

## 使用J2154APerfectPulse®差分TDR 和MSO68B进行TDR测量

作者 Benjamin Dannan and Steven Sandler, Picotest.com

大多数现代电路设计都依赖于逻辑接收机上的精确逻辑信号。这种保证是基于对印刷电路板（PCB）传输线路、互连器和电缆的认真设计。

如果您已经设计了一个基于PCB多层板的可控阻抗传输线，您如何知道是否PCB制造公司或其他供应商制作的PCB板，满足了您的控制阻抗规格？

控制阻抗印刷电路板通常包括一个测量的“参考样品”，它通常包括约6英寸长的样品迹线，并作为印刷电路板面板的一部分构造。测量它们，以验证PCB堆叠和PCB传输线路的准确性。通常使用时域反射计（TDR）测量这些参考样品，以及实际的PCB信号线、互连和电缆。TDR阻抗测量对于在PCB设计中确保信号的完整性至关重要。

TDR测量信号通过某种传输环境所产生的反射——电路板线路、电缆、连接器等等。在过去，TDR通常是一个大型的、昂贵的仪器，其中包括一个高速边缘脉冲发生器和一个采样示波器。TDR是一个很好的工具，可以用来确定供应商的加工品质，如识别阻抗的介电常数( $D_k$ )变化。图1、图2和图3显示了TDR可以提供的一些信息示例。

图1显示了如何在PCB线路上测量阻抗不连续点。图2是由测量的s参数计算出的TDR数据的示例，以及各种特征点的标签。在这种情况下，在TDR曲线[2]中可以清晰可见的各个独立元素，如通道、导线和连接器。TDR对于验证连接器和电缆的导通性特别有用。根据系统总上升时间的不同，用TDR直接测量相同的DUT也可以得到相同的结果。这将在本应用手册说明中更详细地讨论。

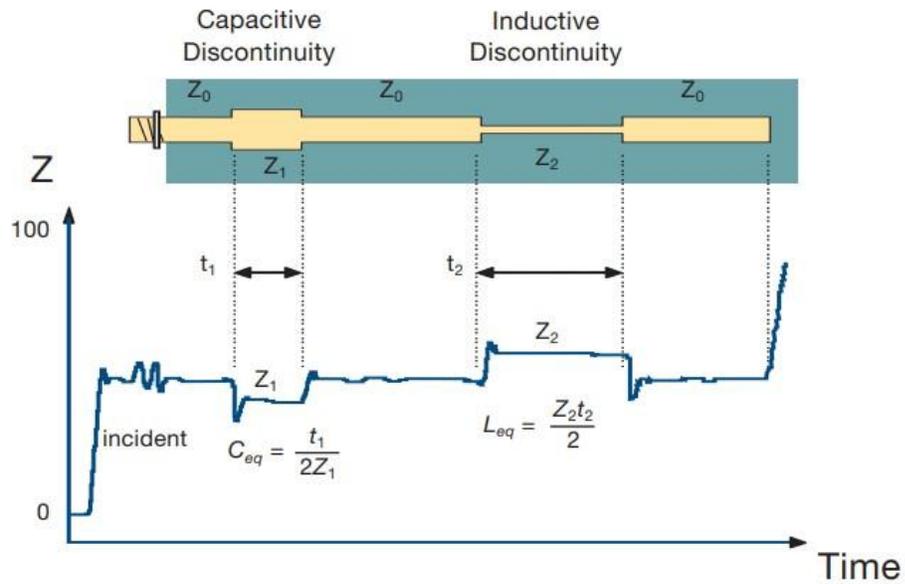


Fig. 1 - TDR 曲线显示线路不连续点 [1].

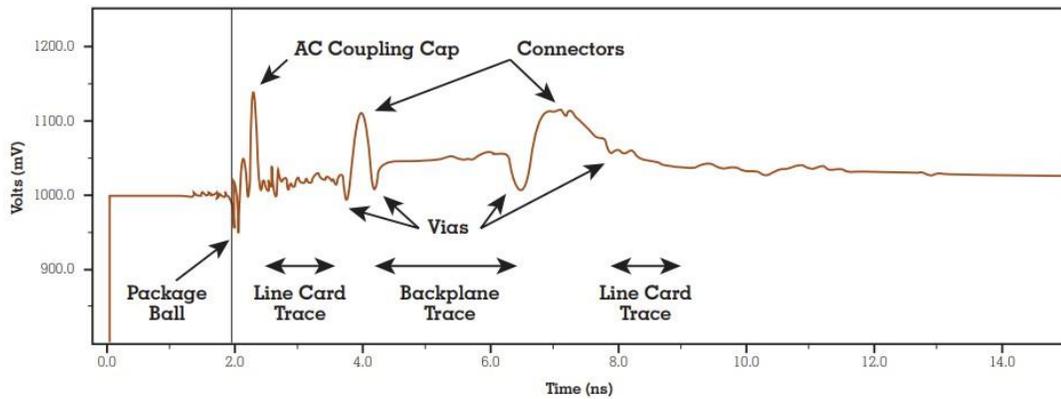


Fig. 2 - SiSoft 文章范例 TDR参数 来自于测量的s参数数据 [2].

如图三所示，对通道仿真阻抗不连续时TDR曲线，眼图可以反映相关联的影响状况。对于可能存在于实际通道中的问题，也可以进行相同的测量确定其相关性。

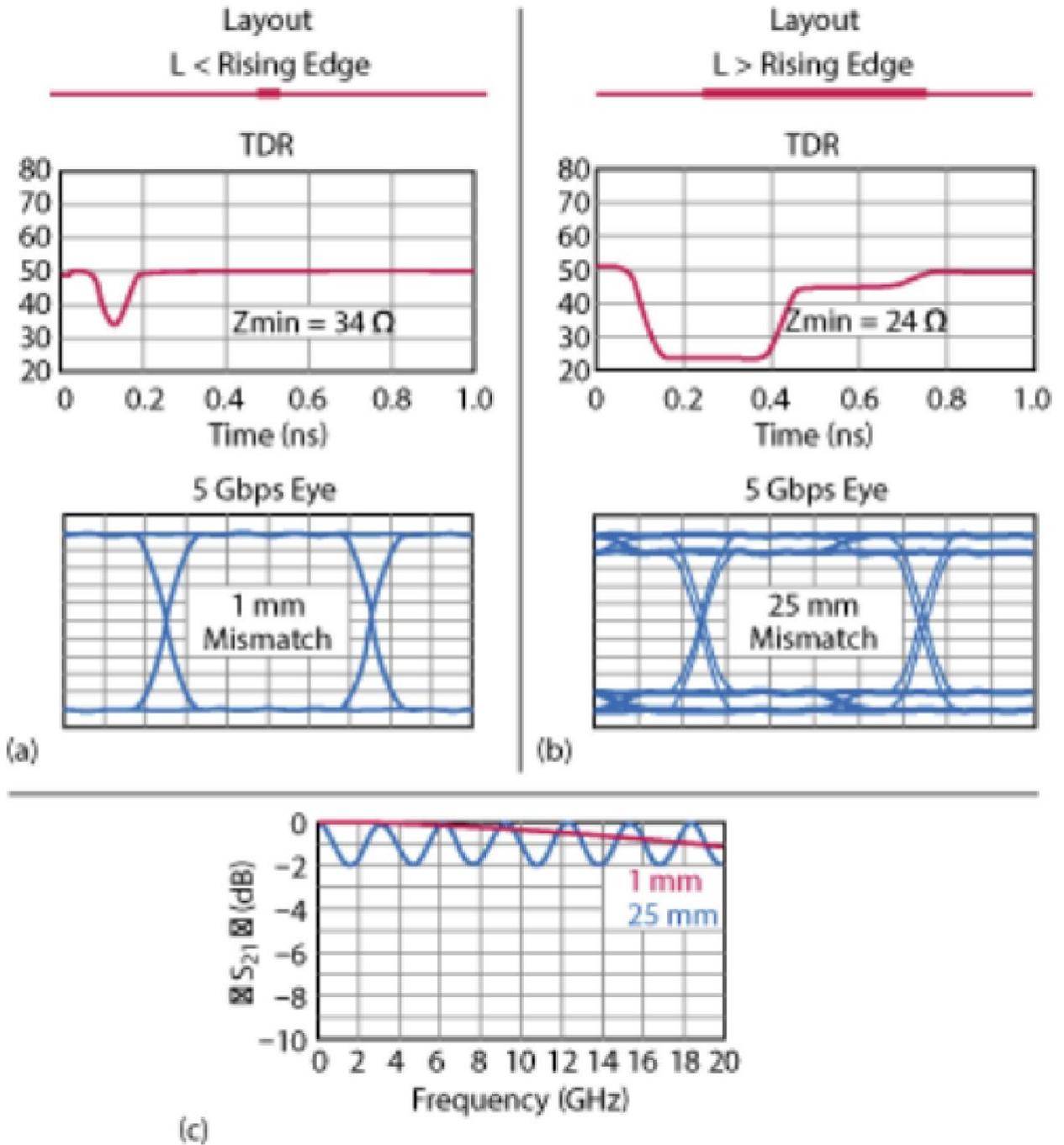
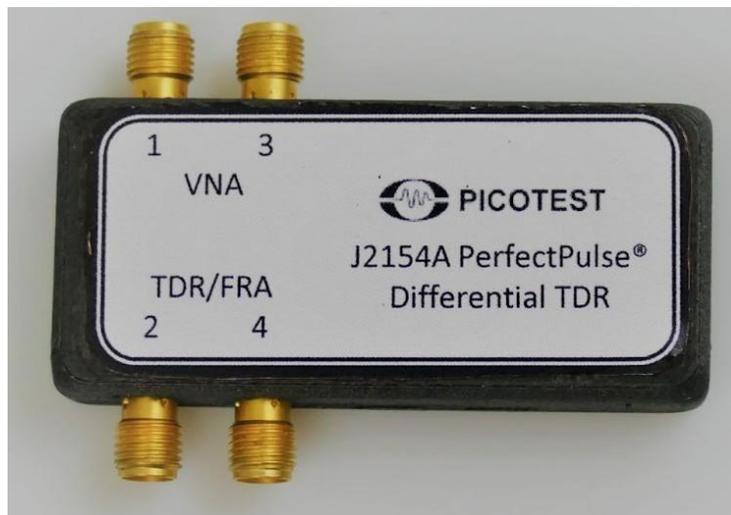


Fig. 3 - 串联阻抗不连续点比信号上升时间短(a)和长(b)的TDR和眼图。  
 相同不连续点的插入损失(c) [3]。

哪个分量可能是与TDR反射分量及时重合的噪声源耦合 [3].TDR是单端口测量，时域传输（TDT）是2端口测量。TDR显示了发生反射的位置，这减少了到达发射机的信号量。TDT显示了上升时间是如何因通道中的材料降低而下降的。相邻通道上的近端串扰（NEXT）显示了哪个分量可能是与TDR反射分量及时耦合的噪声源[3].

