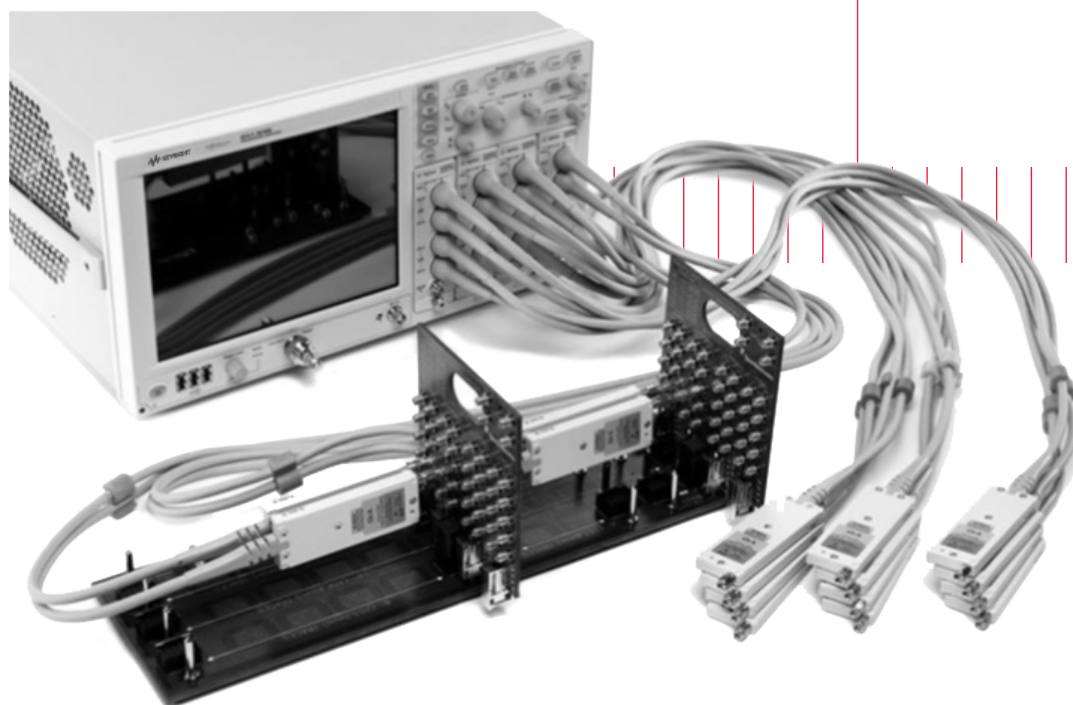


是德科技

高精度时域反射计 (TDR)

应用指南



简介

高性能通讯系统需要具备优质的电信号传输路径。为获取高效信号流和出色的信号完整性，传输路径阻抗应尽可能保持理想恒定值。时域反射计（TDR）是一项成熟的技术，可用于验证元件、互连与传输线路的阻抗和信号路径质量。

在信号完整性阻抗测量中
用于尽可能提升精度与分辨率的相关技术

随着数据速率增长和元件几何结构的简化，基础 TDR 测量系统的精确性和分辨率可能受到一定限制。本应用指南将说明测量系统的极限和测量误差来源，此外，还将介绍可提升精确性的实用技术和有效方法。

特定主题包括：

- 用于消除夹具效应（影响测试元件分析的布线和连接）的技术
- 实现差分传输系统高精度 TDR 测量的方法
- 推导单端口、双端口或四端口 S 参数，深入了解元件性能并提升建模精度

时域反射计: 测量基础

信号沿传输路径发射时，理想情况下，信号均不应被反射回信号源，即所有信号能量均应抵达预期目标位置。如果整条传输路径和线路终端的阻抗与信号源输出阻抗相当，则会出现上述情况。但是，如果阻抗出现变化，则部分事件信号可能会反射。

时域反射计（TDR）是一款用于测量被测元件（器件）（DUT）阻抗剖面的测量工具。其概念简明直接。使用阶跃发生器和示波器，可向被测器件发送快速脉冲边缘。如果阻抗中断，部分脉冲将返回到监控示波器。通过监控反射信号抵达示波器的时间（以及被测器件内脉冲传播速率）可确定中断位置。此外，可通过对比反射脉冲与被测器件所接收的原始脉冲的大小，确定中断幅值。因此，这一“回波技术”可轻松确定线路内阻抗是否发生变化。使用分析技术，可揭示线路内中断现象的本质（电阻式、电感式或电容式），并确认传输系统内的衰减是由串联损耗还是由分流损耗引发。示波器显示屏上将即时显示上述信息。与其他反射计方法仅在固定频率范围内进行测试不同，由于快速脉冲阶跃激励属宽带激励，因此，TDR 可提供与传输系统宽带相应相关的重要信息。

