

The 2-Port Shunt-Through Measurement and the Inherent Ground Loop

2 端口并联-直通测量和固有接地环路

2 端口并联直通测量是测量毫欧阻抗的黄金标准，同时支持在非常高的频率（GHz）下进行测量。这些功能使其非常适合在电路和组件级别上测量配电网络（PDN）阻抗。本应用笔记展示了如何使用市售的矢量网络分析仪（VNA）进行 2 端口并联-直通阻抗测量。

不幸的是，该测量包括与仪器接地和测试装置电缆相关的不良接地回路。如果不进行校正，则接地回路会引入明显的误差。本应用笔记展示了如何使用 Picotest J2102A 或 J2113A 接地环路断路器消除接地环路。Picotest 解决方案可与任何商用 VNA，示波器或频谱分析仪一起使用。

测量示例

使用 Bode 100 VNA 和 Picotest J2102A 和 J2113A 随频率测量已知的 1mΩ 电阻器的阻抗。可以使用类似的方法来测量任何 PDN 阻抗，甚至低至微欧。

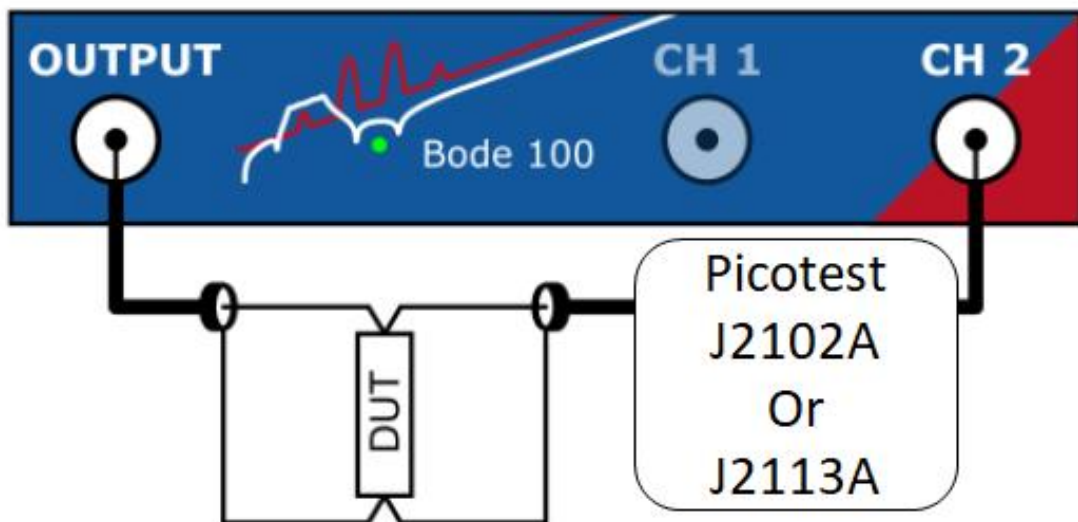


图 1：使用 OMICRON Lab Bode 100 VNA 和 Picotest J2102A 或 J2113A 进行 2 端口并联-直通阻抗测量的设置。ZDUT $\ll 50\Omega$ 。

图 1 显示了用于在 2 端口并联-直通配置中测量阻抗的测量设置。如果 ZDUT $\ll 50\Omega$ ，则该设置有效。OMICRON Lab Bode 100 既是 50ΩVNA 又是频率响应分析仪（FRA），在本应用中用作 VNA。