J2154A PerfectPulse®差分TDR是一个低成本，usb供电，10.5 GHz口袋大小的TDR。J2154A被设计用于使用实时和采样示波器来执行单端和差分测量。J2154A提供两个互补（差分）脉冲，以便用作差分TDR。然而，当使用两个或多个示波器“接收机”通道时，J2154A也可以用于单端和差分TDT。使用J2154A TDR不需要特殊的软件，只需要在示波器上设置一些基本的数学功能，这可以手动完成，也可以通过从Picotest加载一些现成的示波器设置文件来完成。



**Fig. 4 - J2154A TDR .**

如图4所示，对于单端和差分模式的TDR测量，连接器1和3连接到示波器通道，而连接器2和4连接到探头。这是本机模式和最常见的操作模式。他们既可以用作单端测量也可以用作差分测量。

内部信号发生器，和一个电阻式端口分流器组合，并耦合到一个实时示波器，可用作一个精确的TDR/TDT测量系统。它可以测量PCB样品阻抗、电缆和不良压接、导线长度、Dk和速度因子( $V_p$ )。

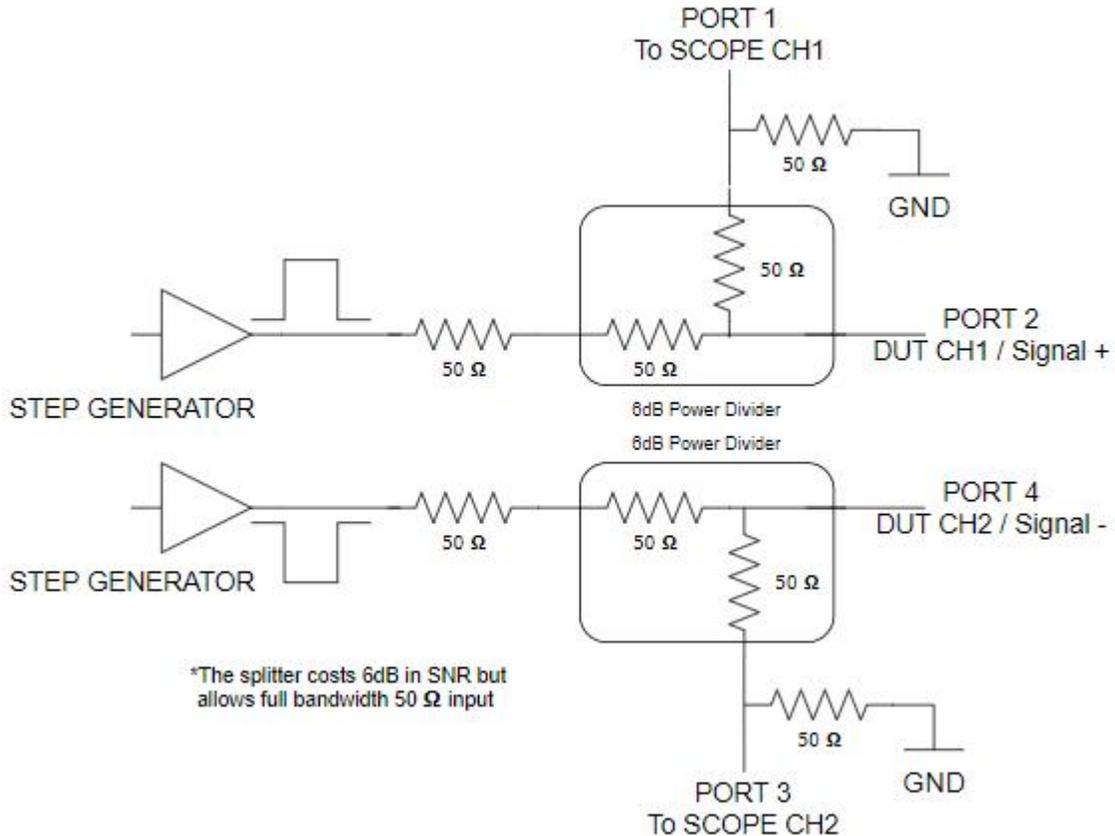


Fig. 5 - 差分TDR示意图.

如J2154A这样的差分TDR可用于测量耦合配对的传输线的奇模和偶模阻抗，从而计算其特征阻抗矩阵元素，从而计算差分阻抗。一个简化的差分TDR图如图5所示。

J2154A TDR也可以用来测量两个相邻线路之间的串扰。一个单端TDR通道可用于产生线路的激励波形。然后用示波器上的第二个接收通道测量无信号的线上感应的电压。在此过程中，两条不相连的传输线路的末端应以50Ω终止，以保持与电缆连接时的负载相同。

本应用手册将演示如何使用Picotest J2154A TDR来测量PCB传输线、电缆和互连阻抗、介电常数、速度因子和电缆长度。

## 1.0 TDR分辨率

TDR测量DUT的阻抗与时间的关系。通过和时间参考，那么就可以将时间转换为距离。有了这些信息，TDR可以帮助我们确定电缆的长度，电缆故障的长度，在哪里找到电缆的末端，以及轨迹上的不连续的位置。

如公式 (1)所示，真空中的光速定义为：

$$C = 2.99792468 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 11.86 \frac{\text{in}}{\text{ns}} \quad (1)$$

其中，信号传输的速度因子（V<sub>f</sub>），有时也称为通过介质的传播速度，被定义为：

$$V_f = \frac{C}{\sqrt{D_k}} \quad (2)$$

从公式 (2)中，可以推导出传播延迟，其定义为：

$$T_D = \frac{\text{length (in)}}{V_f \text{ (in/ns)}} \quad (3)$$

重要的是要记住，TDR测量反射，这是一种往返测量。因此，通过公式(3)在示波器上看到的结果将是往返行程的时间延迟。

例如，如果D<sub>k</sub>=为3.5，则通过公式 (2)得到速度因子

$$V_f = \frac{11.86 \text{ in/ns}}{\sqrt{3.5}} = 6.33 \text{ in/ns} \quad (4)$$

因此，对于D<sub>k</sub> = 3.5，每英寸的时延迟可以通过公式 (3)计算，如

$$T_{D/\text{inch}} = \frac{1}{6.33 \text{ (in/ns)}} = 157.7 \text{ ps/in} \quad (5)$$

基于公式 (5)，如果我们要测量一个真实的传输线， $Dk = 3.5$ ，使用J2154A TDR，我们将预计得到  
 $2 \cdot 157.7 \text{ ps/in} = 315.4 \text{ ps/in}$  结果，其中包括往返延迟。

重要的是要记住，添加一个电缆和/或探头将进一步减慢TDR的边缘（并减少带宽），这将提高最小分辨率。其中，分辨率是真实可信的，以便能够在TDR测量期间区分两个或多个单独的伪影。重要的是要理解，TDR信号的上升时间和整个系统的上升时间将影响您可以在DUT上看到的不连续点和/或伪影的分辨率。

换句话说，在进行TDR测量时，需要强调的是所需要的TDR分辨率需要多大带宽，以保证捕获您要在DUT上测量的结构的分辨率准确性。

根据IPC-TM-650测试方法手册[4]，TDR分辨率极限定义为

$$\text{Resolution Limit} = 0.5 \cdot tr_{sys} \cdot V_p \quad (6)$$

其中:

$tr_{sys}$  = TDR系统的上升时间或下降时间，为10%到90%

$V_p$  = 信号的传播速度，与  $V_f$  一样

总的系统上升时间( $tr_{sys}$ )包括从DUT到示波器的所有组件，换句话说，就是TDR、示波器和探头。 $tr_{sys}$ 用公式 (7)表示。需要注意的是，从10%到90%的上升时间是任意的，换句话说，在 $tr_{sys}$ 计算中，每个组成部分也可以使用20%到80%表示。唯一重要的是，所有组成部分的上升时间值都是一致的。

$$tr_{sys} = \sqrt{tr_{TDR}^2 + tr_{scope}^2 + tr_{probe}^2} \quad (7)$$

其中:

$tr_{TDR}$  = TDR上升时间或下降时间, 10% to 90%

$tr_{scope}$  = 示波器上升时间或下降时间, 10% to 90%

$tr_{probe}$  = 探头上升时间或下降时间, 10% to 90%

从 $tr_{sys}$ 中可以通过公式(8)找到总的系统等效带宽.

$$BW_{sys} = \frac{0.35}{tr_{sys}} \quad (8)$$

其中:

$BW_{sys}$  = 总系统等效带宽

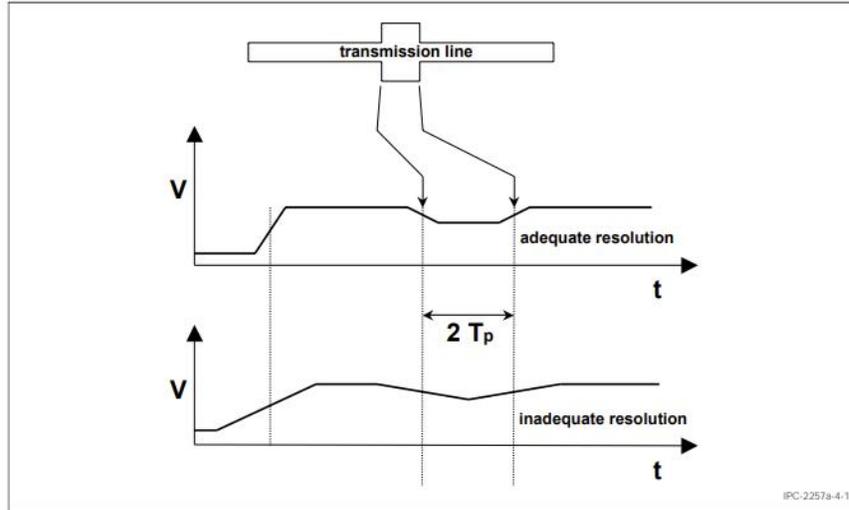


Fig. 6 - 输电线路的分辨率和电气长度[4].

图6显示了一个分辨率充分和不充分的简单例子。这将在第4.3节中进行更详细的讨论。

### 示例1 - 使用P2104A时的TDR分辨率极限

以如何计算分辨率极限为例，如果传输线 $Dk = 3.5$ ，则通过公式 (4)， $V_f = 6.33 \text{ in/ns}$ 。P2104A1端口探头的带宽为6.43 GHz。从公式 (8)中，我们可以计算出探头的上升时间为

$$P2104Atr_{probe} = \frac{0.35}{6.43GHz} = 54.4 ps \quad (9)$$

对于 J2154A TDR,  $tr_{TDR} = 34ps$ . 对于示波器MSO68B,  $tr_{scope} = 40ps$ . 对于 P2104A 单端探头,  $tr_{probe} = 54.4 ps$ . 根据公式(7),  $tr_{sys}$  is

$$tr_{sys} = \sqrt{(34ps)^2 + (40 ps)^2 + (54.4 ps)^2} = 75.6 ps \quad (10)$$

$$BW_{sys} = \frac{0.35}{75.6ps} = 4.63 GHz \quad (11)$$

参考 EQ(6) 和公式(10),使用J2154A TDR 和 MSO68B, 以及 P2104A 单端探头的TDR分辨率极限, 当 $D_k = 3.5$  时, 计算如下

$$\text{分辨率极限} = 0.5 \cdot 75.6 ps \cdot 6.33 \text{ in/ns} = 0.239 \text{ in} = 239 \text{ mils} \quad (12)$$

**示例2 - 使用P2105ATDR探头时的TDR分辨率极限**

以如何计算分辨率极限为例，如果传输线 $D_k = 3.5$ ，则通过公式 (4)， $V_f = 6.33$  in/ns。Picotest P2105A TDR探头的带宽为16 GHz。从公式 (8)中，我们可以计算出探头的上升时间为

$$\text{P2105A } tr_{\text{probe}} = \frac{0.35}{16 \text{ GHz}} = 21.88 \text{ ps} \quad (13)$$

对于J2154A TDR， $tr_{\text{TDR}} = 34 \text{ ps}$ 。对于MSO68B， $tr_{\text{scope}} = 40 \text{ ps}$ 。对于P2105A TDR探头， $tr_{\text{probe}} = 21.88 \text{ ps}$ 。因此，通过公式(7)， $tr_{\text{sys}}$ 是

$$tr_{\text{sys}} = \sqrt{(34 \text{ ps})^2 + (40 \text{ ps})^2 + (21.88 \text{ ps})^2} = 56.9 \text{ ps} \quad (14)$$

$$BW_{\text{sys}} = \frac{0.35}{56.9 \text{ ps}} = 6.15 \text{ GHz} \quad (15)$$

参考公式 (6)和公式 (14)，使用J2154ATDR和MSO68B，P2105ATDR探头， $D_k = 3.5$ 时 TDR的分辨率极限计算结果为

$$\text{Resolution Limit} = 0.5 \cdot 56.9 \text{ ps} \cdot 6.33 \text{ in/ns} = 0.180 \text{ in} = 180 \text{ mils} \quad (16)$$