图 1 显示了构成 TDR 的设备配置示例和部分说明性测量结果。

如需 TDR 基础知识的扩展教程，请参阅是德科技应用指南《时域反射计理论》

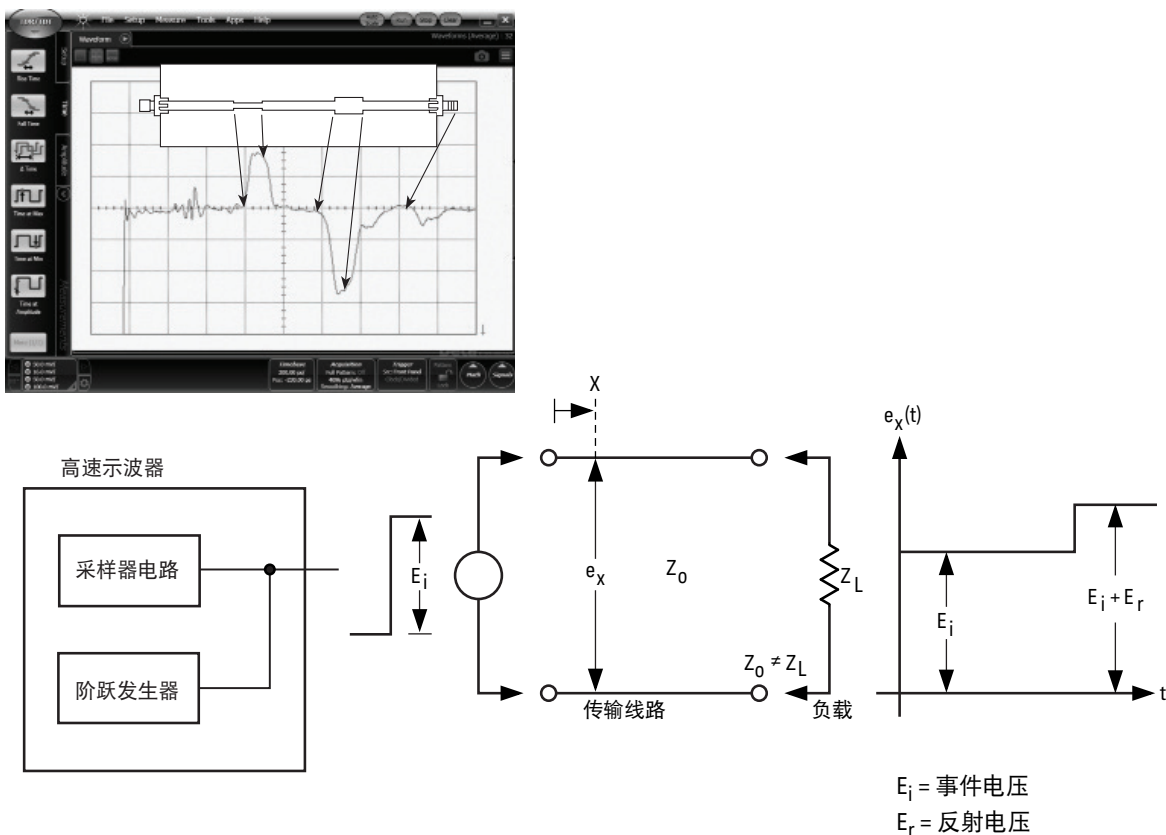


图 1: 基础 TDR 概念

TDR 测量限制

TDR 系统的基础性能决定了它的测量能力。以下因素会影响 TDR 系统的总体性能：

阶跃信号发生器是一个误差来源

阶跃激励信号的形状对于 TDR/TDT 测量的精确性非常重要。DUT (被测器件) 不仅对阶跃信号会做出响应, 对阶跃信号的畸变 (例如过冲和不平坦) 也会做出响应。

如果过冲很大的话, 那么 DUT 的响应可能会更难以解释。随着反射信号的变化, 我们会观测到阻抗不连续性。TDR 阶跃的畸变可能无法正确解释为 DUT 的缺陷。如果阶跃平坦, 就能够最大程度地减少猜测。阶跃的上升时间也极为重要。为了确定 DUT 实际上将做出何种响应, 您应该以其在实际使用过程中会遇到的边缘速度进行测试。

在使用 TDR 来定位传输线路中不连续性来源时, 边缘速度也非常关键。示波器的带宽和阶跃信号源的上升时间都可能会影响测量精度。整个测量系统的上升时间由示波器和阶跃信号发生器两者的上升时间共同决定。它的值可使用公式 1 进行估算。

$$\text{公式 1: } t_{r\text{系统}} = \sqrt{t_{r\text{阶跃信号发生器}}^2 + t_{r\text{示波器}}^2}$$

真实的系统具有有限的上升时间, 它起到了低通滤波器的作用。如果测量系统过慢, 可能会掩盖甚至完全埋没不连续性的本质。TDR 也可能会过快, 从而产生不适合实际使用的结果。(一般而言, 反射性能会随着边缘速度发生变化, 因为反射量由频率决定。这一点可以在使用网络分析仪的回波损耗测量轻松观测到。若将反射的信号量为频率的函数, 通常就会发现, 随着频率的升高, DUT 反射回的信号幅度也会增大。) 注意图 2 中显示的对一个 50Ω SMA-BNC 适配器的测量结果, 随着阶跃激励信号上升时间的减小, DUT (如果以高数据速率使用) 所产生反射的性质变得越来越明显。阶跃速度为 100 ps 时, 仅能在大约 56Ω 处看到一个反射。当边缘速度加快

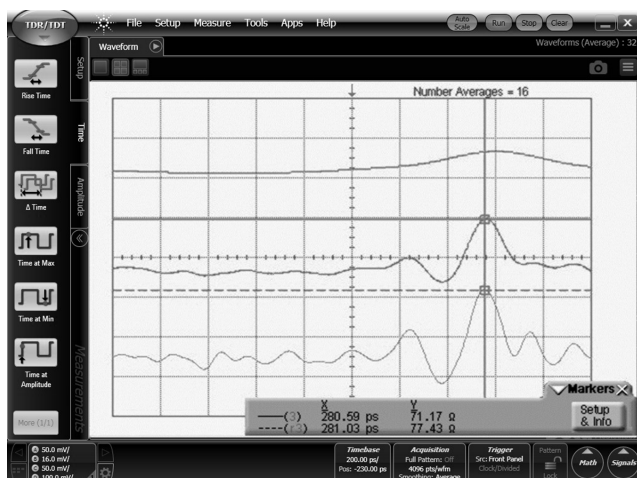


图 2: 反射由边缘阶跃速度决定。

到 35 ps 时, 可以看到更多的反射点, 最明显的反射点位于 71Ω 处。阶跃速度达到 20 ps 时, 阻抗不连续性增大至 77Ω 以上。在这三次测量中, 使用 20 ps 上升时间的阶跃激励信号获得的结果, 并不适用于在实际使用中边缘速度总是慢于 100 ps 的连接器。因此, 该连接器可以使用 100 ps 的边缘速度而非 20 ps。另一方面, 运行速率不低于 10 Gb/s 的系统将包含上升时间可能小于 30 ps 的信号。支持 40 Gb/s 传输速率的元器件可使用 10 ps 以下的边缘速度。因此, 当需要分析在不同数据速率下使用的元器件时, 边缘速度更灵活的 TDR 会很有用。

信号完整性以及故障分析通常需要能够定位和区分多个间距较近的反射点。TDR 可以分辨两个间隔大约为 TDR 上升时间一半的不连续点。高性能 TDR 系统的上升时间 (包括阶跃信号发生器和示波器) 小于 10 ps。在介电常数接近 1 的材料中, 这相当于大约 1.5 mm 的物理间隔。(请参阅“使用非常快的边缘速度精确测量间隔较近的反射点”。) 通常, 印刷电路板材料的介电常数大约为 4。那么可测量的间隔就小于 1 mm (如果信号场在空中, 此值将会更大, 就和电路板的介电常数一样)。还请注意, 质量较差的电缆和连接器 (后面会介绍) 也可能会拖慢系统的有效上升时间, 并降低双事件分辨率。

电缆和连接器会产生损耗和反射

阶跃信号源、DUT 和示波器之间的电缆和连接器对测量结果有很大的影响。阻抗失配以及存在缺陷的连接器都会增加实际被测信号的反射。这可能会导致信号失真, 使用户很难确定哪些反射来自于 DUT、哪些反射来自于其他来源。

此外, 电缆不是完美无暇的导体, 随着频率的升高, 它会变得不那么理想。频率越高, 电缆的损耗就越大, 边缘的上升时间随之变长, 导致边缘在接近最终值时出现偏差。于是, 由于电缆的原因, 导致现在出现了与上述阶跃信号发生器性能有关的问题, 从而使得原本非常不错的阶跃信号发生器变差。图 3 说明了电缆和连接器如何影响 TDR/TDT 测量结果。最快的波形是短路电路直接连接 TDR 时产生的阶跃信号反射。(之前提及过, 短路电路返回的信号会使阶跃信号发生器输出反转, 而信号又必须要输出并通过电缆返回)。第二快的阶跃发生在短路电路通过 1 米优质电缆连接 TDR 时。第三快的阶跃发生在短路电路通过 0.6 米便宜电缆和 SMA 连接器连接 TDR 时。这里要务必注意, 电缆可能会降低 TDR 测量系统的精度。