2 端口并联-直通测量原理

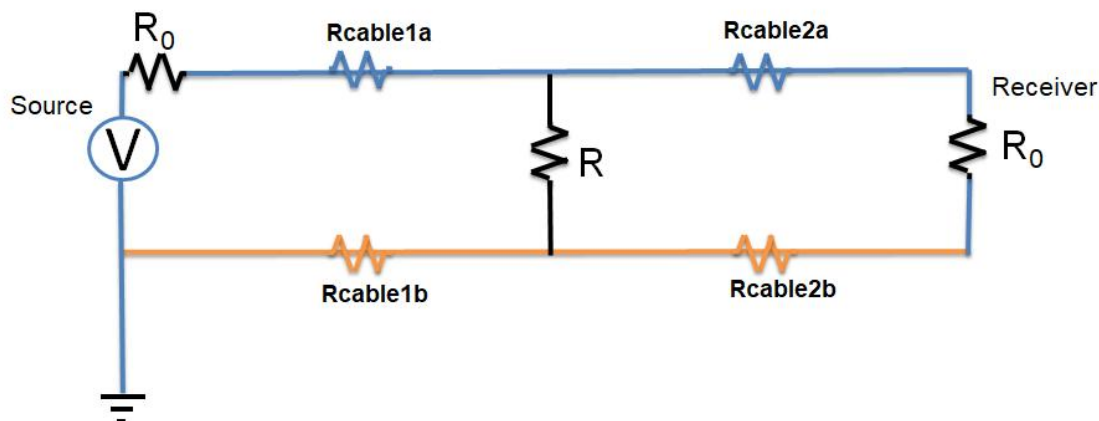


图 2：用于测量阻抗“R”的 2 端口并联-直通测量电路图。

图 2 显示了在 2 端口并联-直通测量中测量小值电阻器的电路配置。根据 S21 的定义[2, pp. 2-3],

$$S_{21} = \frac{V_2 + I_2 R_0}{V_1 + I_1 R_0} = \frac{2R}{2R + R_0} \quad (1)$$

因此我们得到 R。

$$R = \frac{25 * S_{21}}{1 - S_{21}} \cong 25 * S_{21} \quad (2)$$

假设 $R_0 = 50\Omega$ ，并且 $S_{21} \ll 1$ （对于非常小的阻抗幅度或电阻，这是正确的，即 $R \ll R_0$ ）。在 2 端口并联-直通测量中，公式 1 不太直观。[21, pp. 2]中显示了 S21 定义的另一种表示形式。

$$S_{21} = \sqrt{\frac{\text{Power absorbed by Receiver when R is present}}{\text{Power absorbed by Receiver when R is absent}}} = \frac{2R}{2R + R_0} \quad (3)$$

简化后，公式 3 得出 S21 的相同值。此处的区别在于，这使 S21 发生了直观的感觉。如果源和接收机的阻抗是固定的，则对于 VNA 而言，分母是恒定的。Steve Sandler 在其论文“扩展 2 端口并联-直通阻抗测量的可用范围”中提出了一个例外情况[3]。在此，增加源 R₀ 以移动测量窗口。通过添加一个外部电阻（例如 450Ω）将源 R₀ 增加到更高的值，并且对于 50ΩVNA，源 R₀ 现在变为 500Ω。假设我们感兴趣的频率范围使得外部电阻在电气上非常小，并且在该频率下是集总元件。我们在这里要做的是减少可从 VNA 发出的最大功率，这会增加可测量的阻抗范围。应当注意，灵敏度是 VNA 的固有属性，不会改变。

在等式 3 中，S21 是接收机 R₀ 中接收功率的平方根，该平方根由不存在 DUT 时可能已经接收到的功率缩放。让我们看一下这在 2 端口阻抗测量中的影响。 $R = 25 * S_{21}$ ，并且当接收功率增加时，S21 增加。