当查看示例1和示例2之间的分辨率极限时，可以清楚地看到，在测量期间具有较高的带宽探头如P2105A相比于较低的带宽选项对TDR的影响。从数学上讲，仅通过拥有较高的带宽（16 GHz）P2105ATDR探头与较低的带宽（6.43 GHz）P2104A单端口探头，我们就能够测量近60mils的结构（或不良）。最后，通过比较公式（11）和公式（15）的结果，我们可以看到系统带宽对系统的影响，可以通过使用P2105A探头增加1.5 GHz的带宽。

## 2.0 测试设备列表

Table 1 - 设备列表

Description	Model	QTY
Tektronix 10GHz 示波器	MSO68B [5]	1
Picotest PerfectPulse® Differential TDR	J2154A [6]	1
Picotest PDN Cable®, BNC-SMA, 0.25 meter	BNCJ/SMAJ-250 [7]	2 <sup>(1)</sup>
Picotest PDN Cable®, SMA-Mini SMP, 0.25 meter	SMAJ/SMPMK-250 [7]	2 <sup>(1)</sup>
Picotest 1-Port Probe	P2104A - 1X attenuation [8]	2 <sup>(1)</sup>
Picotest TDR Probe	P2105A [9]	2 <sup>(1)(2)</sup>
3D Probe Positioner	Keysight N2787A [10] or ClampMan Probing Solution [11]	2 <sup>(1)</sup>
50-ohm Load	Amphenol Connex 132360 [12]	1

**Table 1 Notes:**

1. 差分TDR测量需要两个(2)项，而单端TDR测量只需要一个。
2. P2105A TDR探头可以作为P2104A1端口探头的更高带宽的替代方案。P2105A仅在1X衰减选项中可用。
3. P2104A有多种衰减选项。J2154A TDR仅适用于1X的衰减。

## 3.0 TDR 单端测量设定

在开始TDR测量之前，首先重要的是进行一些检查。如果有必要，您可以首先验证在TDR的 SMA连接器上没有连接（开路）的情况下，示波器输入信号~250mV。

建议定期检查仪表电缆和连接件。电缆经常弯曲会导致性能下降，特别是在低成本的电缆，并会显著影响测量的质量。

使用Picotest J2154A TDR和MSO6B示波器无需特殊软件，只需要在示波器上设置一些数学函数来计算反射系数和阻抗。我们不需要校准J2154ATDR；然而，可以将测量值添加到公式（17）中，以提高精度。Picotest提供了配置文件[13]，可以下载并快速执行TDR测试应用。

测试配置文件包括脉冲电压、反射系数、阻抗，以及单端测量的电容和电感的计算。此外，picotest提供的配置文件包括脉冲电压、反射系数和差分测量的差分阻抗。

一旦你加载了配置文件或设置示波器数学函数按照表2单端测量或按照表3差分测量（见附录部分），你总是会测量到一个已知值，或者类似的大小的预期测量值。在测量一个未知的值之前，Picotest建议在TDR上使用50欧姆SMA负载[12]。

为了在示波器上设置TDR，我们首先需要将实际输入脉冲缩放为+/- 1V信号，这也被定义为反射系数（ $\Gamma$ ）。实际输入脉冲的极性是任意的。换句话说，在我们使用 $\Gamma$ 计算阻抗之前， $\Gamma$ 需要满足开放、50 $\Omega$ 匹配的特定标准，以确保它被适当地设置。这可以通过引用公式（17）来证明这一点，并如图7所示。此外，关于这个主题的讨论在Picotest的电源完整性和电源测试的基础有演示，第12课：TDR测量[14]。参考公式（17），理想情况下，0.0 mV为零，250 mV为250.00 mV。然而，情况并非总是如此，这就是我们如何在计算阻抗之前，通过适当地缩放 $\Gamma$ ，对从J2154A接收到的脉冲添加一些校准。这种校准可以在图7所示的方程中观察到。

$$\Gamma = 2 \cdot \frac{\text{scopeInputChannel}-0mV}{-250.00mV - 0mV} - 1 \quad (17)$$

For Open  $\rightarrow \Gamma = +1V$

For 50 $\Omega$  match  $\rightarrow \Gamma = 0V$

For Short  $\rightarrow \Gamma = -1V$

Note: 如表1中所定义的50 $\Omega$ 负载可用于50 $\Omega$ 匹配.

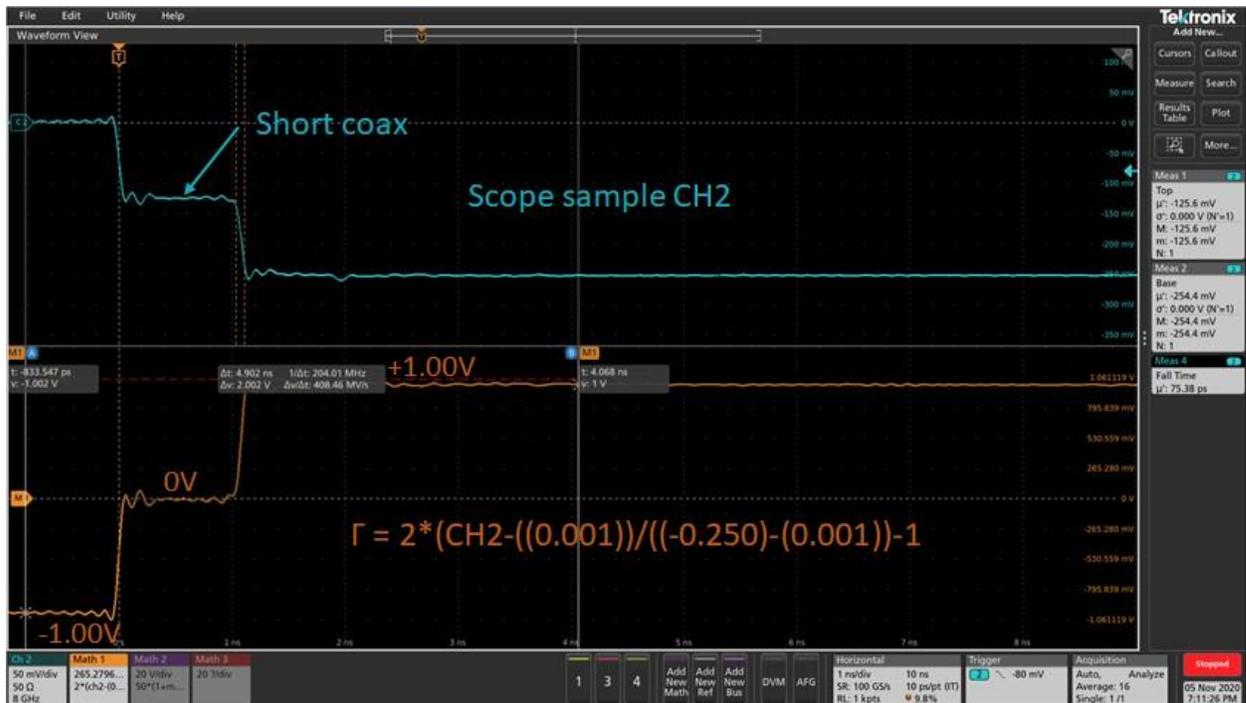


Fig. 7 - TDR Setup - Short, Open, Load.

在使用TDR时，设置参考点很重要的。如果您使用SMA连接TDR和DUT，那么了解在DUT测量开始的位置（从时间上看）引用到哪里是很重要的。通过触发设置为脉冲通道，如通道2，可以找到脉冲发射起始，如图8所示。

可以遵循一些简单的技巧来快速得到您的TDR参考点。继续加载TDR设置文件，或在示波器上进行测量的数学函数。

1. 仅将50Ω电缆连接到TDR，并注意示波器上的反射系数和阻抗轨迹上的远边缘开始变化的地方。下面的图8显示了一个示例。
  - a. 这两个轨迹的时间点将是相同的。这表示电缆的末端。
  - b. 现在，设置时间跨度，使此边位于范围的左侧。

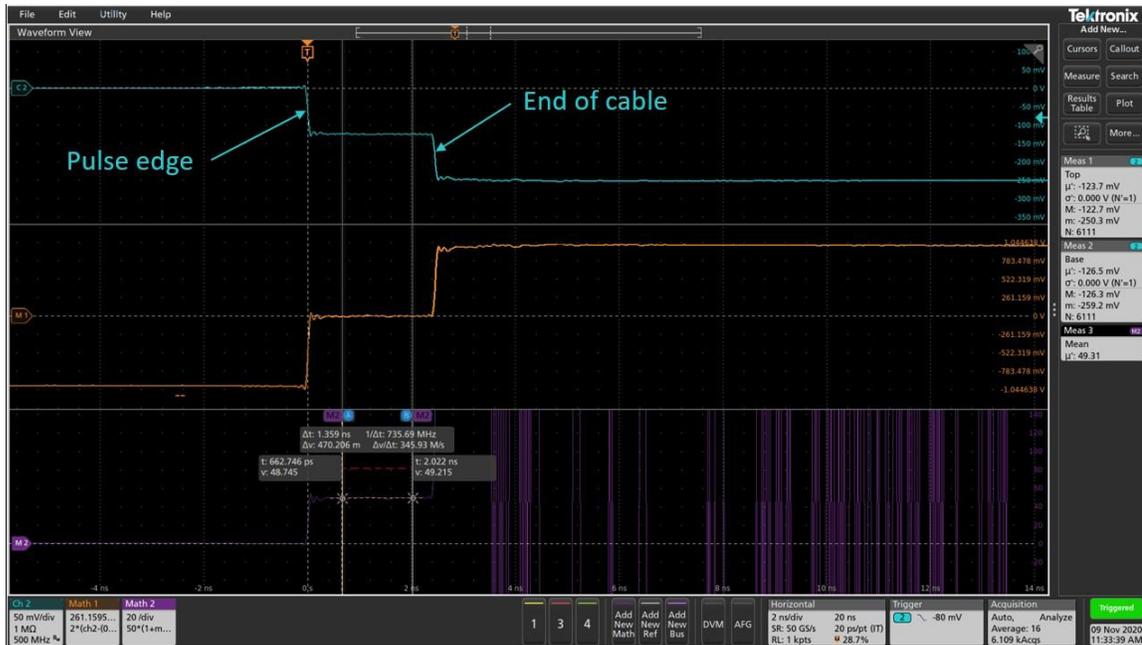


Fig. 8 - TDR 脉冲边沿和电缆末端边沿.

2. 接下来, 如果您正在使用探头, 请将探头连接到电缆上, 并注意变化。
  - a. J2154A配有一个可测量的演示板。将探头放置在导线上, 如图9和图10所示。注意在阻抗轨迹和反射系数上出现的感性(正)曲线。这是来自探头的电感, 在这个例子中是P2105A TDR探头。DUT测量开始的参考点在这些感性曲线的右侧, 如图10所示。



Fig. 9 - P2105A探头和50Ω微带传输线的TDR设置.