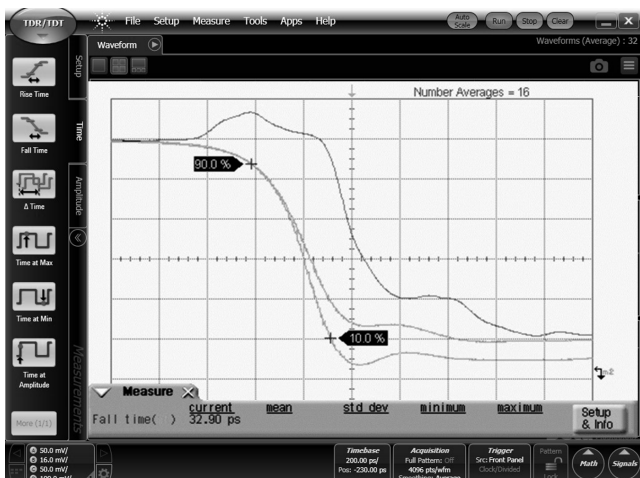


图 3: 电缆和连接器如何导致 TDR 性能下降。

最大限度减少夹具影响的方法

使用 TDR 搭配可直接连接到 DUT 的远程测量前端（无需适配器或电缆），将有助于最大程度地减小系统测量误差，但并不能完全消除此误差。如果需要使用适配器、探头或非同轴电缆来连接 DUT，那么有可能增加杂散反射和系统损耗，使得测量结果的准确性下降。由于这些误差机制是固定的、系统性的，因此有机会利用校准方法来大幅提高测量精度，并最大程度地减小这些会造成误差的效应。

其中一种消除系统测量误差的技术就是波形相减。在此方法中，先用一个理想的 DUT 连接至系统，并记录 TDR 波形。而后再测试其他的 DUT，并从当前迹线中减去记录的迹线。如有差值，即表明 DUT 偏离了理想状态。两条迹线都有系统误差，用户可以有效地加以清除。这种方法可以非常简单而方便地提高精度，但是也有很大的局限性。首先，它需要一个理想的参考 DUT。这种 DUT 可能根本不存在，或者很难实现这个要求。其次，所有结果都是相对的。很难去判断 DUT 的绝对性能。最后，到达 DUT 的阶跃信号质量有可能下降。虽然这种效应对于参考和 DUT 测量很常见，但是会严重限制 TDR 的性能。

另一种校准方法的原理是使用精密的标准件或“已知性能的”器件表征测试系统。但是这种方法不是为了产生一条参考迹线，用于波形相减，而是能够将测试系统的系统性响应从 DUT 响应中完全清除出去。这个过程常被称为 TDR 校准，作为一种简单但是又非常有效的方法，可以利用 TDR 获得精确的测量结果。

除了校准方法有效之外，实施程序也非常简单，只需要几个基本的步骤即可。校准测量在表征测试系统时使用了的电缆和连接器，无需使用 DUT。校准的第一部分是使用电子校准件或优质的短路、开路 and 负载校准标准件代替 DUT 来测量响应，以消除由触发器耦合、通道串扰以及电缆和连接器反射所引起的系统误差。根据这些测量结果，可以推导出测试系统的频率响应。

优质的电子校准件或校准标准件随附提供表征数据。整个 TDR 校准流程将使用这些表征数据来确定预期的测量结果（也就是使用理想的 TDR 系统测量每个标准件时，将会得到的测量结果）。标准件的实际测量结果与预期测量结果之间的差异是由测试系统导致的，可通过数字滤波进行校正。这就是为什么必须要使用质量优异且经过正确表征的校准标准件。如果使用数字滤波器校正表征不当或损坏的校准标准件，很可能会增大系统误差。

生成数字滤波器

校准的第二部分是生成一组数字滤波器。这将自动完成，无需用户输入任何内容。数字滤波器将补偿测试系统频率响应与理想状态的差异。在完成 TDR 校准后，如果测量用于校准的标准件，其结果应与该标准件的预期测量结果一致。滤波器将根据需要对频率响应的分量进行衰减或放大以及移相，从而消除误差。例如阶跃激励信号上的过冲。如果不校准，那么 DUT 的频率响应将包含对过冲的多余响应。在校准期间，滤波器将对造成过冲的频率进行移相和衰减，从而校正 DUT 对过冲的响应。这种滤波器同样可用于校正由于高频衰减导致的电缆损耗。

通过校准产生的数字滤波还能用于调整 TDR 阶跃信号发生器的有效上升时间,从而减慢或加快是德科技 TDR 模块的阶跃,进而仿真快速或慢速电信号。在是德科技 86100 中,用户指定的上升时间决定了滤波的带宽。通过对超出指定带宽的频率加以衰减,可以减小带宽。增大带宽需要更全面的考虑。要增大带宽,需要将超出初始 -3 dB 频率响应的响应放大。虽然这是一个有效步骤,但是务必要注意,这些频率以及附近更高频率上的系统噪声也会放大。真实系统上升时间可以扩展到多大,由本底噪声决定。在真实系统中会有一个极限点,超过这个点,频率响应幅度数据会低于本底噪声。再进一步增大带宽只会增大噪声,从而导致测量结果不准确。由于波形平均可降低本底噪声的初始电平,因此在使用校准特别是减小阶跃信号发生器上升时间时,应使用波形平均功能。

测量示例:

在以下测量示例中，我们测量了图 4 中使用的简易印刷电路板传输线路（这段传输线路同时有高阻抗部分和低阻抗部分）。但是，将一段相同的传输线路与第一段串联。理想情况下，第二段线路的测量结果应与第一段相同。但是，第一段线路的反射和衰减会大幅降低第二段线路的测量精度，如下图所示。

通过校准产生的数字滤波还能用于调整 TDR 阶跃信号发生器的有效上升时间，从而减慢或加快是德科技 TDR 模块的阶跃，进而仿真快速或慢速电信号。在是德科技 86100 中，用户指定的上升时间决定了滤波的带宽。通过对超出指定带宽的频率加以衰减，可以减小带宽。增大带宽需要更全面的考虑。要增大带宽，需要将超出初始 -3 dB 频率响应的响应放大。虽然这是一个有效步骤，但是务必要注意，这些频率以及附近更高频率上的系统噪声也会放大。真实系统上升时间可以扩展到多大，由本底噪声决定。在真实系统中会有一个极限点，超过这个点，频率响应幅度数据会低于本底噪声。再进一步增大带宽只会增大噪声，从而导致测量结果不准确。由于波形平均可降低本底噪声的初始电平，因此在使用校准特别是减小阶跃信号发生器上升时间时，应使用波形平均功能。