接收功率的任何增加都将反映为 R 的增加。这对于理解接地环路问题很重要。

非理想性和固有的接地回路

像所有其他测量一样，2 端口并联-直通测量也存在不理想的问题。图 3 显示了两个非理想情况，

1. 电缆损耗
2. 接地回路

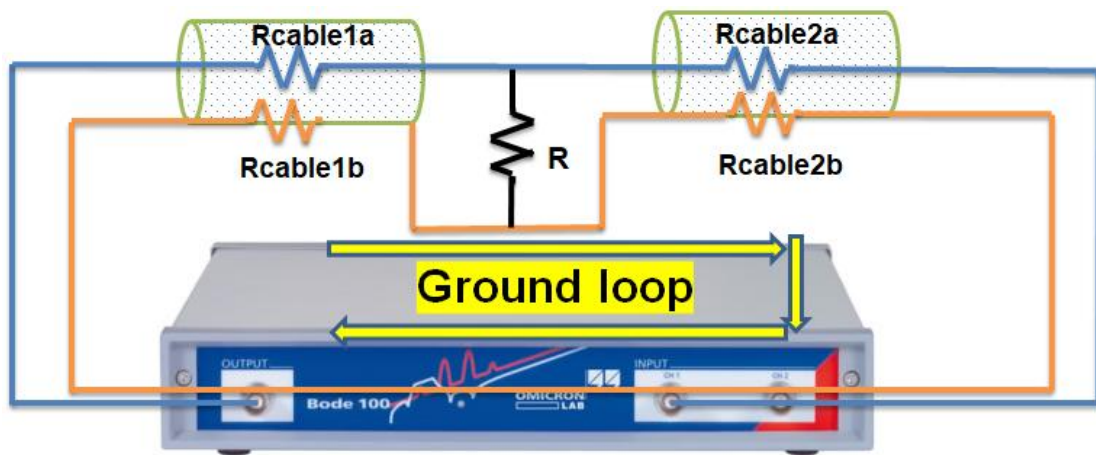


图 3：2 端口并联-直通测量中添加的非理想情况。

每条电缆都会有电缆损耗，在图 3 中将其标记为电缆电阻。由于国家电气法规 (NEC) 对公共安全的要求，VNA 的所有接地都必须连接在一起。这在 2 端口并联-直通测量中形成了一个接地环路，如图 3 所示。

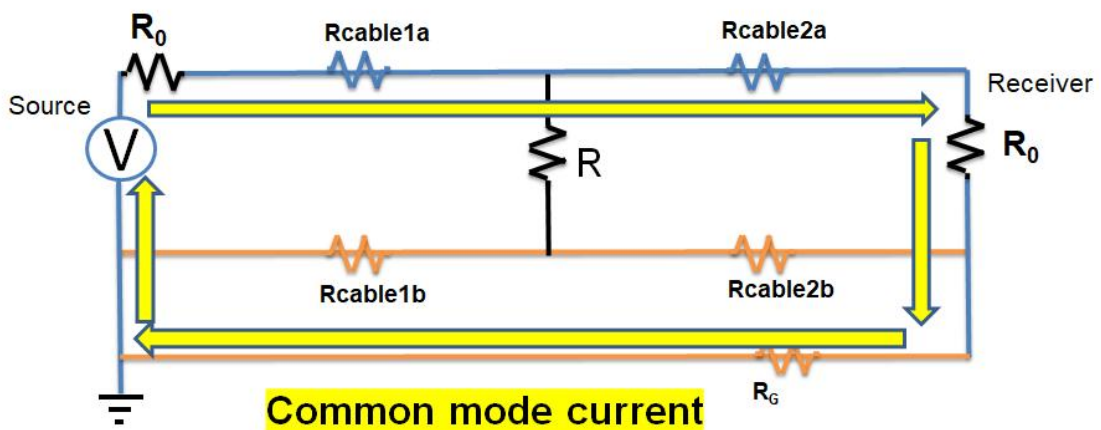


图 4：由于接地回路而形成的共模电流。

图 4 显示了信号电流返回的替代路径，称为共模电流。接地线的添加建立了该路径。如果不存在该路径，则所有电流都将通过电缆返回。新路径为电流新建了一条附加路径，该路径取决于 R_G 的值。在几乎所有的 VNA 中， $R_G \ll R_{cable1b}$ 和 $R_{cable2b}$ 。因此，与没有此额外路径的情况相比，额外电流将大得多。这个额外的电流会在接收器中增加更多的功