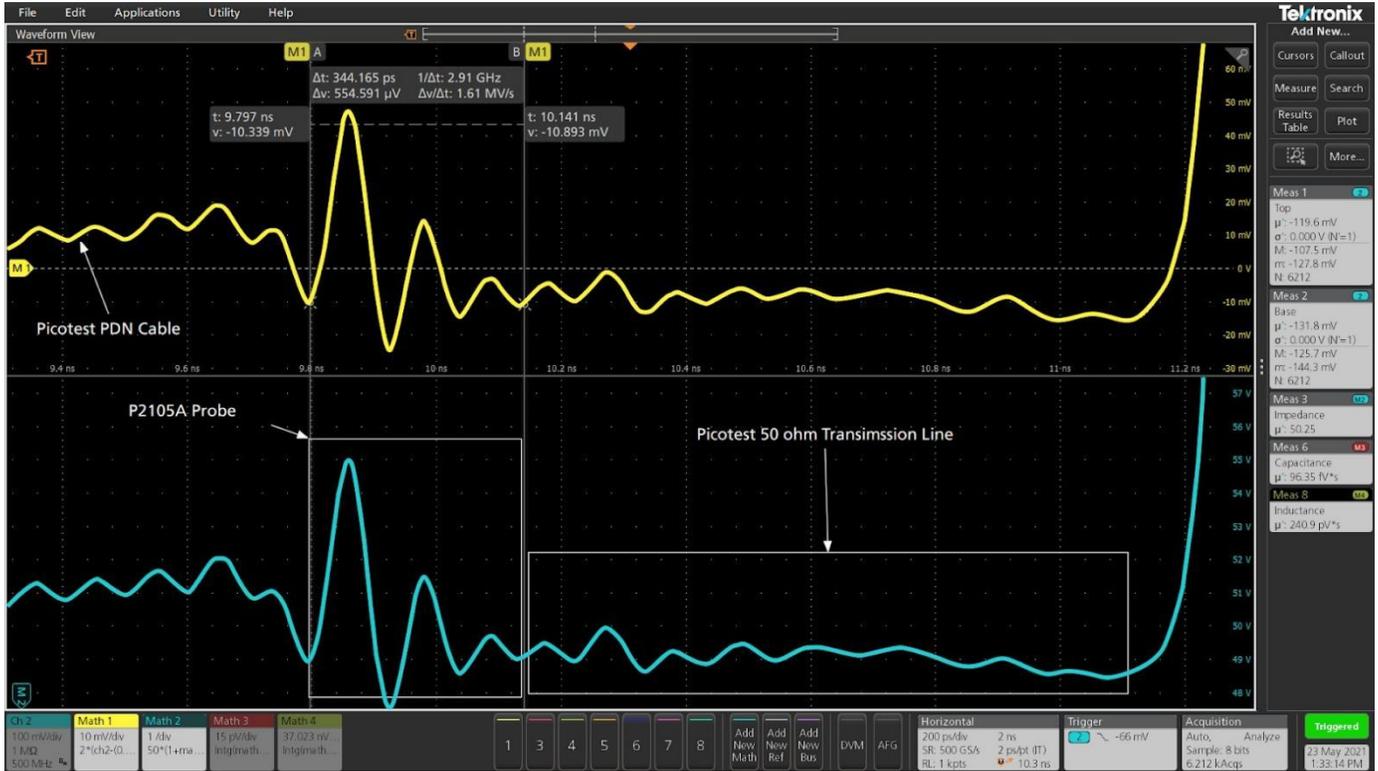


Fig. 10 - 使用P2105A探头的50Ω微带传输线上的TDR设置.

## 4.0 TDR 测量结果

### 4.1 使用TDR来测量单端信号

如第3节所示，反射系数Gamma ( $\Gamma$ ) 通过公式 (17) 计算，也如图7所示。

$$\Gamma = \frac{R_{ref} - Z_{DUT}}{R_{ref} + Z_{DUT}} \quad (18)$$

从公式 (18) 开始，解决DUT的阻抗，并由公式 (19) 表示。

$$Z_{DUT} = R_{ref} \cdot \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (19)$$

其中，附录中的表2定义了建立单端阻抗测量所需的数学函数。

## 4.2 使用TDR测量电感和电容

TDR还可用于测量串联电感和并联电容。其中串联电感显示为正，并联电容显示为负，如下图11所示。有一件事可能令人困惑的是，这取决于脉冲是上升还是下降。J2154A使用两个负向前进脉冲，其中一个互补的。我们通过归一化反射系数 ( $\Gamma$ ) 来解决这个问题，这样开路为+1V，短路为-1V

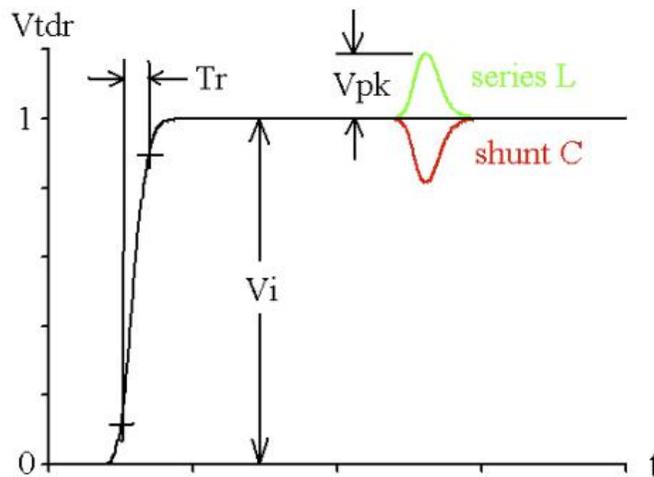


Fig. 11 - 串联电感(L)和并联电容(C)的TDR示例[15].

如果光标放在一个片段的开始和结束，可以通过对各自的片段积分来找到电感或电容。这些方法在史蒂夫·桑德勒的一篇信号完整性期刊文章中[16]都有定义，通过使用示波器光标来测量串联电感或并联电容。

首先，在波的每个边缘设置波形光标，一个在波的开始，一个在波的结束，并使用数学函数与时间积分，以计算并联电容或串联电感。计算电容和/或电感所需的数学函数定义见附录中的表2。以下公式 (20) 表示并联电容的积分方程，和公式 (21) 近似。公式 (22) 是串联电感的积分方程，和公式 (23) 近似。其中，假设Rref为50Ω。

$$C = \frac{2}{R_{ref}} \int_0^{\infty} \Gamma \cdot dt \quad (20)$$

$$C \approx \frac{2}{R_{ref}} \cdot \Delta\Gamma \cdot t \quad (21)$$

$$L = 2 \cdot R_{ref} \int_0^{\infty} \Gamma \cdot dt \quad (22)$$

$$L \approx 2 \cdot R_{ref} \cdot \Delta \Gamma \cdot t \quad (23)$$

如图12、13和14所示，一个3 pF小电容被焊接在没有保护膜的50Ω微带线的中间。

从示波器的波形观察到，3 pF相对容易看到，所以你通常可以用Picotest TDR做远低于pF级的测量。

门控光标数学函数显示电容为2.7pF，在3pF电容的10%容差范围内。

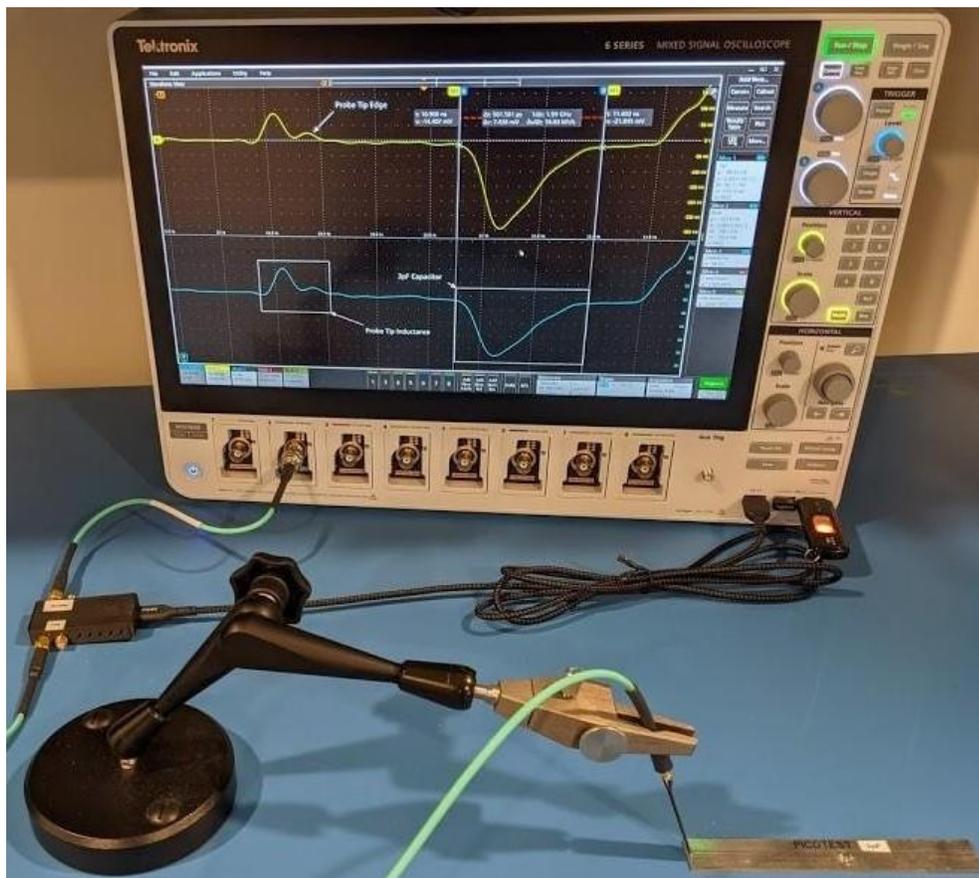


Fig. 12 - 使用P2104A探头和J2154A TDR做PCB上3pF电容测试的TDR测量设置。



Fig. 13 - 使用P2104A探头对3pF电容的TDR测量设置。

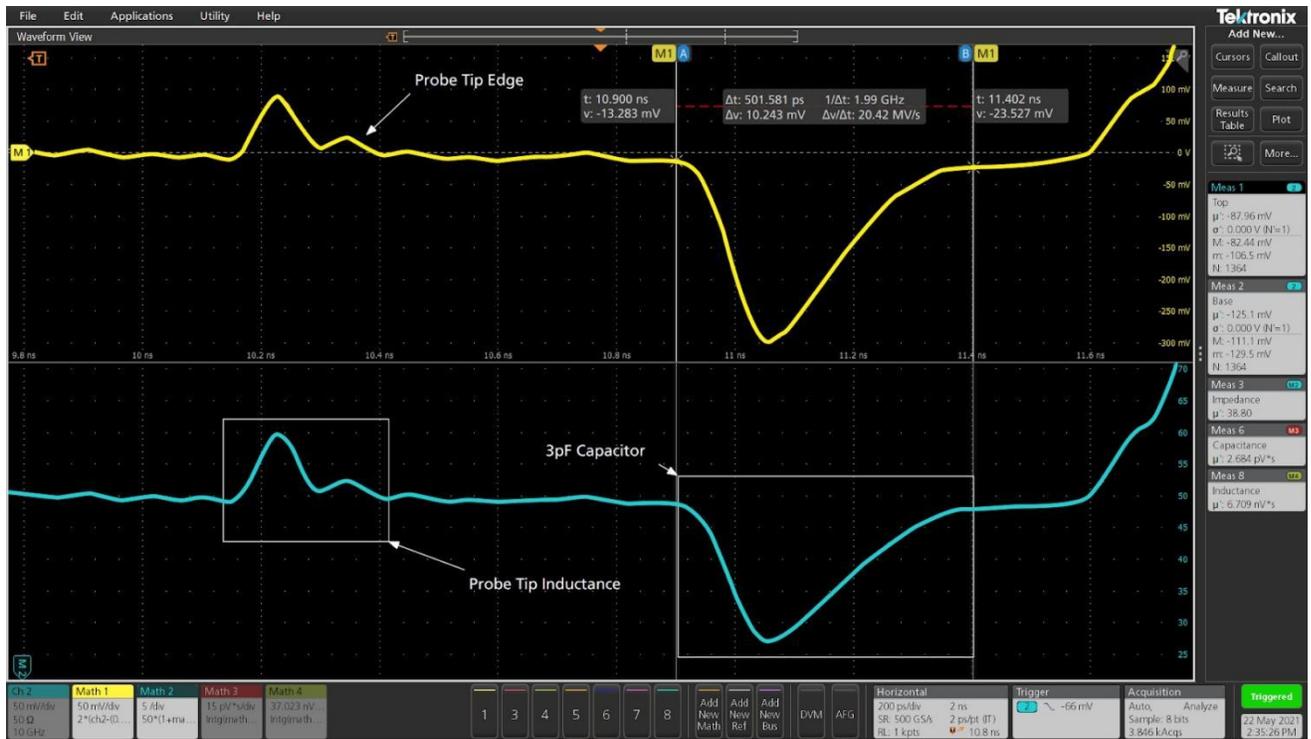


Fig. 14 - 3pF电容、P2104A探头和J2154A TDR电容的TDR测量结果。

如图15和图16所示，一个500 fF小电容以并联的方式被焊接在保护膜的50Ω微带线的中间。通过示波器波形观察，如图16所示，539.5 fF的电容，同样在该芯片电容的10%容差内。



Fig. 15 - 使用P2104A探头测试500fF电容的TDR测量设置.