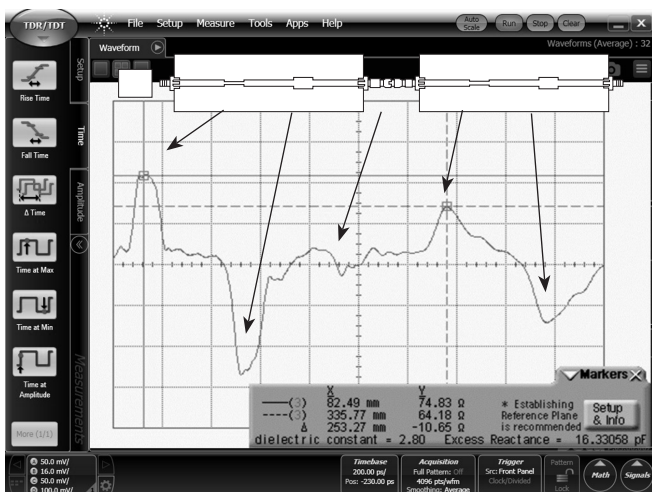


图 4：对两条串联多阻抗传输线路进行 TDR 测量的结果。

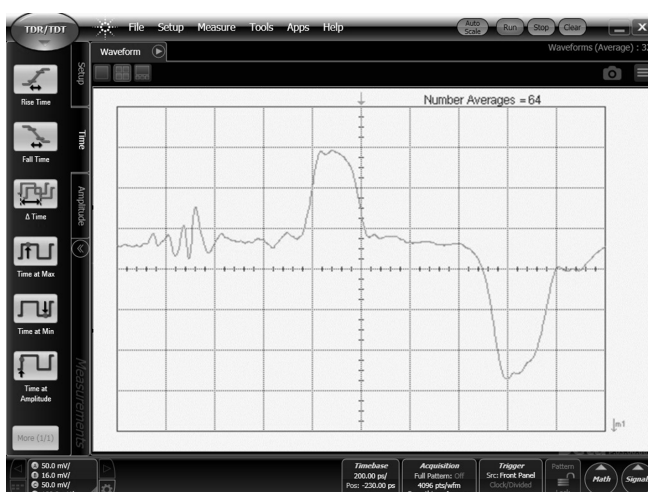


图 5：第一个印刷电路板的视图。

上述两张图片中，第一张显示了第一段线路的测量结果，第二张显示了第二段传输线路的测量结果。请注意，第二段线路虽然与第一段线路相同，但是测量结果与第一段线路相比，有明显的衰减和模糊。这也证明了连接 DUT 的电缆和夹具可能会显著改变 TDR 结果。

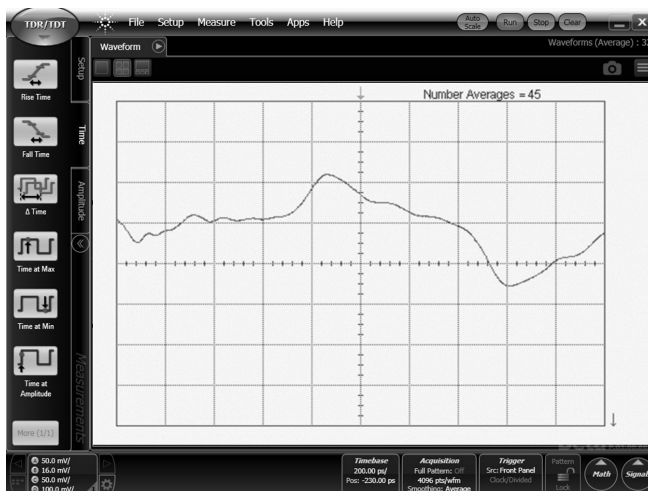


图 6：第二个印刷电路板的视图。

校准可以显著提升测量结果精度。中断两段传输线路之间的连接之后，可在第一段线路的输出端设置短路和负载端接。这随后将变成测量参考面。然后校准程序将校正此点之前产生的测量误差。

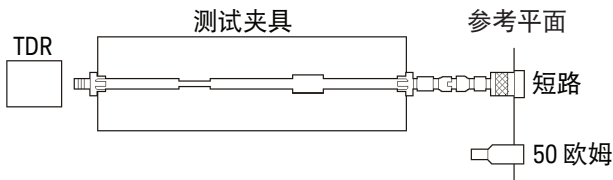


图 7：校准装置。

校准完成后，就可以看到第二个电路板的测量结果。请注意，要分两步消除第一个电路板的影响。首先，从结果中有效地清除第一段传输线路的反射。然后，再消除第一段传输线路对第二段线路测量的影响。第二段线路的测量结果现在与图 1 中所示的线路直接测量结果高度一致。

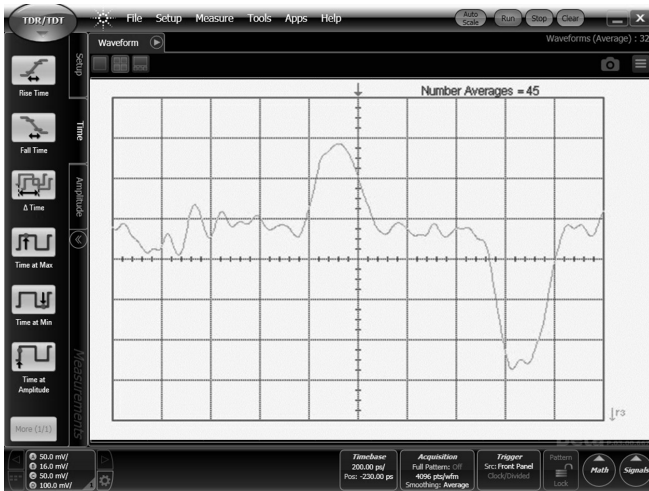


图 8：通过校准消除测试夹具的影响。

当 DUT 不是同轴元器件时，校准能够显著改善元器件测量。电路板探测就是一个很好的例子。使用 TDR 时，我们需要使用某种形式的夹具来连接 TDR 的同轴系统和非同轴 DUT。适合的适配器和夹具将会遮蔽非同轴 DUT 的真实性能。但是，通过校准，可以显著缓解这一问题。当可以在 DUT 的原生环境中测量短路和负载端接时，就可以做到这一点。例如，使用探测校准标准件来消除探测系统的影响。

校准的另一个好处就是能够有效地加快或减慢 TDR 阶跃的边缘速度。这在前面的第 4 页中讨论过，其中显示 TDR 边缘速度应与元器件在实际使用中遇到的边缘速度相同。TDR 的结果可以直接决定该元器件的使用方式。

校准还提供了一种检查元器件在各种信号速率下阻抗性能的简便方法。如需了解关于 TDR 校准的更多详情，请参阅是德科技应用指南 5988-2490CHCN 《利用归一化改善 TDR/TDT 测量》。

