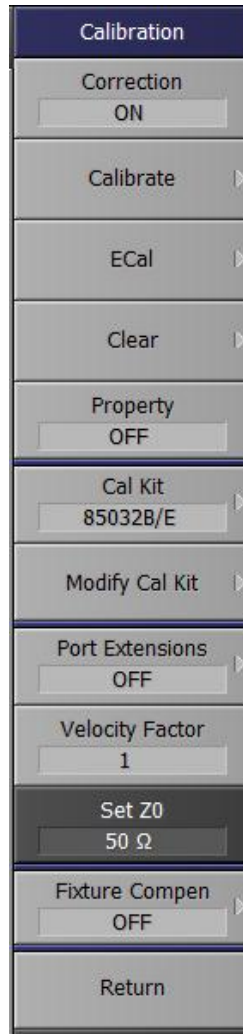
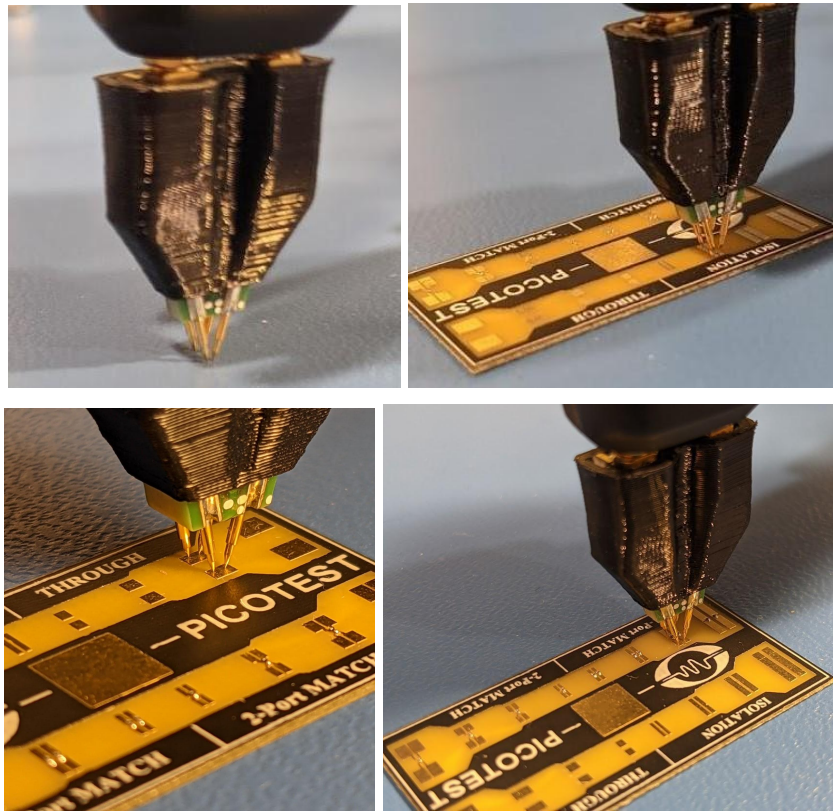
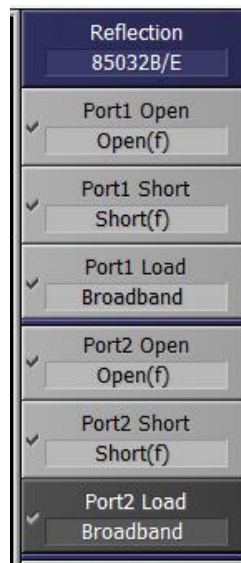


Fig. 17 - E5061B Calibration menu, where  $Z_0$  is highlighted.



**Fig. 18 - P2102A 2-port Calibration Open (top left), Short and Isolation (top right), through (bottom left) and Match/Load (bottom right).**



**Fig. 19 - Full 2-port Calibration - Reflection Calibration Steps Completed.**





Fig. 20 - Full 2-port Calibration Steps Completed.