率，从而使接收器的功率增加 S_{21} ，进而使估计的 R 变为 $25 * S_{21}$ 。这是测量中的错误，与 R 的实际值无关。因此，这将被视为错误。

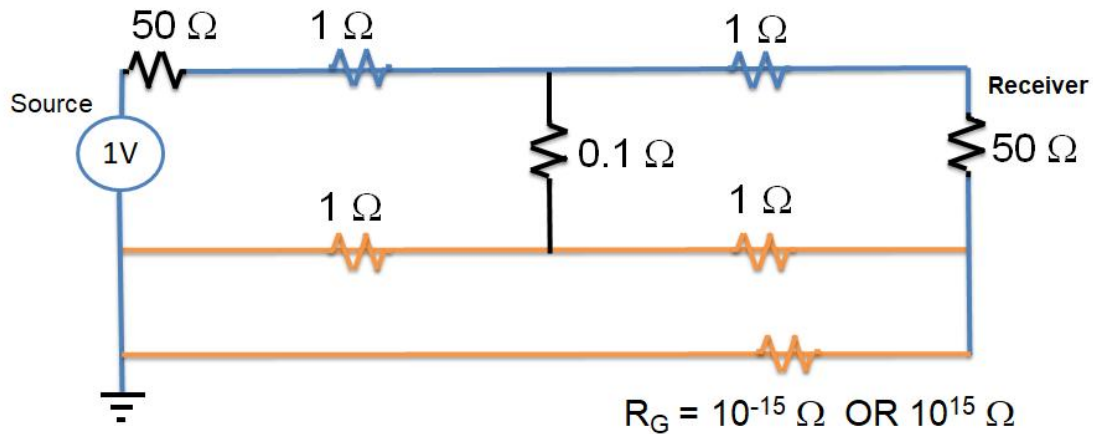


图 5：估算接地环路误差的示例。

让我们举一个例子来估计由接地回路产生的共模电流会产生多少误差。图 5 显示了一个示例，其中研究了具有接地回路和不具有接地回路的两种情况。在环路中放置一个小电阻 ($R_G = 10^{-15}\Omega$) 以模仿接地环路连接，在环路中放置一个大电阻 ($R_G = 10^{15}\Omega$) 以模仿接地环路连接。在这两种情况下，可以使用任何 SPICE 程序来解决该电路，以估算接收器消耗的功率，

1. $R_G = 10^{-15}\Omega$
2. $R_G = 10^{15}\Omega$

我们可以使用公式 3 来估算 S_{21} 。分母， R 不存在时接收机吸收的功率 = 5 mW（忽略了电缆损耗，并假定没有通过校准进行端口扩展）是可以从电源传输的最大功率。对于 VNA，这是一个常数。这两种情况的 S_{21} 是