总的来说，这种校准流程有以下重要优点：

- 能够消除测试系统及 DUT 连接中的反射
- 能够消除阶跃信号发生器所生成脉冲的缺陷（过冲和振铃）
- 可以控制阶跃信号发生器的边缘速度
- 可以补偿测试系统电缆损耗/衰减

使用非常快的边缘速度精确测量间隔较近的反射点

在 TDR 测量中，随着反射点之间物理间隔逐渐减小，最终两个反射将看上去像是一个。TDR 系统中限制其分辨间距较近反射的因素主要与阶跃信号发生器的上升时间和示波器的带宽有关。如前文中所述，反射的时间间隔通常必须至少为 TDR 系统上升时间的一半，才能被分辨为两个不同反射。为了让您对此有一个直观感受，想象一下有一个基础的微带传输线路，其阻抗从 50Ω 变为 60Ω ，然后再回到 50Ω 。由于线路上有两个位置发生阻抗变化，所以反射点也会有两个。当 60Ω 段达到多窄时就无法再分别观测到这两次阻抗变化？TDR 迹线将一直保持在 50Ω 电平，直到阻抗变到 60Ω 。由于阻抗变高，反射电压将同相，并加到 50Ω 电平中。完全达到 60Ω 电压电平所需的时间就是阶跃信号发生器的上升时间。TDR 响应将保持在 60Ω 电平，直到阻抗变到 50Ω 。在最初发生跳变之后，完全再变回到 50Ω 电平所需的时间就是 TDR 系统的上升时间。

随着 60Ω 线路段越来越短，从 50Ω 跳变到 60Ω 的时间会越来越接近从 60Ω 跳变到 50Ω 的时间。如果 60Ω 到 50Ω 电压跳变区域的起始时间与 50Ω 到 60Ω 电压跳变区域的终止时间大约同时发生，就表示已达到两个反射点之间的最小可测量间隔。如果反射点进一步接近，那么 TDR 波形将没有足够时间达到完整幅度，阻抗幅度的测量值将有误差。

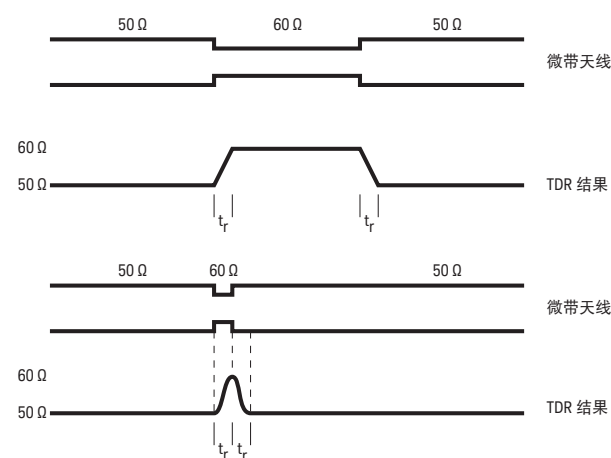


图 9：确定双事件分辨率。

在 TDR 显示屏上，两个反射点之间的“时间”可以标注为第一个边缘（由 50Ω 跳变到 60Ω 产生）底部与第二个边缘（由 60Ω 跳变到 50Ω 产生，在此例中为下降边缘）底部的时间差。这个时间本质上就是 TDR 系统的上升时间。但是，务必要注意，TDR 上显示的时间表示的是反射往返时间，也就是脉冲到达反射点并从反射点返回原点的时间。因此，前面标注的时间间隔是往返时间。反射点之间的最小单程时间是系统上升时间的一半。最小物理距离由信号在介质中的传播速度和 TDR 系统上升时间决定：

$$\text{公式 2: } \frac{c \cdot t_{\text{上升}}}{2\sqrt{\epsilon}}$$

式中， ϵ 是传输系统的介电常数， c 是光在真空中的速度。

如前所述，有效系统带宽和阶跃速度都可以通过校准来增大。因此，TDR 系统的双事件分辨率也可以通过校准来提升。

对差分传输系统进行精密的 TDR 测量

随着系统速度的提高，需要使用差分传输技术来保持信号完整性。差分传输技术利用两条传输线路分别传输互补的数据信号。表征差分传输线路的质量，从而获得阻抗值和不连续性，这需要一种方法能够同时激励这两条传输线路。而且，当这两条传输线路相互电磁耦合时，对系统阻抗属性的分析需要做一些不同于单端线路的调整。

最常用于测试差分传输线路或元器件的方法就是配合使用 TDR 和互补阶跃信号发生器。也就是用一个阶跃信号发生器产生正阶跃信号，输入系统的“正”极；用另一个阶跃信号发生器产生负阶跃信号，输入系统的“负”极。通过比较反射差分电压和入射差分电压，进行差分阻抗测量。（差分电压定义为跨越 DUT 两个输入端的电压，差分阻抗是指差分电压除以通过系统的电流所得到的结果。请注意，如果系统是平衡的，那么从线路一端进入的电流与从另一端出来的电流相等。

精密差分 TDR 测量对 TDR 系统有一些重要限制。测量系统的两条线路必须保持对称，否则有可能导致测量的不平衡或误差。差分系统的不对称是差分和共模这两种模式相互转换的主要原因之一。误差来源包括：

- 两个阶跃信号发生器之间的时序偏差
- 两个示波器接收机之间的时序偏差
- 两个发生器之间的阶跃脉冲偏差（幅度或总体形状）
- 两个示波器接收机之间的响应偏差

选用精心设计的硬件，是实现精确测量的基础。此外，前面介绍的校准流程，以及有助于消除系统误差源的所有功能，也可以用于差分 TDR。最终能够让差分 TDR 测量达到最高精度。

86100 TDR 系统能够校正阶跃信号发生器和接收机的偏差。用户务必要了解具体的实施方法，及其将对测量结果产生什么影响。在检查差分传输系

统时，关键的一点就是要使激励脉冲保持精确校准。可以将第一个阶跃信号发生器产生脉冲的时间调整到 TDR 模块另一个阶跃信号发生器产生的脉冲前后。

还可以调节 TDR 的接收机，从而以相对于阶跃信号发生器触发事件（用于确定何时进行信号采样）变化的时间进行数据采样。因此，通过调节 TDR 采集信号的时间，可以有效地将返回到差分 TDR 其中一个通道的信号相对于另一个通道进行时移。随后，如果有任何系统偏差需要消除，这可以有效地校准返回的信号。

例如，如果两个阶跃信号发生器与 DUT 之间的电缆长度不相等，那么两个阶跃信号将在不同时间到达 DUT 面。而且，DUT 反射的信号也会通过不等长的电缆返回 TDR 接收机，同样会发生偏差。86100 TDR 系统自带的程序能够消除因为连接 DUT 的电缆长度不同而导致的偏差效应。它一方面能够确保在参考面校准阶跃信号（以平衡对 DUT 的激励），另一方面也可以消除返回 TDR 的信号的偏差。