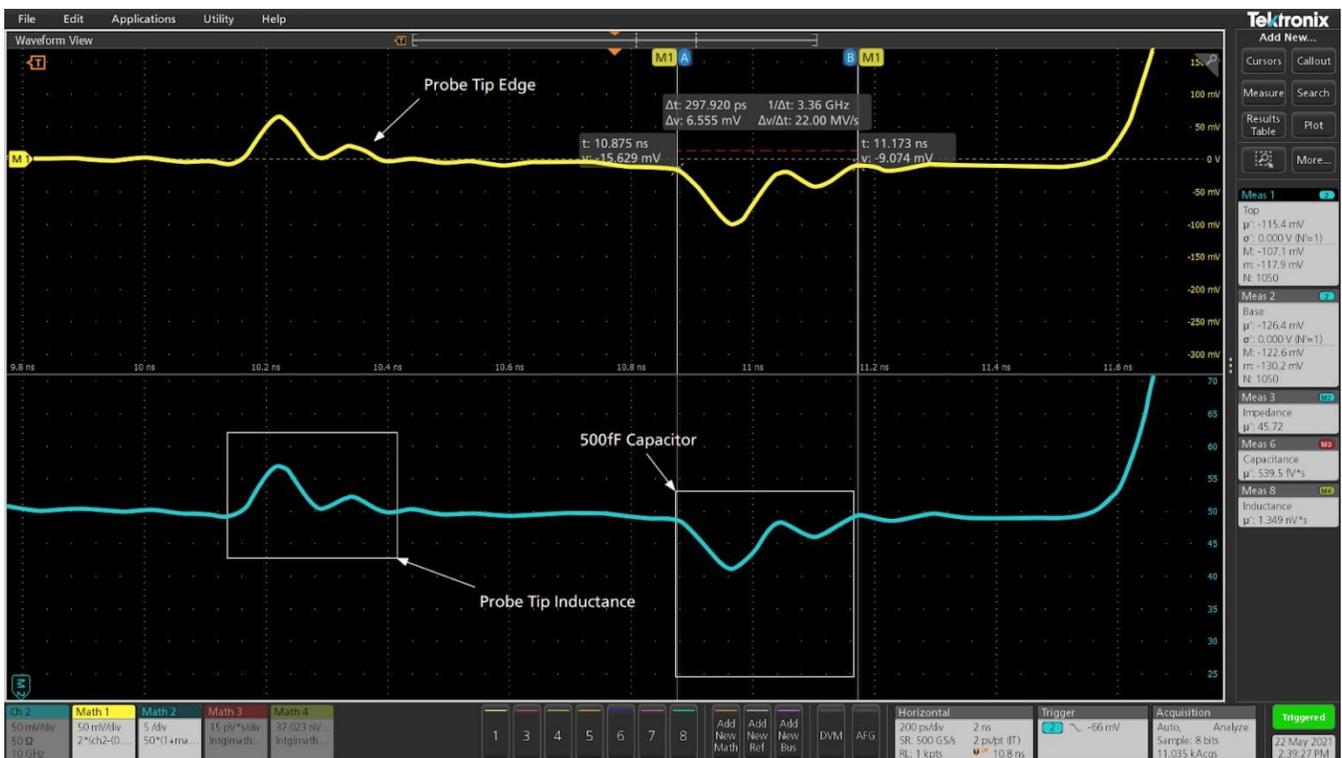


Fig. 16 - 带有P2104A探头和J2154A TDR测试500fF电容的TDR测量结果.

如图17、18和19所示，一个陶瓷芯片与50Ω微带线串联焊接。由示波器波形观察到，如图19所示，测量到219.5 pH的电感。

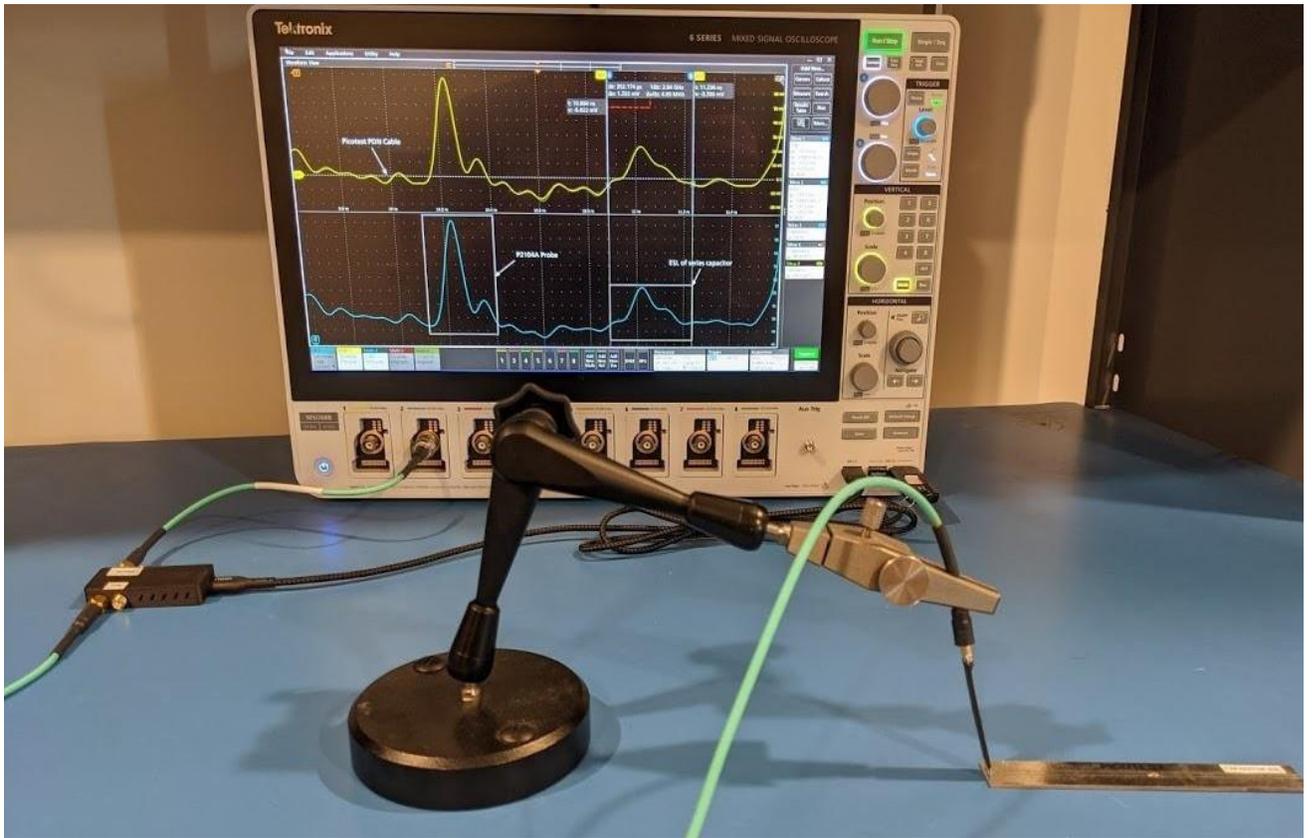


Fig. 17 - 使用P2104A探头测量串联电容的ESL的TDR测量装置.



Fig. 18 - 使用P2104A探头测量串联电容的ESL的TDR测量装置.

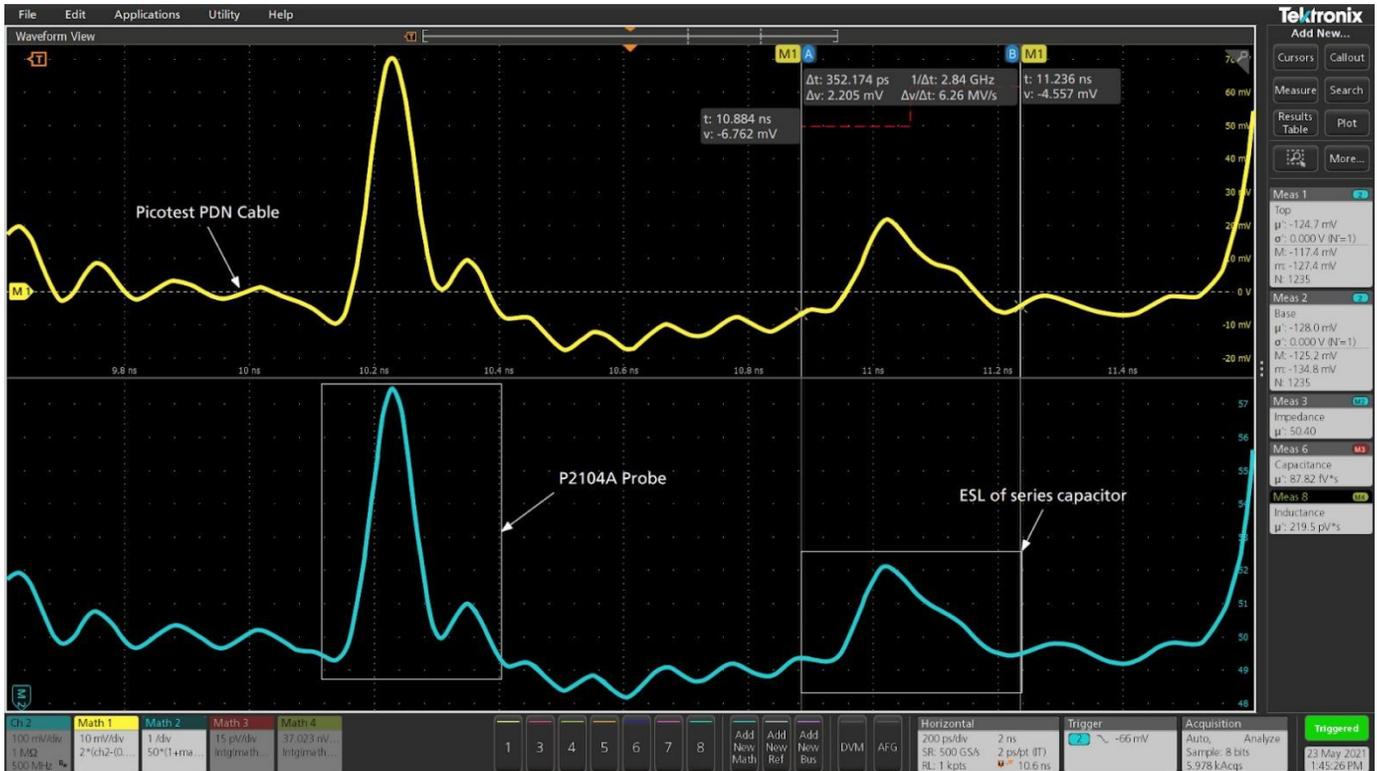


Fig. 19 - 使用P2104A探头测量串联电容的ESL的TDR测量装置。

### 4.3 使用TDR计算 $D_k$

长度、时间和介电常数都是相关的。如果我们知道这三个中的任何两个，我们可以使用TDR来求解第三个。如果我们使用一个已定义的结构，其中我们知道传输线的长度，那么我们就可以测量时间和计算介电常数。如果介电常数 ( $D_k$ ) 已知，这种方法也可以用来确定两根匹配电缆之间的时延。反之亦然，通过测量时间延迟来计算电缆的 $D_k$ 。然而，在微带线中，信号看到的有效电介质不是层压板的体积值。

$$\text{Length} = \frac{1}{\sqrt{D_k}} \cdot \frac{\Delta\text{time (ns)}}{2} \quad (24)$$

$$D_k = \left[ \frac{5.9 \cdot \text{Time (ns)}}{\text{Length (in)}} \right]^2 \quad (25)$$

