

## 使用光标测量的TDR测量pH和fF

TDR是一种经常用于测量印刷电路板（PCB）测试板和电缆阻抗的仪器。TDR对于测量通孔和组件的电感和电容、探头尖端电容和电感，甚至寄生电感，收发器耦合电容这些也非常有用。这也是一种验证Hyperlynx 仿真或提取您自己的模型的简单方法。高端专用TDR通常包括这种功能，但即使使用一个简单的实时示波器，也可以使用一个简单的光标测量来得到这些结果。

你可以下载我的用于Picotest J2151A和Tektronix MSO 5/6系列示波器的设置文件。

### 理论与模拟结果

基本的TDR测量是反射系数 $\Gamma$ ，这个数据曲线基本上每个TDR都可以提供，包括使用上面引用的设置文件的J2151A。TDR使用来自 $\Gamma$ 和TDR阻抗的转换来确定传输线（电缆或PCB迹线）的阻抗，通常是50 $\Omega$ 。

$$Z_{TL} = Z_0 \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (1)$$

此阻抗转换也包含在上述引用的设置文件中。对于具有均匀 $\Gamma$ （或阻抗）的传输线，显示的TDR轨迹是一条平坦的线。门控游标用于显示两个游标之间的阻抗测量平均值。

当传输线不均匀或有附加零部件时，显示的TDR曲线不是平坦的，这是需要说明的。

反射系数 $\Gamma$ 中的正“脉冲”表示串联电感，而反射系数 $\Gamma$ 中的负“脉冲”表示并联电容。

串联电感和并联电容可由反射系数得到：

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

$$C = \frac{2}{R_{ref}} \cdot \int_0^{\infty} reflection \quad (3)$$

可以模拟一个简单的例子。图1所示的示例包括串联电感和并联电容。