务必要分辨差分测量与只是简单地求取两次单端测量之差的区别。基本的单端测量会激励输入，并检测输入端口返回的信号。差分测量会同时激励两个端口，并检测返回到两个端口的信号。关键的差异就在于，通过耦合差分传输线路，在一个端口上施加的激励可能会导致信号被反射回两个端口。此外，传输线路的特征阻抗也会受到差分激励和相关耦合的影响。

以下是使用一条差分传输线路进行单端测量的一个示例。这个基础差分电路的两条线路最初有一个 50Ω 的单端阻抗。这两条线路在物理上分隔开来，因此在这个部分仅存在极小的耦合。两条线路随后汇合，迹线宽度均减小（这将导致单端阻抗增大）。然后，两条线路又宽度增大并再次分隔。



图 10. 差分线路模型。

如果单独测试每条线路（单端驱动），TDR 结果看上去将先是一条 50Ω 直线，然后是一段 70Ω 区域，再是一段 50Ω 直线，最后是 50Ω 负载端接。如果单独测试每条线路（单端驱动），TDR 结果看上去将先是一条 50Ω 直线，然后是一段 70Ω 区域，再是一段 50Ω 直线，最后是 50Ω 负载端接。两条线路的结果相同。

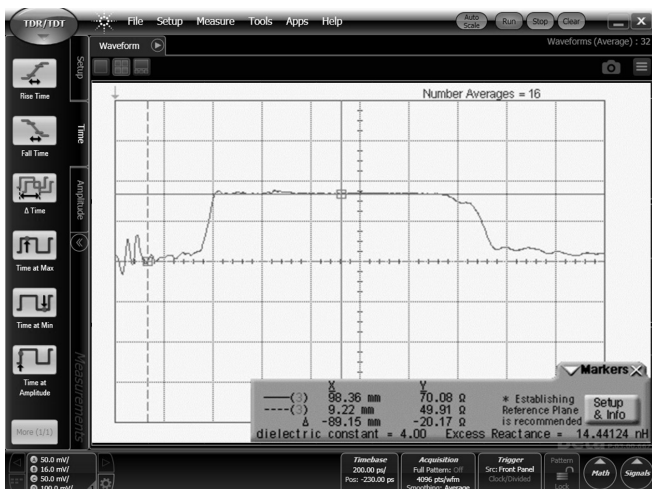


图 11. 单端测量的差分迹线

在差分测量中，如果受到两个阶跃信号的激励，TDR 系统将会合并两个端口的结果。因此，每条线路上的信号都将是来自两个阶跃信号发生器的信号组合后的产物。结果是，差分阻抗逼近 100Ω ，这正是传输线路的设计初衷。奇模阻抗（差分驱动时一条传输线路接地）接近 50Ω 。

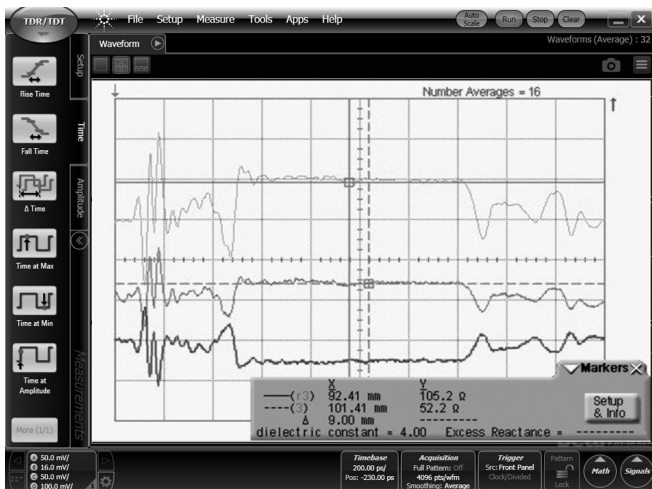


图 12: 差分 TDR 显示了差分传输线路的差分阻抗（上方迹线）和奇模阻抗（中间和下方的迹线）

减小测量误差的最后几个步骤包括对夹具效应进行去嵌入处理，消除阶跃信号发生器所生成脉冲的剩余畸变。这可以通过前文中所述的校准流程来实现。差分测量程序与单端 TDR 的测量程序相同，只是要将流程执行两次（每个通道一次）。校准还可以对脉冲上升时间加以调整，从而仿真更快或更慢的数据信号。

在下例中，有缺陷的夹具和电缆遮蔽了 DUT 的真实测量结果，由此映衬出差分校准的优点。第一步是消除 DUT 之前的系统偏差。首先，检测来自于 DUT 测量面（开路或短路）的反射信号（图 13）。通过将“落后”阶跃信号发生器的输出启动时间向前平移，可以消除一半的偏差。再通过延迟测量落后信号的时间，有效地让它赶上超前信号，从而消除剩下的一半偏差。再说一遍，这些校正并不是针对 DUT 的偏差，而是与 DUT 相连的系统的偏差。