通过公式 (24)，我们可以求解 $D_k$ 得到公式 (25)，它可以用TDR测量任意两个结构之间的往返时间后计算 $D_k$ ，如DUT所示，如图20所示。

图20描述了在使用P2104A单端口探头测试Picotest的演示PCB，用于此测量的测试，其中使用J2154A TDR测量了结构间隔3英寸的轨迹。

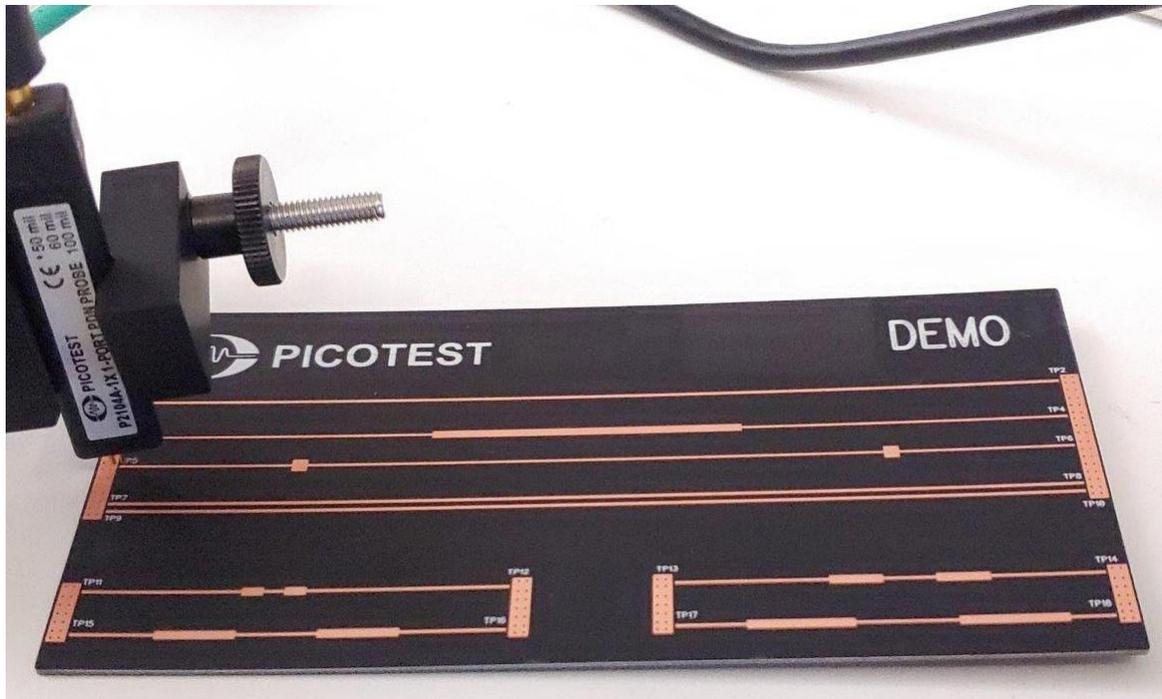


Fig. 20 - 使用P2104A探头对TP5导线进行TDR测量设置。

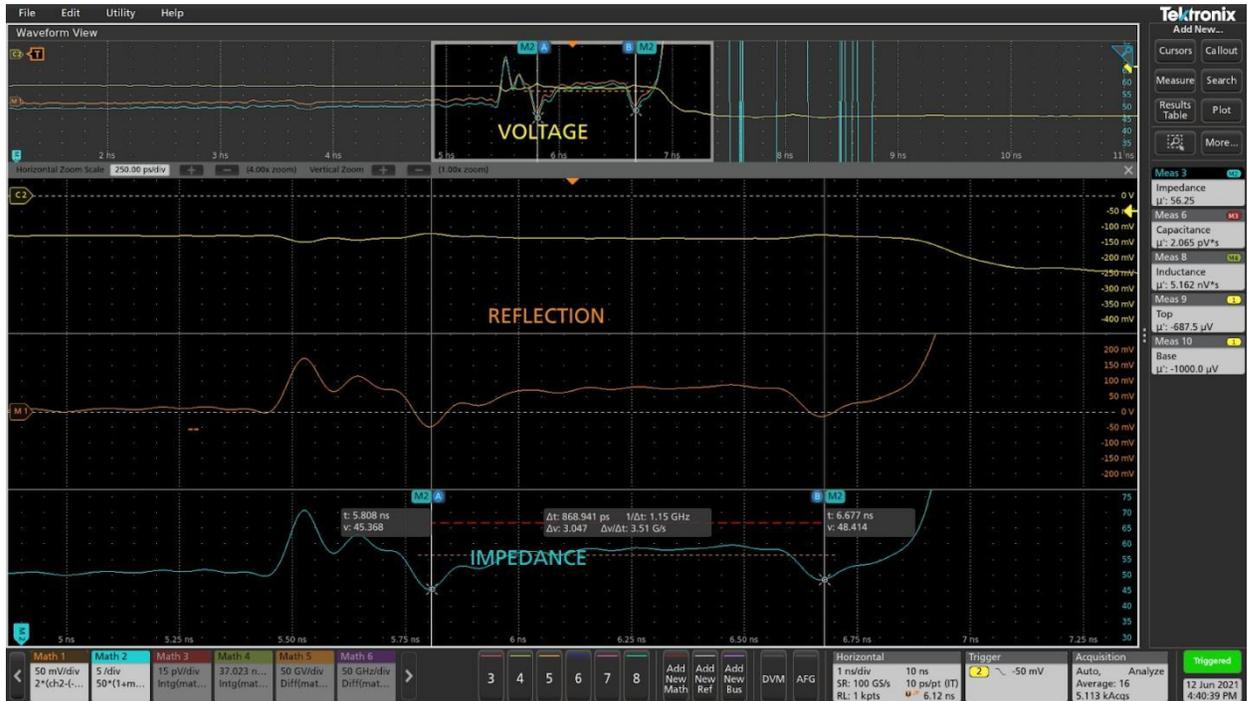


Fig. 21 - 使用P2104A探头对TP5导线进行TDR测量设置

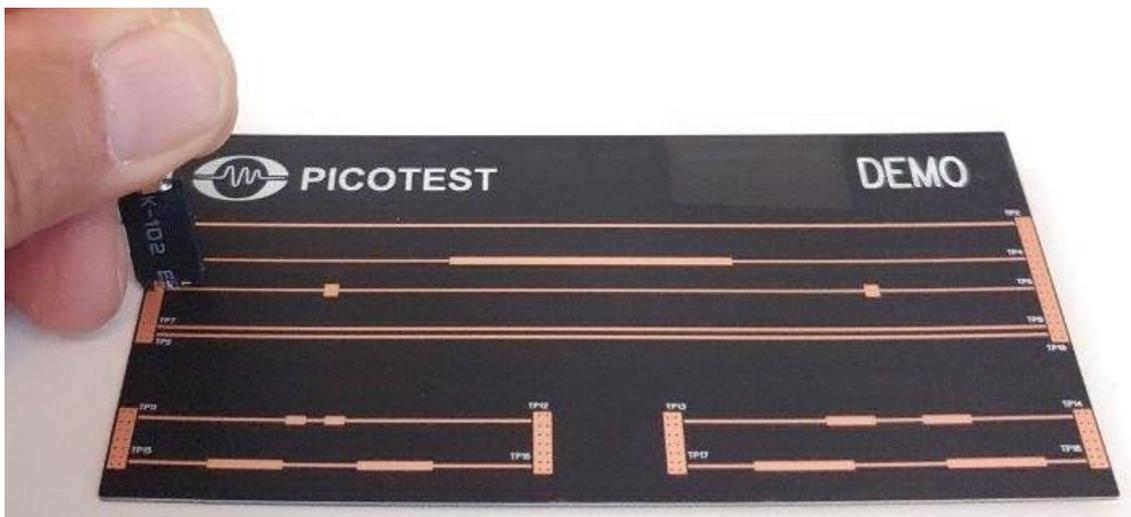


Fig. 22 - 使用P2105A探头，对PICOTEST 演示板TP5导线做TDR测试.

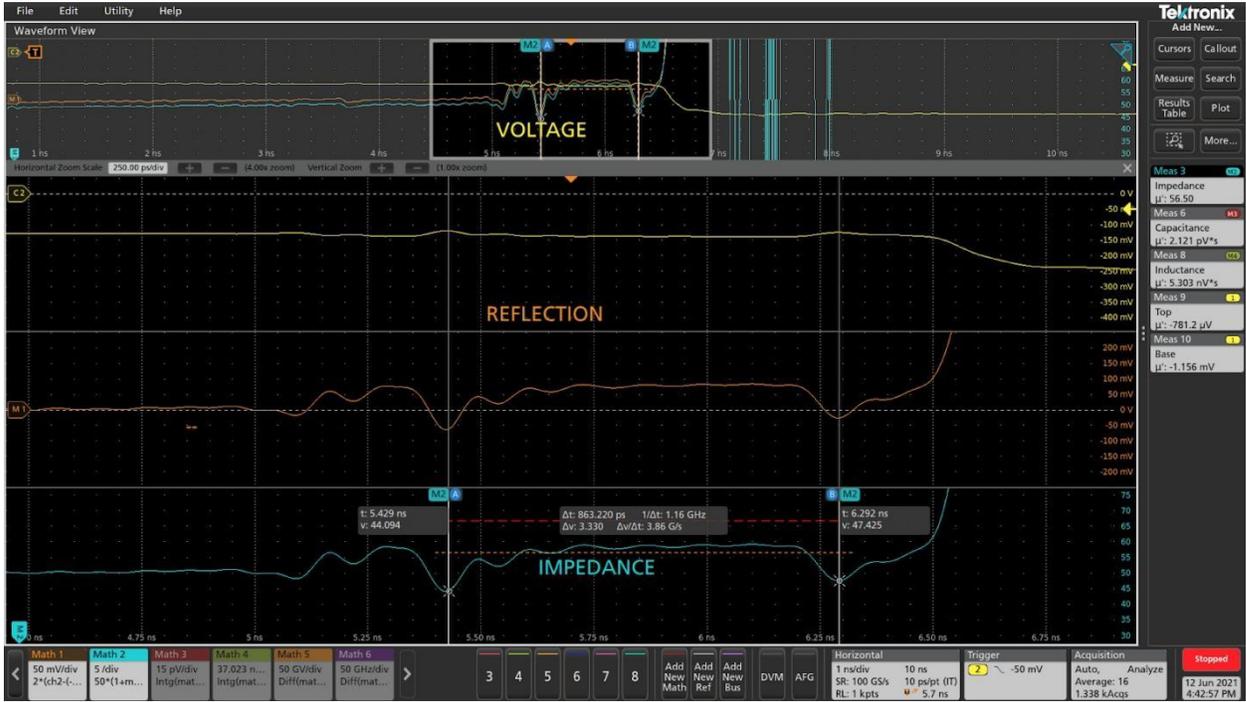


Fig. 23 - 使用P2105A探头，对PICOTEST 演示板TP5导线做TDR测试

Picotest 演示板如图22，是使用Rogers RO4003C的两层PCB，它的 $D_k = 3.55$  [17].如图21的结果所示，我们可以很容易地测量3英寸的微带线。如图21所示的结果，使用P2104A单端口探头，在像差之间测得的往返时间为868.9 ps.