#### 4.2 检查列表——使用J2102B共模变压器进行DUT并联-直通测量

将DUT连接到E5061B进行并联测量，如图7所示。

Step 1: (On the E5061B) Press > **Meas** button

Step 2: Select > **Impedance Analysis Menu**

Step 3: Select > **Method Port 1 Refl**

Step 4: Select > **Port 1-2 Shunt**

Step 5: Select > **|Z|**

Step 6: Press > **Scale** button

设置比例或根据需要选择“自动比例”

Step 7: Select > **Y-axis Log**

Step 8: Select > **Log**

Step 9: Press > **Display** button

设置标题标签并适当显示颜色

Step 10: Press > **Ave** button

Step 11: Set > *IF Bandwidth*

**Note:** 带宽越低⇒分辨率越高，但测量速度也越慢。通常，典型设置是1 kHz。

Step 12: Press > **Start** button

Step 13: 设置测量开始频率

Step 14: Press > **Stop** button

Step 15: 设置测量的停止频率

Step 16: Press > **Sweep Setup** button

Step 17: Select > **Power**

Step 18: 设置功率 dBm Step

19: Select > **Return** Step 20:

Select > **Sweep Type** Step 21:

Select > **Log Freq** Step 22:

Select > **Return**

Step 23: Select > **Return** (to return to E5061B Menu)

开始对DUT测量...

#### 4.3 检查列表—使用J2160A进行DUT并联-直通测量

将DUT连接到E5061B进行测量，如图8所示...

Step 1: (On the E5061B) Press > **Meas** button

Step 2: Select > **Impedance Analysis Menu**

Step 3: Select > **Method Port 1 Refl**

Step 4: Select > **GP Shunt T 50Ω, R 50Ω**

Step 5: Select > **|Z|**

Step 6: Select > **Gain-Phase Setup**

Step 7: Set > **T input Z = 50 Ω**

Step 8: Set > **R Input Z = 50 Ω**

**Note:** 如果被测信号有噪声，请根据需要将衰减（T衰减器和R衰减器）从20dB降低。

Step 9: Select > **Return**

Step 10: Press > **Scale** button

设置比例或根据需要选择“自动比例”

Step 11: Select > **Y-axis Log**

Step 12: Select > **Log**

Step 13: Press > **Display** button

设置标题标签并适当显示颜色

Step 14: Press > **Ave** button

Step 15: Set > *IF Bandwidth*

**Note:** 带宽越低⇒分辨率越高，但测量速度也越慢。通常，典型值是1kHz。

Step 16: Press > **Start** button

Step 17: 设置测量开始频率 Step 18: Press >

**Stop** button

Step 19: 设置测量的停止频率 Step 20:

Press > **Sweep Setup** button

Step 21: Select > **Power**

Step 22: Set > *Power* dBm level

**Note:** 在“增益相位设置”菜单中，根据需要调整衰减级别，以防止过载。可以结合功率水平来完成。

Step 23: Select > **Return**

Step 24: Select > **Sweep Type**

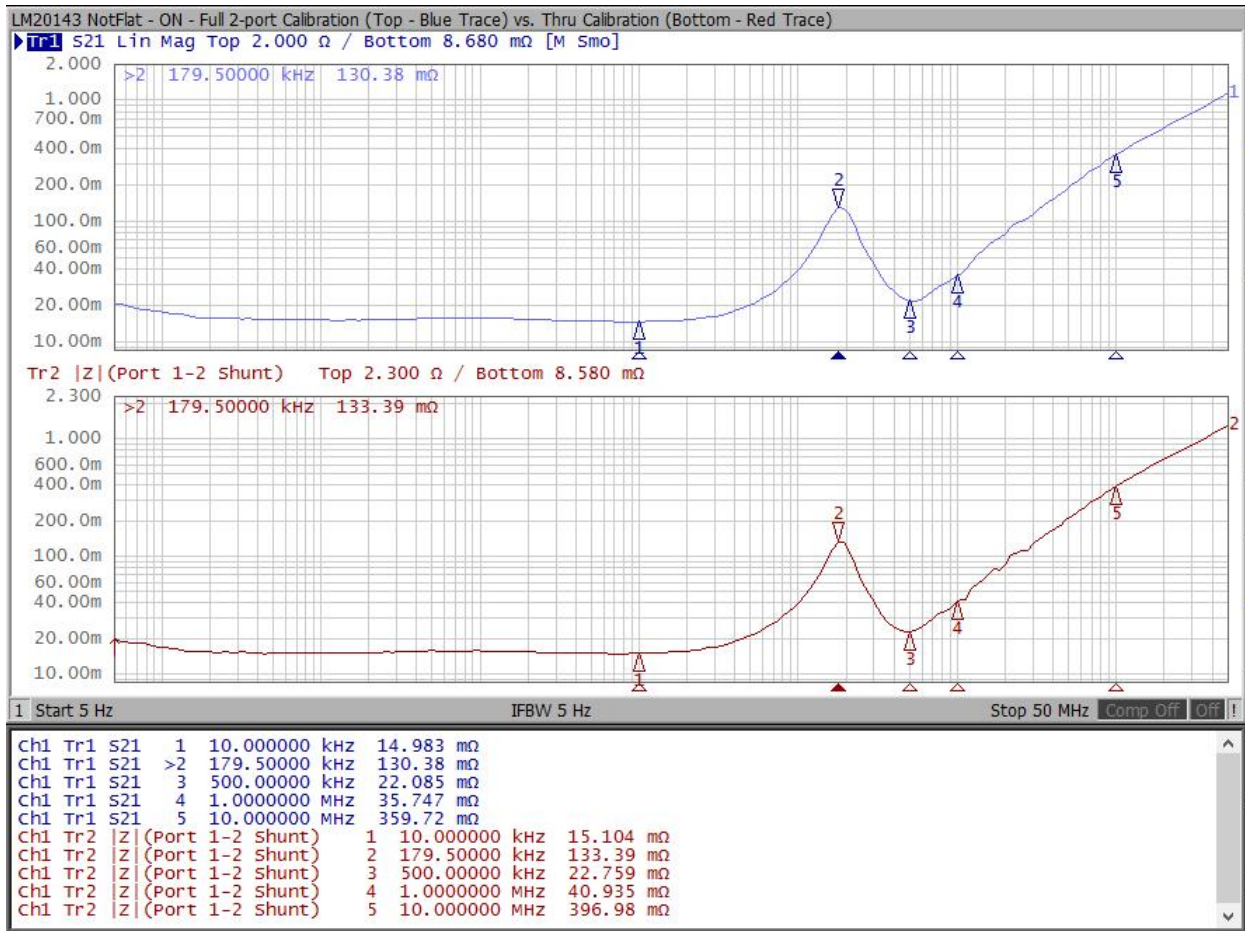
Step 25: Select > **Log Freq**

Step 26: Select > **Return**

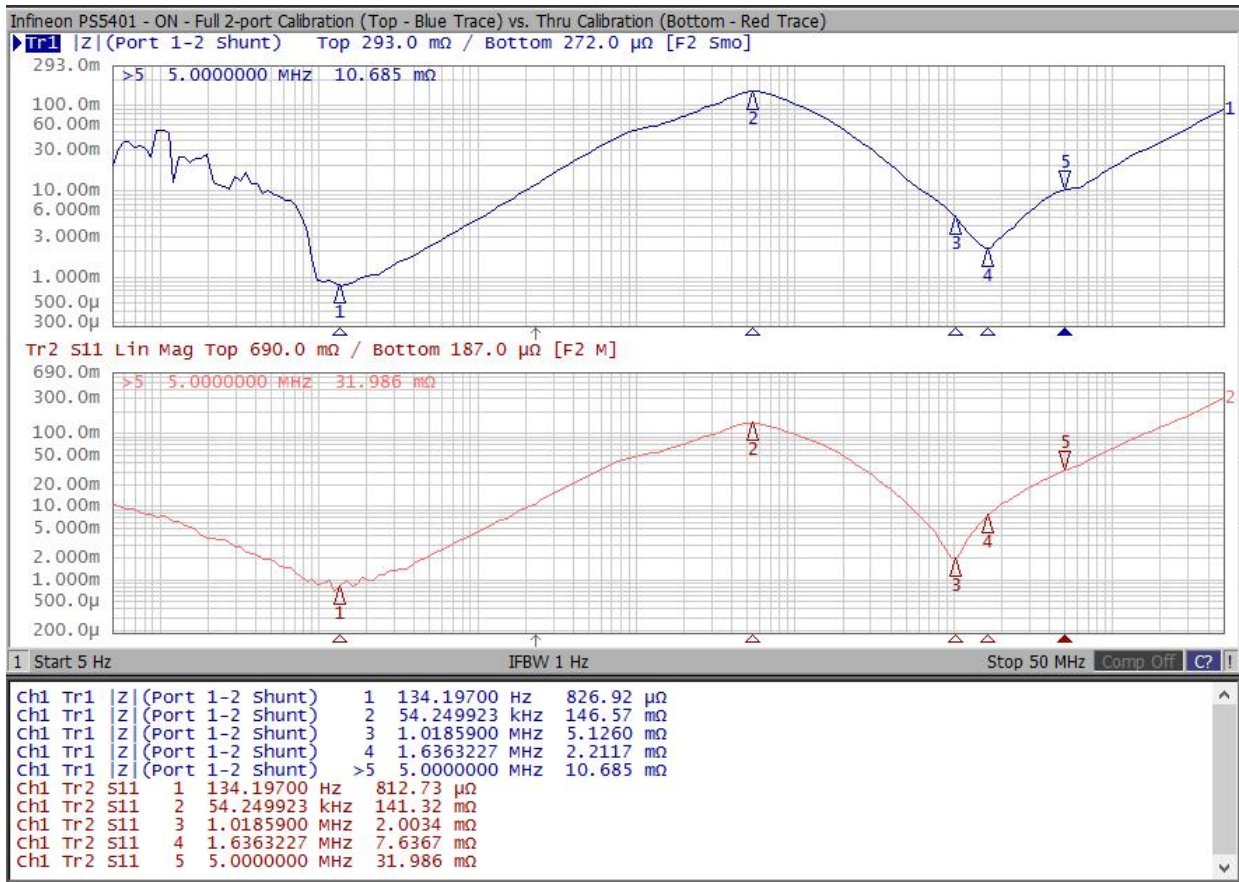
Step 27: Select > **Return** (to return to E5061B Menu)

开始对DUT进行测量...

与仅通过校准方法相比，通过使用全2端口校准方法可以进一步提高测量精度。直通校准方法不考虑电感耦合误差。图21和22提供了两个示例，比较了使用全2端口校准方法与Thru方法时由于电感耦合引起的测量误差。



**Fig. 21 - LM20143 NF - Measurement Results using Full 2-port calibration (BLUE) vs. Thru calibration method (RED) with the E5061B, P2102A, and J2102B Common Mode Transformer.**



**Fig. 22 - Infineon PS5401 ON - Measurement Results using Full 2-port calibration (BLUE) vs. Thru calibration method (RED) with the E5061B, P2102A, and J2102B Common Mode Transformer.**

如图21所示，与LM20143非平坦DUT上的全通量校准测量相比，全2端口校准测量在10 MHz下观察到了37mΩ的差异。图22也显示了类似的结果，与Thru校准方法相比，使用全2端口校准方法在5 MHz处观察到21mΩ的差异。