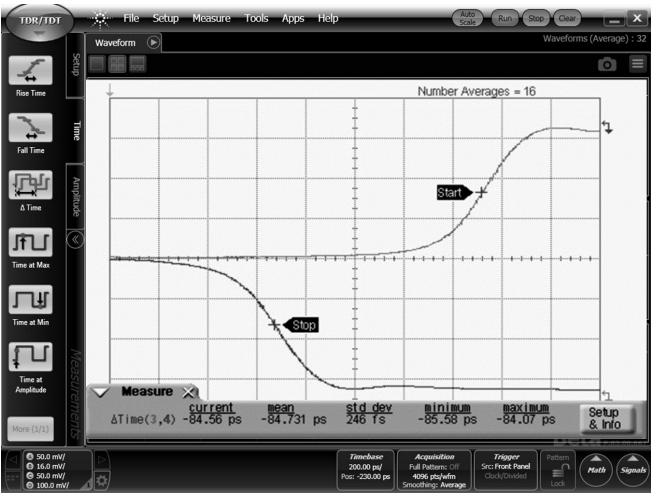


图 13：偏差校正前后对比。

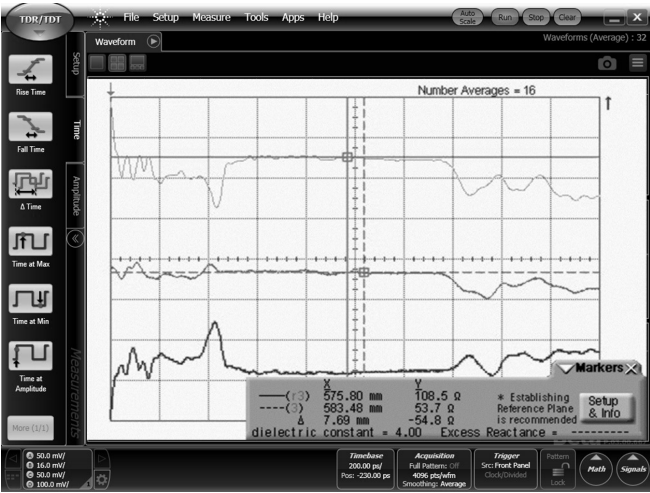


图 14：包含夹具效应误差的差分 and 奇模阻抗结果。

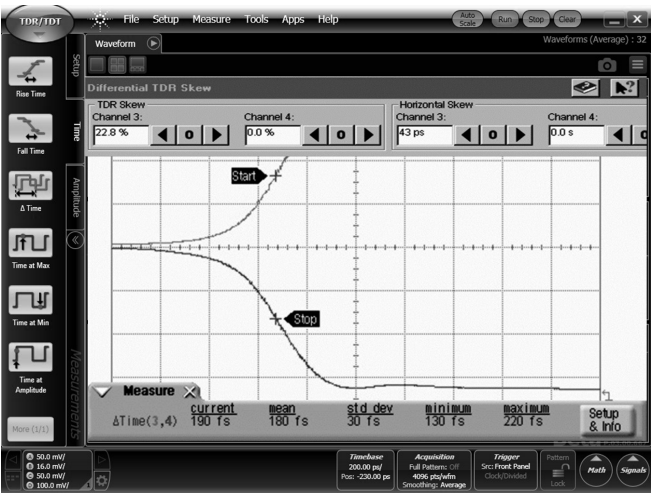


图 15：消除了夹具效应误差的差分 and 奇模阻抗结果。

即使阶跃信号发生器和接收机经过精确校准，但连接 DUT 的夹具也可能会降低激励和 DUT 响应性能。例如，通过在 TDR 和 DUT 之间增加额外的电缆和损耗，可以有意做到这一点。综合起来的测量误差如图 14 所示。比较图 14 中的差分（上方迹线）和奇模（中间和下方迹线）阻抗测量与图 12 中相同测量的结果（未连接夹具）。可以发现，差分阻抗和奇模阻抗并非是 105Ω 和 52Ω，而是分别增大至 109Ω 和 54Ω。

当重复进行包含了夹具效应和损耗的测量，但通过校准消除了测量误差时，测量结果将与没有使用夹具时的结果高度一致（图 12 和 15）。

校准过的测量系统将提供最高精度的差分 TDR 测量结果，即使存在误差产生机制。校准流程和测量方法同样对共模测量有效。在共模测量中，取决于为执行校准而提供的校准标准件（负载和短路件），两个阶跃信号发生器会有相同极性的输出。这对于需要从使用同轴电缆连接的 TDR 系统过渡到使用非同轴电缆连接的 DUT 测量（例如使用探头在电路板上测量）有很大好处，只要提供相应类型的负载和短路端子。

从传统 TDR 结果中得出“S”参数

通过频域分析和时域表征，可以深入地了解元器件特性。例如，常见的测量是测定在特定频率范围（可能是从 kHz 到 GHz）内从元器件反射回的信号量。知道频率响应结果之后，用户通常可以深入了解到元器件为什么会有特定的一些特性。用户可以轻松检测出谐振，而一般性能可能与特定电路特性有直接关系。通过频域测量，可以更快建立先进元器件模型。此类测量通常被称为“S”（散射）参数测量，在射频和微波设计领域中已经使用了数十年。

常用于获得 S 参数的仪器是网络分析仪，它有一个正弦信号发生器，其频率会在相应范围内发生变化。还有一个调谐到信号发生器频率的接收机，用于监测来自于 DUT（反射或传输）的信号。元器件可以有一个端口（仅输入或仅输出）或两个端口（输入和输出）。对于双端口元器件，我们要关注每个端口的传输和反射。因此，如果是双端口元器件，那么会有两对反射和传输测量值，也就是有四个 S 参数。

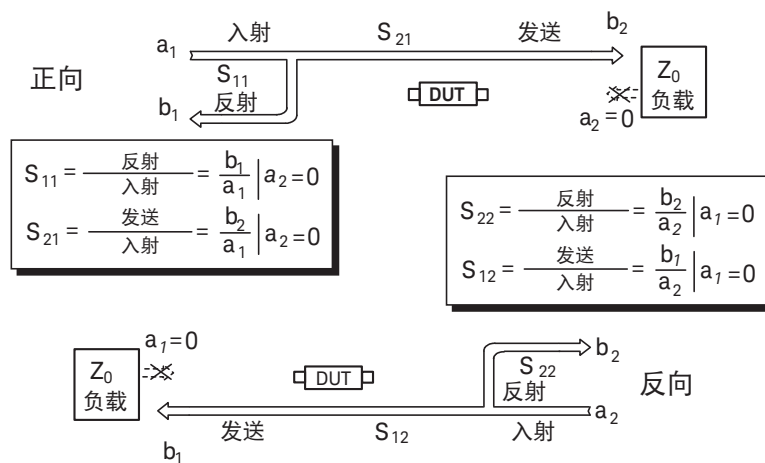


图 16：双端口器件的 S 参数信号模型。

测量差分器件和通道

仅有一路正负输入输出的差分元器件为上述示例增加了两个端口和四个 S 参数。但是，差分通道可以与它们的互补通道耦合，从而使 S 参数从 8 个翻倍到 16 个。请注意，这些测量的激励和响应仍然对单端有效。也就是说，只在一个端口施加激励，而后测量另一个端口，构建每个 S 参数。这个 S 参数用 S “输出/输入” 表示。因此， S_{21} 表示在端口 1 施加激励，在端口 2 测量的信号。在下方的差分电路示例中，一对差分端口标注为端口 1 和端口 3，另一对差分端口标注为端口 2 和端口 4。以下是 16 个可能的测量配置和部分物理解释。

激励	解释单端测量：
S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}	S_{11} ：单端回波损耗。
S_{21} S_{22} S_{23} S_{24}	$S_{21} = S_{12}$ ：单端插入损耗
S_{31} S_{32} S_{33} S_{34}	$S_{31} = S_{13}$ ：近端串扰
S_{41} S_{42} S_{43} S_{44}	$S_{41} = S_{14}$ ：远端串扰



图 17：双端口差分器件的单端 S 参数。

最终，可以通过差分或共模模式驱动差分电路，并测量差分或共模模式下的响应。因此，双端口差分元器件（包括单端、差分、共模和混合模式配置）将一共有 32 个不同的 S 参数。

务必要说明提供的各种差分 and 共模测量配置。差分 S 参数的表示方法与单端的表示方法略有不同，它仍然采用 S “输出-输入” 形式。但是，端口 1 和端口 2 都会同时包含正负差分输入。