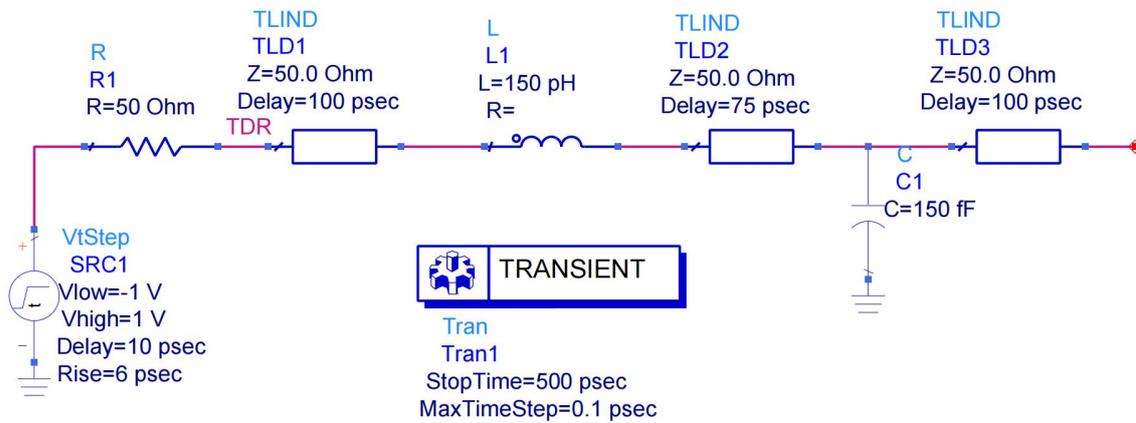


图1 示例，用于模拟150pH和150fF电容器的反射系数，放置在短的50欧姆导线线之间

仿真结果如图2所示。

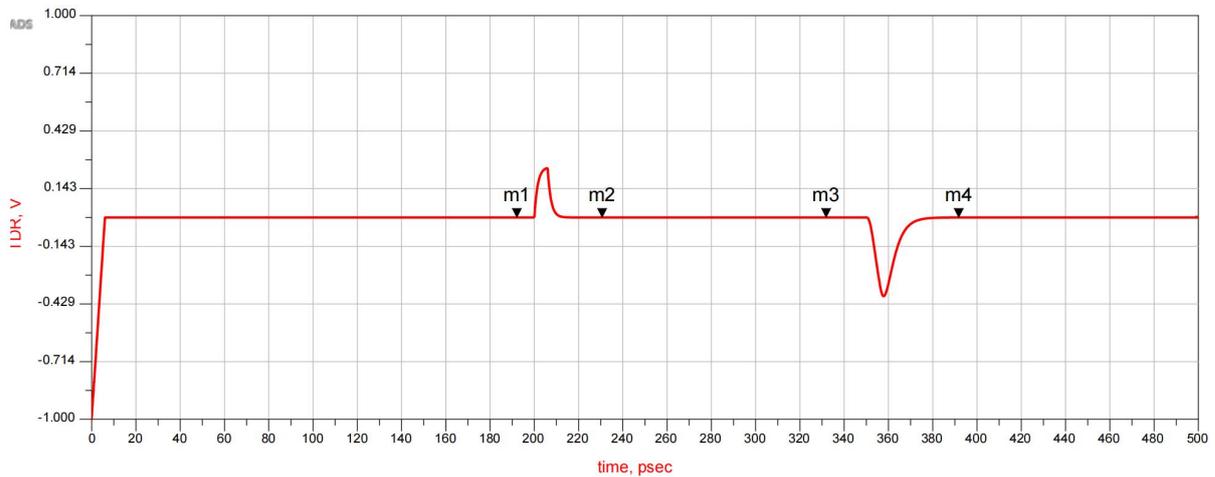


图2 电感产生一个正的“脉冲”，电容器产生一个负的“脉冲”。利用公式2和公式3，准确地计算了电感和电容。

在这个模拟结果中的第一个“脉冲”是串联电感器，它位于100ps传输线的末端。TDR可以看到往返路径，因此可以正确地显示200ps。

并联电容放置在串联电感器的75ps之后，TDR再次正确地将往返路径视为  $2 \cdot (100ps + 75ps)$  或350ps。

在每个“脉冲”之前和之后放置光标以计算积分时间。光标的放置位置并不重要，因为脉冲前后的平坦区域对整个积分的结果贡献很小。

## 实验结果

一个500fF的贴片电容器被焊接到一个共面的PCB演示板上。第二个共面演示板的中心导线被切割，并将一个10nF电容器焊接到切割口两端。这样来测量电容器的ESL。



图3 使用了两个共面演示板进行实验测量。一个500fF 芯片电容器在一个演示板的中心进行并联焊接，一个10nF 芯片电容器在第二个演示板的中心进行串联焊接。



图4：已安装的电容器的特写视图。在左侧演示板上切割中心导线，串联电容器焊接。一个500fF电容器被焊接在右侧演示板上的中心导线和接地之间。

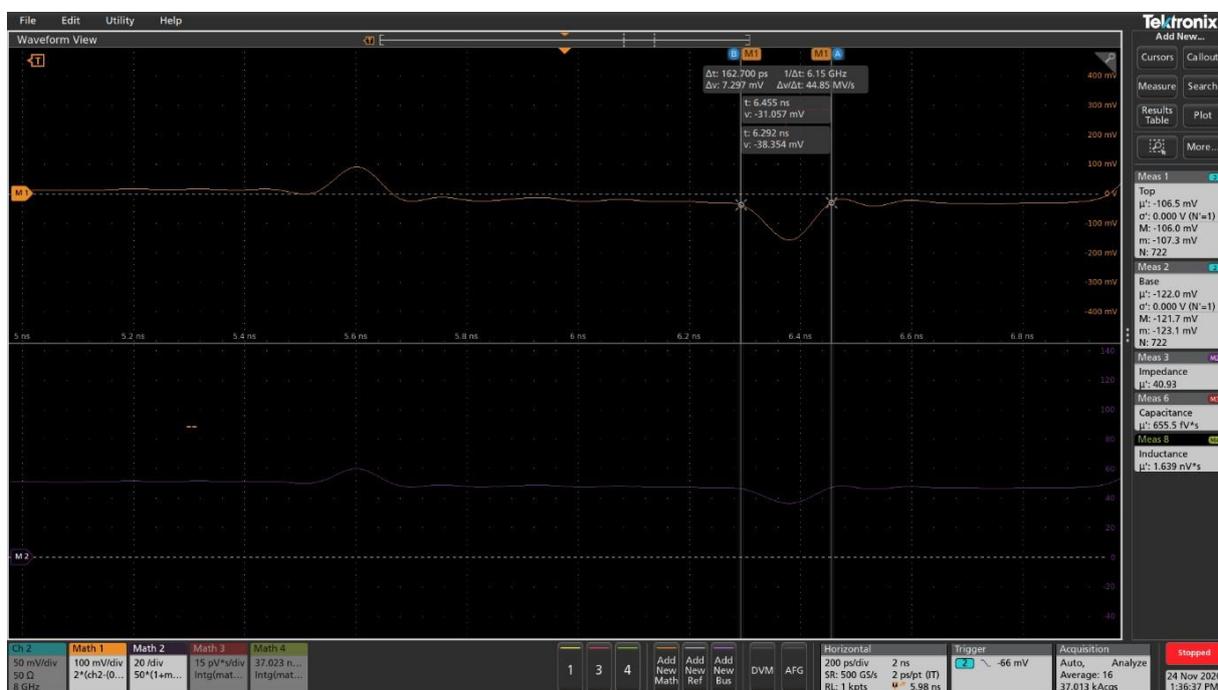


图5把电容公式输入到示波器中的Math 3，测量函数M3光标之间的计算结果。负的“脉冲”表示电容器，M3测量功能显示655fF，在电容的±200fF范围内。



图6将电感方程输入示波器中的Math 4，测量函数M4光标间的结果。正的“脉冲”表示电感，M4测量功能显示197pH。左边较大的“脉冲”是P2104A，100mil间距TDR探头的电感。