### 5.0 结论

此处显示的2端口并联-直通阻抗测试方法是测量VRM的输出阻抗和控制环路增益（相位）稳定性的黄金标准。



P2102A探头使您能够非常简单，快速和准确地进行2端口阻抗测量，从而有助于更好地设计PDN并提供快速的GO / NO-GO测试。测量阻抗时，我们不仅可以确定VRM的稳定性，还可以确定电源传输网络的组成。我们甚至可以通过阻抗测量来创建VRM的高精度模型，其中包括时域，频域甚至是与EMI相关的数据。我们可以分辨出阻抗的哪些部分基于控制环路性能，哪些部分基于印刷电路板和/或去耦性能。通过良好的校准，如图22中的结果所示，使用P2102A探头和E5061B VNA可以实现低于 $1\text{m}\Omega$ 的阻抗测量。

如果您真的想测量平面或高频阻抗，则可以使用P2104A 1端口探头[13]可能是一个更好的选择。

如本文档所示，要使用带有P2102A探头的E5061B VNA进行低阻抗测量，请执行以下操作：

- 必须使用正确的（低电感）探头，高质量的电缆和共模变压器（J2102B）。
- 您必须正确校准，因为这对于实现高保真度测量和消除测试设置错误的来源至关重要。
- 必须施加一致的，可重复的接触电阻，以施加一致的尖端压力。可以使用所示的N2787A探针支架，ClampMan [14]或PacketMicro的探头支架之一来完成此操作。

## 6.0 References

1. Ultra-low Impedance (20 micro ohm) Measurement using 2-Port Shunt-Through - <https://www.picotest.com/images/download/Ultra-low.pdf>
2. NISM - <https://www.picotest.com/measurements/NISM.html>
3. Keysight E5061B Vector Network Analyzer - <https://www.keysight.com/us/en/product/E5061B/e5061b-ena-vector-network-analyzer.html>
4. Picotest P2102A - 2 Port PDN Transmission Line Probe - [https://www.picotest.com/products\\_PDN\\_Probe.html](https://www.picotest.com/products_PDN_Probe.html)
5. Picotest J2102B-N - Common Mode Transformer - [https://www.picotest.com/products\\_J2102B.html](https://www.picotest.com/products_J2102B.html)
6. Picotest J2160A 2-Port Probe Adapter Panel for E5061B - [https://www.picotest.com/products\\_J2160A.html](https://www.picotest.com/products_J2160A.html)
7. Picotest PDN Cable® - <https://www.picotest.com/pdn-cable.html>
8. Pasternack PE9002 - N Male to BNC Female Adapter - <https://www.pasternack.com/n-male-bnc-female-straight-adapter-pe9002-p.aspx>
9. Keysight 3D Probe Positioner - N2787A - <https://www.keysight.com/en/pd-1643963-pn-N2787A/3d-probe-positioner?cc=US&lc=en>
10. DUT - Picotest LM20143 - [https://www.picotest.com/products\\_LM20143.html](https://www.picotest.com/products_LM20143.html)
11. DUT - Infineon PS5401 Eval - [https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/eval\\_ps5401-int/](https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/eval_ps5401-int/)
12. J2113A Semi-Floating Differential Amplifier - [https://www.picotest.com/products\\_J2113A.html](https://www.picotest.com/products_J2113A.html)
13. Picotest P2104A 1-Port Probe - coming 2021 to [https://www.picotest.com/products\\_PDN\\_Probe.html](https://www.picotest.com/products_PDN_Probe.html)
14. ClampMan PCB Holder and Clamping Solution - [https://www.picotest.com/products\\_clampman.html](https://www.picotest.com/products_clampman.html)
15. PacketMicro TP150 Precision Positioner - [https://www.picotest.com/products\\_TP150\\_Precision\\_Positioner.html](https://www.picotest.com/products_TP150_Precision_Positioner.html)