图 18：差分 S 参数模型。

因此， S_{DD11} 表示差分激励时的反射差分信号。同样的， S_{DD21} 表示差分信号输入到差分端口 1 时，差分端口 2 的差分输出。因此，16 元差分 S 参数矩阵将有四个基本象限，如图 19 所示。左上象限是有两个差分端口（一般为差分输入和差分输出）的器件在受到差分信号激励时的差分传输和反射测量。同样地，右下象限显示了双端口器件受到共模信号激励时的共模传输和反射性能。

混合模式参数（差分与共模激励或响应的组合）提供了有关如何从一种模式转换到另一种模式的重要信息，从而帮助用户深入了解元器件和通道如何传播辐射信号，或受到其他元器件和通道辐射信号的影响。例如，左下象限显示了如何将差分输入信号转换为共模信号。 S_{CD21} 指标将说明如何将端口 1 的差分输入作为端口 2 的共模信号进行观测（请参见图 20）。与差分信号相比，共模信号更有可能导致辐射发射，因此使用 S_{CD} 象限可以更好地解决此类问题。右上象限（ S_{DC} ）指示了如何将共模信号转换为差分信号。差分系统用于拒绝差分系统两条线路上共有的信号，降低对杂散信号的敏感性。但是如果将杂散共模信号转换成差分信号，这些信号就不会被拒绝。因此， S_{DC} 象限中的测量是解决对杂散信号敏感的问题的有效办法。例如， S_{DC21} 就指示了如何将端口 1 处的共模信号转换成差分信号并在端口 2 处观测。

响应		激励			
		差分信号		共模信号	
		端口 1	端口 2	端口 1	端口 2
		端口 1	端口 2	端口 1	端口 2
共模信号	差分信号	S_{DD11}	S_{DD12}	S_{DC11}	S_{DC12}
		S_{DD21}	S_{DD22}	S_{DC21}	S_{DC22}
	共模信号	S_{CD11}	S_{CD12}	S_{CC11}	S_{CC12}
		S_{CD21}	S_{CD22}	S_{CC21}	S_{CC22}

图 19：混合模式 S 参数。



图：20：混合模式 S 参数： S_{CD21} 。

虽然网络分析仪可直接用于产生频域 S 参数，但是通过配置 86100 TDR，还可以在产生传统 TDR 测量值的同时，产生频域 S 参数结果。根据仪器配置，可以实现全部 32 个差分 S 参数或其中一部分。现在，您可以使用一台仪器，同时从频域和时域两方面对元器件进行全面、彻底的表征。

86100 TDR 系统搭配选件 202 “S 参数和时域表征”，可以直接在仪器显示屏上显示 S 参数测量结果。

参考资料:

William H. Hayt Jr.: *Electromagnetic Engineering*, Ch 4.5 “The potential field of a system of charges”, McGraw-Hill

Ramo, Whinery, and Van Duzer: *Fields and Waves in Communication Electronics*, Ch 3.04 “Superposition”, John Wiley and Sons

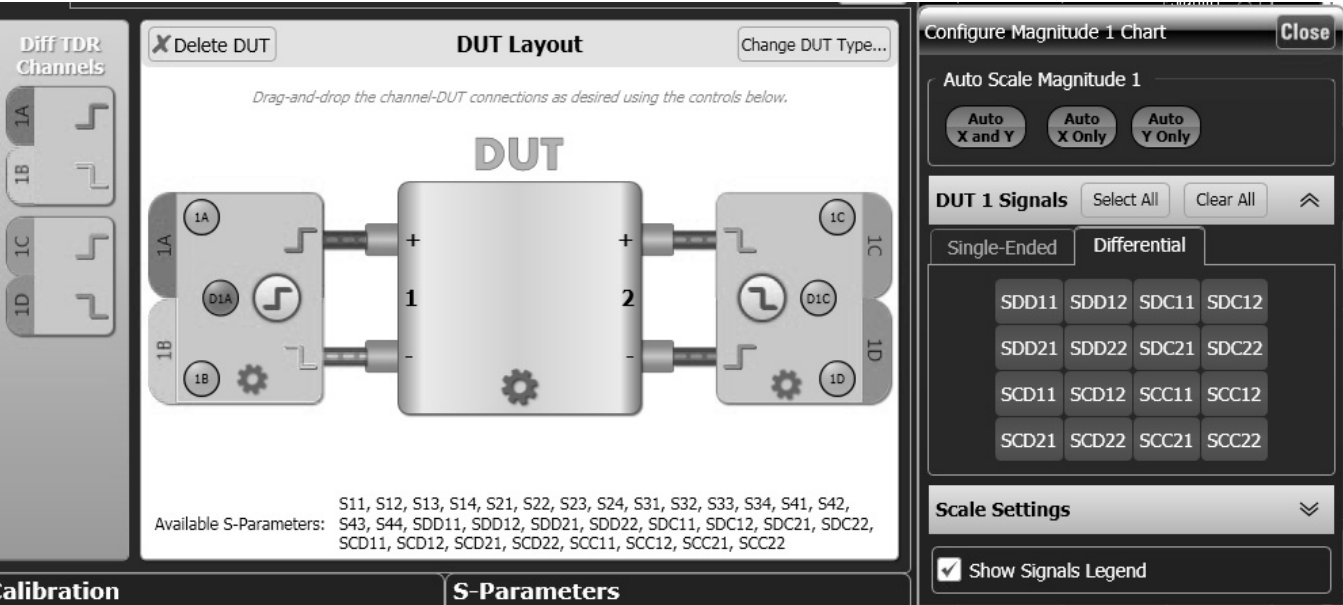


图 21: 86100 TDR 的 TDR 设置界面，其中显示了一个差分 DUT 和可用的差分 S 参数

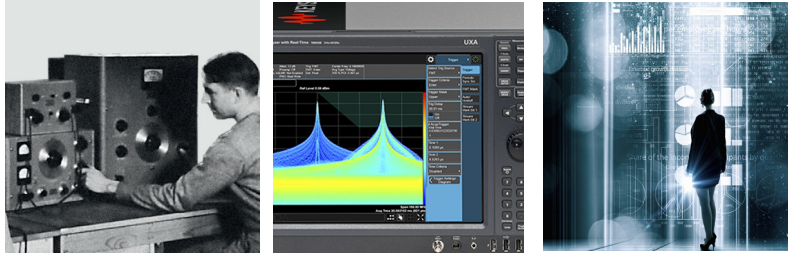


图 22: 86100 TDR 上的实时板上频域结果，其中显示了双端口差分 DUT 的全部 32 个 S 参数

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
个性化视图为您提供最适合自己的信息！

KEYSIGHT SERVICES
Accelerate Technology Adoption.
Lower costs.

是德科技服务

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：我们帮助您应用新的技术，而工程师为您改进流程并降低成本。



是德科技保证方案

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

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

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。

www.keysight.com/find/solution

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

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

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

香港铜锣湾希慎道 33 号
利园1期 45 楼 4567室内
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

广州市天河区金穗路62号侨鑫国际中心17楼
雷格斯侨鑫国际中心1772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