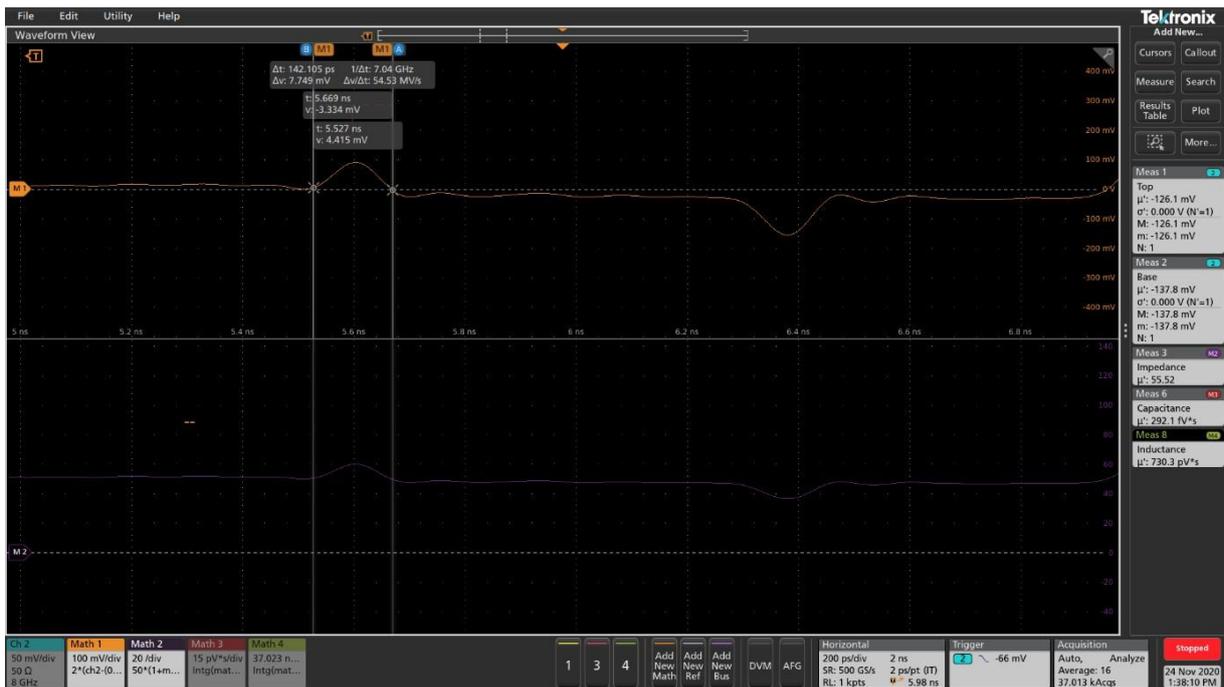


图7使用P2104A 60mil间距TDR探针，光标放置在探针尖端产生的正“脉冲”的两侧。使用M4测量函数，探针尖端电感显示为730pH

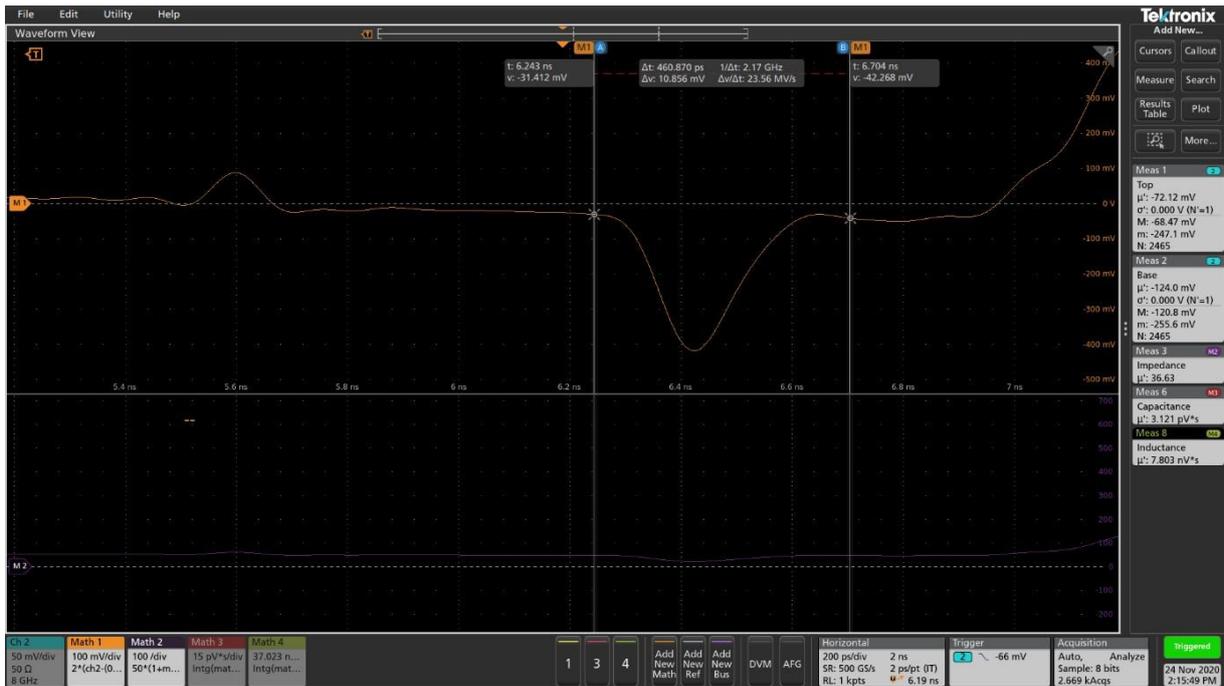


图8 把550fF的电容替换为3.3fF贴片电容。使用P2104A 60mil间距TDR探头，光标放置在电容产生的负“脉冲”的两侧。使用M3测量功能，电容显示为3.12pF，在电容的10%公差范围内。

## 结论

TDR提供了对500fF电容器和280pH电感器的精确测量。在这两种情况下，信噪比都很好，轨迹也很清晰。这表明，可以测量更小的电感和电容值。

## 测量小贴士

- 使用了一个测量曲线，TDR探头连接到通道2上也是一样。通过使波形尽可能多地填充窗口，并包括跟踪平均，从而最大化该通道的信噪比。
- 设置文件包括脉冲电压、反射系数、阻抗和电容和电感的计算。禁用未使用的曲线将更好地查看所需的波形。请确保关闭无关的显示，**但不要删除数学函数**。在关闭通道显示前，请最大化信噪比。
- 电容被焊接在演示板的中间，因其简单且平整的测试导线，可以减少测量附近的反射
- 更小的探头间距提供更高的带宽，可以更清晰的测量。

**References**

1. Power Integrity Measuring, Optimizing, and Troubleshooting Power-Related Parameters in Electronics Systems, Sandler, McGraw-Hill
2. Power Integrity Using Ads, Sandler, Davis, McGraw-Hill
3. [http://www.picotest.com.cn/TheApplication/info\\_itemid\\_18.html](http://www.picotest.com.cn/TheApplication/info_itemid_18.html)
4. <https://www.tek.com/document/fact-sheet/tdr-impedance-measurements-foundation-signal-integrity>
5. [https://www.sisoft.com/uploads/TDR\\_Reading\\_the\\_Tea\\_Leaves\\_MS.pdf](https://www.sisoft.com/uploads/TDR_Reading_the_Tea_Leaves_MS.pdf)