$$S_{21} = \sqrt{\frac{2.539751\mu\text{W}}{5\text{mW}}} = 0.022538$$

$$S_{21} = \sqrt{\frac{67.861312\text{nW}}{5\text{mW}}} = 0.0036841$$

正如我们在情况 1 中所预期的，由于较高的共模电流，接收机消耗的功率更多。根据 $R = 25 * S_{21}$ 从 S_{21} 估算的 R 为，

1. $R = 0.56344$
2. $R = 0.092101$

接地回路引起的误差接近 460%。情况 2 的小偏差来自我们的近似值和假设。该示例已针对 DC 完成。对于 AC 情况也可以执行相同的方法。这留给有兴趣的读者。

从该示例中可以明显看出，我们需要最小化共模电流，这会在 2 端口并联-直通测量中造成很大的误差。

接地回路问题的解决方案

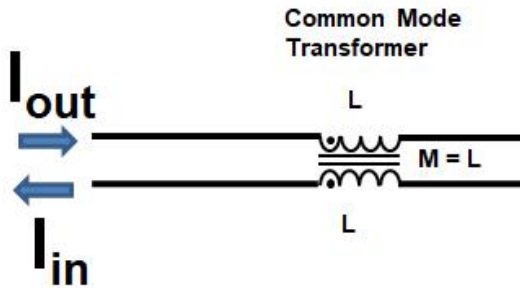


图 6：同轴变压器电路。

最小化测量误差的明显方法是最小化共模电流。Picotest 有两种解决方案可最大程度地降低共模电流：

- 1.同轴变压器-J2102A
- 2.半浮点差分放大器-J2113A

同轴变压器-J2102A

解决接地环路问题的第一个解决方案是引入高质量的 50Ω 共模变压器或同轴变压器。顾名思义，它会阻止共模电流。图 6 显示了共模变压器的等效电路。共模变压器位于铁氧体磁芯上，因此当 $I_{out} = I_{in}$ 时，电感产生的电流为 0。该电流的一部分称为差分电流。这是有助于正常运行的电流。当一部分电流流过一个而不流回另一个时，称为共模电流。共模变压器对这种电流表现出很大的电感，并有效地阻止了这种情况。

阻塞的量（称为衰减）在很大程度上取决于变压器的设计。由于该变压器不应影响正常操作（VNA 测量操作），因此设计时应使差动电流看到的阻抗为 50Ω。同轴变压器的一个重要考虑因素是，由于它是变压器，因此对直流电无效。实际测量表明，根据电缆长度和特性，Picotest J2102A 可以在大约 3 kHz 以上的频率下工作。共模变压器有效的最大频率取决于磁芯，并取决于材料的质量。当 J2102A 连接到接收器环路中时，观察到更好的测量结果，如图 7 所示。