参考公式（25）和图21中使用P2104A探头的测量结果，我们可以计算出Picotest测试板的 $D_{keff}$ 为：

$$D_{keff} = \left[ \frac{5.9 \cdot 0.8689}{3} \right]^2 = 2.92 \quad (26)$$

然而，由于我们测量的是一个微带线，这是体积介电常数和空气场与 $D_k = 1$  [17]的组合贡献的有效值。利用公式（27）和公式（28）提出了一种将体积介电常数近似为有效介电常数的方法。

其中，公式（27）使用轨迹宽度(w)和介电厚度(h)计算修正因子(a)。

$$a = \frac{1}{\sqrt{1 + 12(h/w)}} \quad (27)$$

在图22所示的Picotest演示板上，轨迹宽度(w)等于14.9mils，电介质厚度(h)等于8 mils。对于公式(27)，a=为0.366。

利用校正因子，可以通过公式(28)找到体积电介质：

$$D_k = \frac{2 \cdot D_{keff} - 1 + a}{1 + a} \quad (28)$$

参考公式(27)和公式(28)和公式(26)所示的结果，我们可以根据P2104A探头的测量结果找到体积介电常数Dk。该结果用公式(29)表示。

$$D_k = \frac{2 \cdot D_{keff} - 1 + a}{1 + a} = \frac{2 \cdot 2.92 - 1 + 0.366}{1 + 0.366} = 3.81 \quad (29)$$

而如图23所示，用P2105A探头测量的两个像差之间的往返时间为863.2 ps。

参考公式(25)和图23中使用P2105A探头的测量结果，我们可以计算出Picotest测试板的D<sub>keff</sub>为：

$$D_{keff} = \left[ \frac{5.9 \cdot 0.8632}{3} \right]^2 = 2.88 \quad (30)$$

参考公式(27)和公式(28)以及公式(30)所示的结果，我们可以根据P2105A探头测量的结果找到体积介电常数Dk。这个结果用公式(31)表示。

$$D_k = \frac{2 \cdot D_{keff} - 1 + a}{1 + a} = \frac{2 \cdot 2.88 - 1 + 0.366}{1 + 0.366} = 3.75 \quad (31)$$

如前所述，由于在Picotest TDR演示板上测量的线路是一个微带线，因此公式(26)和公式(30)所显示的结果并不代表体积介电常数。然而，公式(29)和公式(31)显示的结果确实代表了体积介电常数的近似值，这表明它非常接近Rogers RO4003C [17]的数据表值。对于Rogers RO4003C，将测量的有效介电常数转换为体层压板介电常数的唯一方法是使用二维场求解器。最后，重要的是要记住介电常数与频率和厚度有关。

#### 4.4 使用TDR来测量差分信号

用于差分测量应用的J2154A TDR的设置与第3节中定义的TDR单端测量设置非常相似。最大的区别是在示波器和J2154A TDR上都使用了两个通道。这允许测量任何差分对，如CLKs、PCIe、MiPi、HDMI、DDR频闪灯等。为差分TDR测量所设置的数学函数定义见附录表3。此外，与进行单端TDR测量类似，在进行差分TDR测量时设置参考点也很重要。

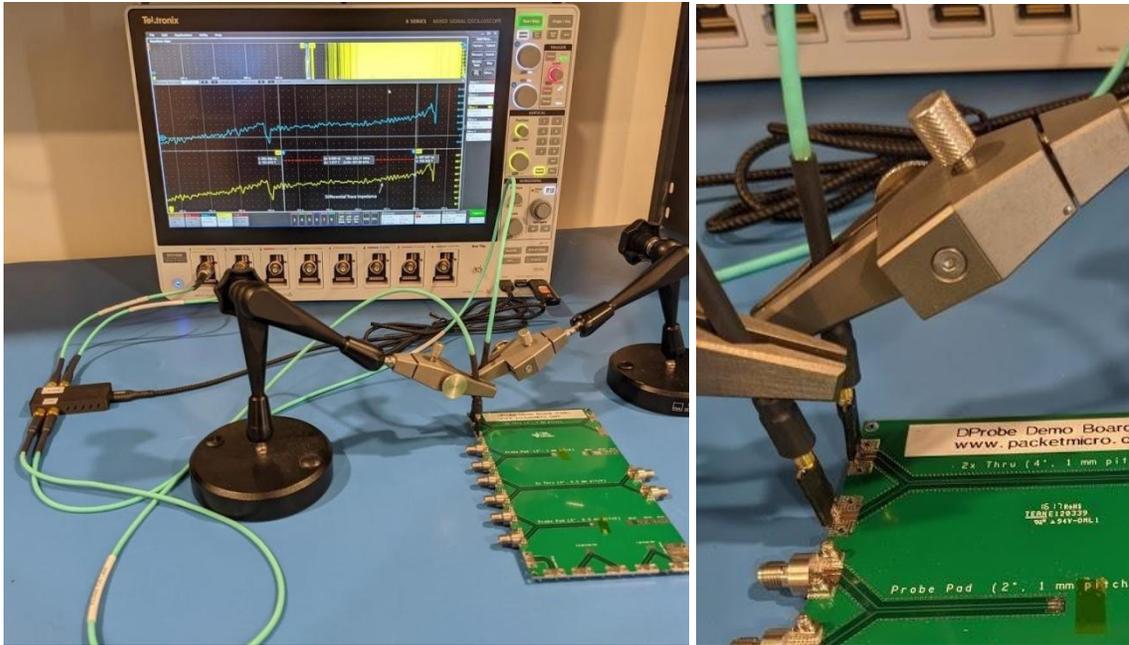


Fig. 24 - 使用P2105A探头对演示版DProbes (CB6) 进行差分TDR测试的设置

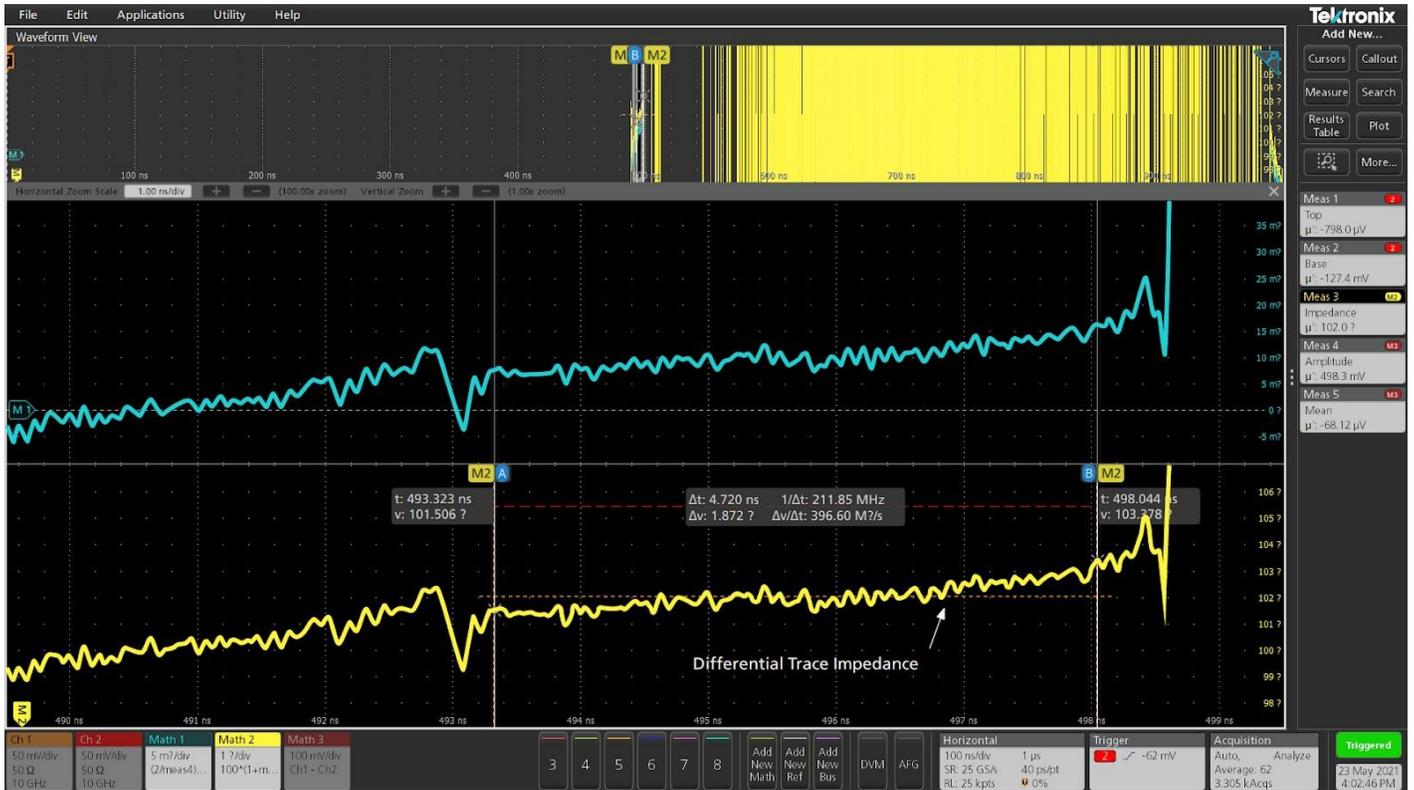
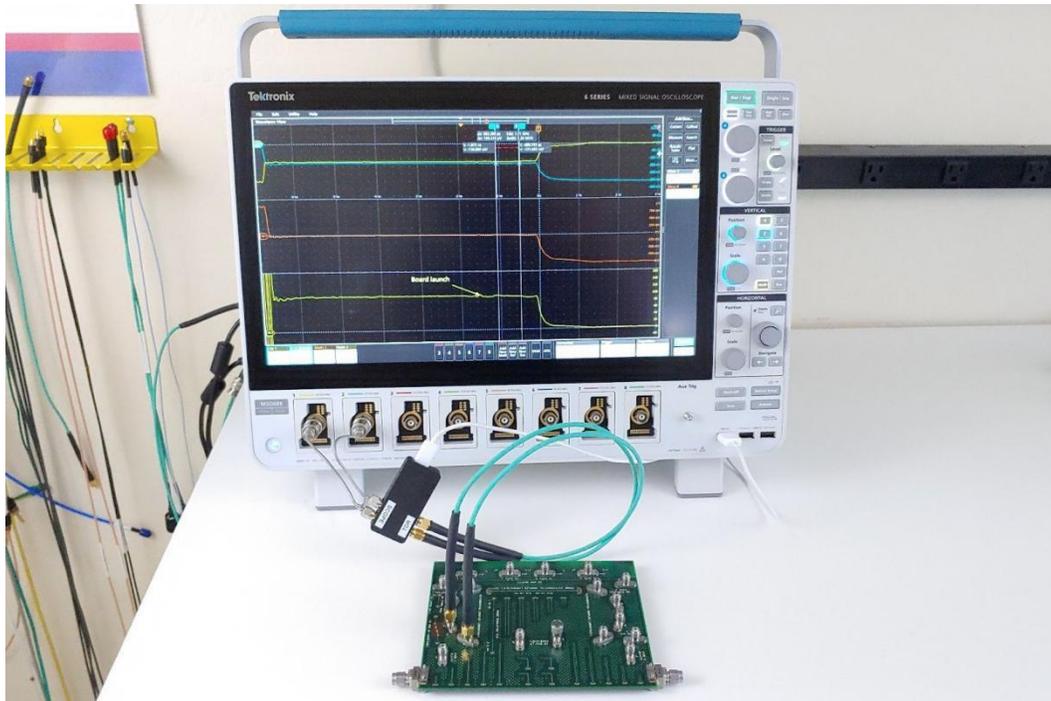


Fig. 25 - 使用P2105A探头对演示版DProbes (CB6) 进行差分TDR测试的设置

图24显示了使用Picotest J2154A TDR和两个Picotest P2105A探头测量4英寸差分对的连接设置。如图25中的结果所示，我们可以很容易地测量4英寸的差分对。结果表明，平均差分阻抗为102Ω。



**Fig. 26- 使用SMA直接连接DUT做差分TDR测试.**

图26显示了如何使用J2154A与DUT进行直接连接以差分线路信息的另一个例子。

测量结果如图27所示，其中平均差分阻抗为~98Ω.