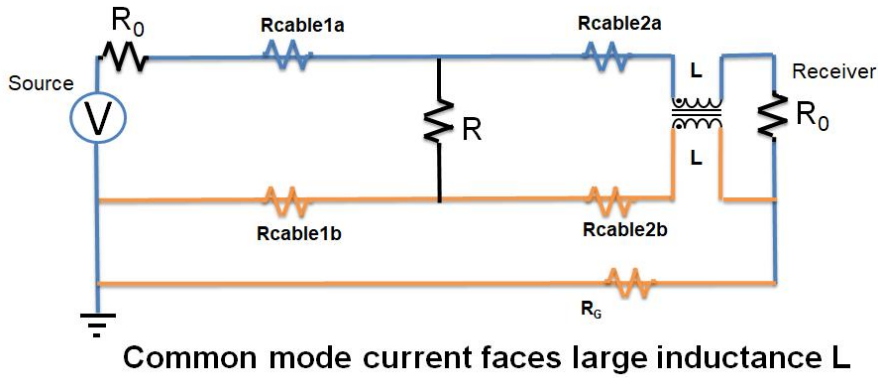


图 7: 2 端口并联-直通测量电路中包含的共模变压器 (J2102A)。

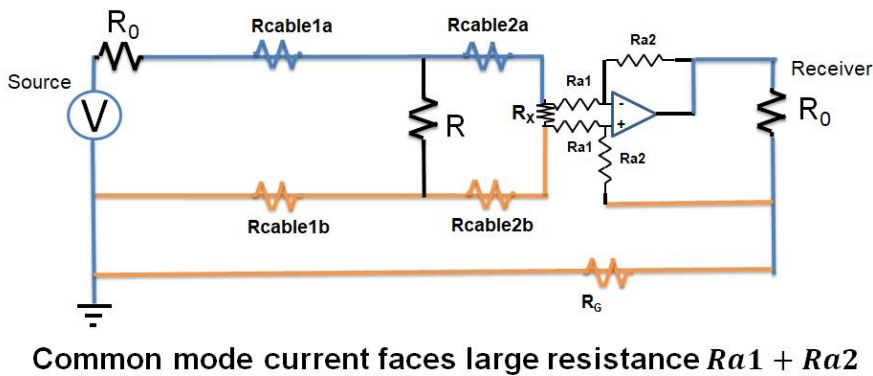


图 8: 2 端口并联-直通测量电路中包含的半浮点差分放大器 (J2113A)。

半浮点差分放大器-J2113A

接地环路问题的第二种解决方案是通过在测试装置中引入一个半浮动差分放大器来实现的。半浮动差分放大器对共模电流具有较大的电阻。由于这种电阻，半浮空放大器在 DC 上也有效。当 J2113A 连接在接收器环路中时，与 J2102A 相比，可以获得更准确的测量结果，如图 8 所示。

建立连接

高保真度测量需要高质量的电缆和探头，并具有很高的屏蔽效果。有时，交流耦合测量也很重要，以最大程度地减小直流负载，或者测量的工作电压可能超过 VNA 的限制。Picotest PCK01 是高性能电缆和连接器套件，而 Picotest P21B01 包括高质量探头和 DC 模块。通过将元件安装在特定的印刷电路板上，可以实现测量大容量电容器和去耦电容器时的最高精度。Picotest DTBK01 套件包括大多数标准尺寸，并包含去嵌入数据，以消除测量中 PCB 的寄生现象。

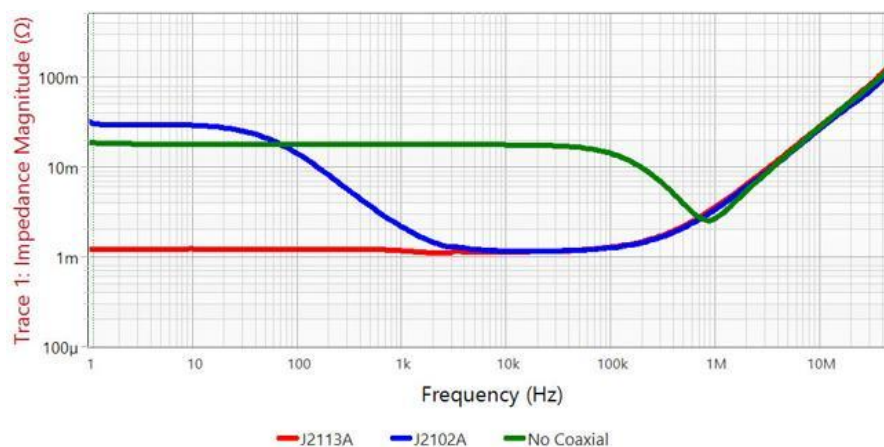


图 9：针对 2 端口并联-直通阻抗测量中的接地环路问题的 Picotest 解决方案的比较，同时测量 1mΩ电阻。

图 9 显示了比较两种 Picotest 解决方案的实验结果，以及没有突破性解决方案的测量结果。图 10 显示了安装在 Picotest DTBK01 套件随附的一块板上的测得的 1mΩ电阻。使用提供的文件去嵌入。两种 Picotest 解决方案都放置在接收器环路中，如图 1 所示。



图 10：在 1 个 Picotest DTBK01 测试板上安装的测得的 1mΩ电阻。

结论

Picotest J2102A 或 J2113A 产品消除了用于测量 2 端口并联-直通结构中任何阻抗的任何商用 VNA 中的接地环路。该接地回路存在于其他仪器和测试设置中，并且 Picotest 产品也同样有效。有关其他信息和产品，请访问 <https://www.picotest.com/measurements/2-port.html>。

References

- [1] K. Kurokawa, "Power waves and scattering matrix," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-13, pp. 194–202, May 1965.
- [2] R. W. Anderson, "S-parameter techniques for faster, more accurate network design," *HP applicaton note 95-1*, Feb. 1967.
- [3] S. M. Sandler, "Extending the usable range of the 2-port shunt through impedance measurement," *IEEE MTT-S Lat. Am. Microw. Conf. (LAMC)*, pp. 1–3, Dec 2016.