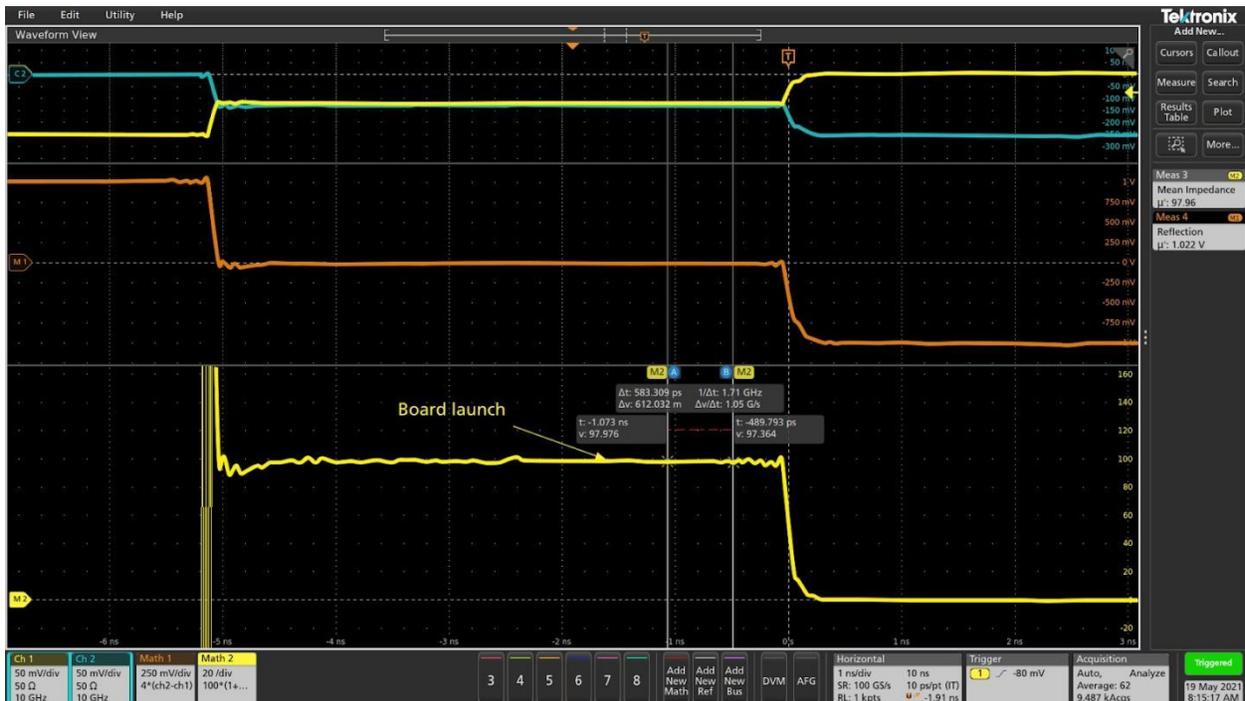


Fig. 27 - Differential TDR Measurement Result with Direct SMA Connections to DUT.

## 5.0 总结

Picotest的J2154APerfectPulse®差分TDR可用于测量PCB板和电缆阻抗、介电常数、传输线路长度、距离、故障距离、电感和电容。

除了作为一个差分TDR外，由于Picotest J2154A TDR有两个通道，它也可以作为一个时域传输（TDT）来测量近端串扰（NEXT）和远端串扰（FEXT）。这可以提供DUT的传播延迟和插入损耗，以及两个耦合传输线之间的偏差，如差分时钟对。

如前所述，Picotest J2154A TDR与Tek MSO6B示波器一起使用，可用于：

- 验证差分 and 单端的可控阻抗线路
- 发现电缆、压接和焊缝中的老化或故障
- 确定电缆或线路的长度
- 故障定位（有线电视公司经常使用此位置）

最后，测量上升时间和带宽是信号发生器（TDR的）、功率分配器、示波器和探头的功能——所有这些都影响可以在DUT上测量的结构的分辨率。

当使用TDR时，需要记住一些重要的因素可能会影响准确性：

- 步进发生器的边沿速度和保真度
- 接收机的带宽和频率响应
- 探头带宽
- 仪表和DUT之间的电缆、适配器和治具
- 在进行差分测量时，时延和步进匹配

强烈建议使用稳固方案，如N2787A，ClampMan [11]，或其他探头固定夹具，以协助探头固定和定位，并提高测量一致性。

## 6.0 参考

1. TDR阻抗测量：信号完整性的基础 - [https://download.tek.com/document/55W\\_14601\\_2.pdf](https://download.tek.com/document/55W_14601_2.pdf)
2. TDR: Reading the Tea Leaves - [https://www.sisoft.com/uploads/TDR\\_Reading\\_the\\_Tea\\_Leaves\\_MS.pdf](https://www.sisoft.com/uploads/TDR_Reading_the_Tea_Leaves_MS.pdf)
3. Barnes, H. et al. “Signal Integrity Tips and Techniques Using TDR, VNA and Modeling.” Signal Integrity Journal, March 2016. <https://www.signalintegrityjournal.com/articles/174-signal-integrity-tips-and-techniques-using-tdr-vna-and-modeling>
4. IPC-™-650 Test Methods Manual - [https://www.ipc.org/sites/default/files/test\\_methods\\_docs/2-5-5-7a.pdf](https://www.ipc.org/sites/default/files/test_methods_docs/2-5-5-7a.pdf)
5. Tektronix MSO68B Oscilloscope - <https://www.tek.com/oscilloscope/6-series-mso-mixed-signal-oscilloscope>
6. Picotest J2154A PerfectPulse® Differential TDR - [https://www.picotest.com/products\\_J2154A.html](https://www.picotest.com/products_J2154A.html)
7. Picotest PDN Cable® - <https://www.picotest.com/pdn-cable.html>
8. Picotest P2104A 1-Port Probe - [https://www.picotest.com/products\\_PDN\\_Probe.html](https://www.picotest.com/products_PDN_Probe.html)
9. Picotest P2015A TDR Probe - [https://www.picotest.com/products\\_PDN\\_Probe.html](https://www.picotest.com/products_PDN_Probe.html)
10. Keysight N2787A 3D Probe Positioner - <https://www.keysight.com/us/en/product/N2787A/3d-probe-positioner.html>
11. ClampMan PCB Holder and Clamping Solution - [https://www.picotest.com/products\\_clampman.html](https://www.picotest.com/products_clampman.html)
12. RF Terminator SMA Male - 50 ohm Test Load - [https://www.amazon.com/dp/B0719C1T99?psc=1&ref=ppx\\_yo2\\_dt\\_b\\_product\\_details](https://www.amazon.com/dp/B0719C1T99?psc=1&ref=ppx_yo2_dt_b_product_details)
13. Picotest Tektronix Solutions Page - <https://www.picotest.com/tektronix.html>
14. Picotest - Master the Fundamentals of Power Integrity and Power Supply Testing - Lesson 12: TDR Measurements - <https://www.picotestonline.com/courses>
15. Time Domain Reflectometry (TDR) and Time Domain Transmission (TDT) Measurement Fundamentals - <https://kh6htv.files.wordpress.com/2015/11/an-15-tdr-tdt.pdf>
16. Sandler, S. “Measuring pH and fF With a TDR Using a Cursor Measurement.” Signal Integrity Journal, January 2021.

<https://www.signalintegrityjournal.com/articles/1997-measuring-ph-and-ff-with-a-tdr-using-a-cursor-measurement>

17. Rogers RO4000 Series High Frequency Circuit Material Datasheet - <https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/ro4000-laminates-ro4003c-and-ro4350b---data-sheet.pdf>
18. Bogatin, E. “Bogatin’s Practical Guide to Transmission Line Design and Characterization for Signal Integrity Applications.” Artech House, 2020.
19. Picotest TDR Solutions Page - <https://www.picotest.com/measurements/MeasuringPCB.html>
20. PacketMicro TDR Solutions Page - <https://www.packetmicro.com/Applications/tdr-probing.html>
21. Sandler, S. “The Goldilocks TDR.” Signal Integrity Journal, September 2020. <https://www.signalintegrityjournal.com/articles/1852-the-goldilocks-tdr>
22. Hernandez-Mejia, J. “Chapter 5 Time Domain Reflectometry (TDR).” Georgia Tech, 2016. [https://www.neetrac.gatech.edu/publications/CDFI/5-TDR\\_17\\_with-Copyright.pdf](https://www.neetrac.gatech.edu/publications/CDFI/5-TDR_17_with-Copyright.pdf)

## 7.0 附录

Table 2 - 使用J2154A TDR的单端TDR测量的数学功能设置

Oscilloscope Math FCN	Math FCN EQ	Notes
Math1	$2 \cdot \frac{\text{Ch2} - 0\text{mV}}{-250\text{mV} - 0\text{mV}} - 1$	将实际脉冲缩放为+/-1V信号作为反射系数 ( $\Gamma$ )
Math2	$50 \cdot \frac{1 + \text{Math1}}{1 - \text{Math1}}$	转换反射系数 ( $\Gamma$ )为 阻抗 ( $Z_{\text{DUT}}$ )
Math3	$\text{INTG}(\text{Math1})/25$	通过信号积分计算电容 ( $C_{\text{DUT}}$ )
Math4	$\text{INTG}(\text{Math1}) \cdot 100$	通过信号积分计算电感 ( $L_{\text{DUT}}$ )
Meas1	$\text{mean}(\text{Math2})$	提供平均单端阻抗信息。建议使用光标启用门控制。

注意：表2中列出的所有方程都已经在名为“TDR与L和C.set”的设置文件下设置好了，可以在泰克解决方案页面[13]上引用。

Table 3 - 使用J2154A TDR进行差分TDR测量的数学功能设置

Oscilloscope Math/Measure FCN	Math FCN EQ	Notes
Math1	$\frac{2}{\text{Meas4}} \cdot (\text{Math3} - \text{Meas5})$	计算反射系数 ( $\Gamma$ )
Math2	$100 \cdot \frac{1 + \text{Math 1}}{1 - \text{Math 1}}$	计算差分阻抗 ( $Z_{\text{DUT\_DIFF}}$ )
Math3	$Ch1 - Ch2$	计算这两个信号之间的差值
Meas3	$\text{mean}(\text{Math2})$	提供平均差分阻抗。建议使用光标启用门控制。
Meas4	$\text{amplitude}(\text{Math3})$	
Meas5	$\text{mean}(\text{Math3})$	

注意：表3中列出的所有方程都已经在名为“j2154a.set”的设置文件下设置好了，可以在泰克解决方案页面 [13]上引用。

中国大陆地区总经销信息：  
苏州全迪亚电子科技有限公司  
微信公众号：

0512-68086023

