

2014年泰克测试测量技术研讨会-厦门

TDR阻抗及静电产生原理和防范措施简介



泰克科技（中国）有限公司 王宏军

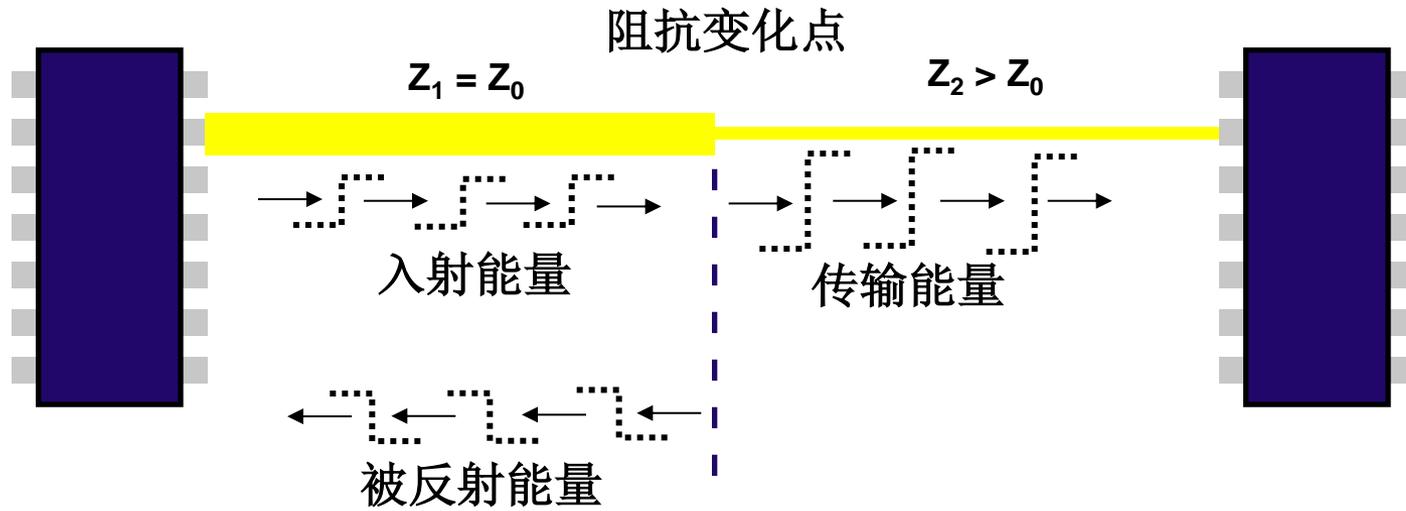
目录

- **TDR概述及原理**
- **高速串行数据链路时域分析-TDR**
- **高速串行数据链路频域分析-S参数**
- **80A09静电防护模块**
- **结束**

TDR概述及原理

什么是TDR?

- TDR = Time Domain Reflectometry 时域反射计
- 原理：当传输路径中发生阻抗变化，部分能量会被反射，剩余的能量会继续传输。反射回的能量、注入到媒介的能量与阻抗的变化有理论上的数学关系。只要知道发射波的幅度及测量反射波的幅度，就可以计算阻抗的变化。同时只要测量由发射到反射波再到达发射点的时间差就可以计算阻抗变化的位置。



TDR概述及原理

IPC规范规定的阻抗、差分阻抗测试方法

- TDR是测量特性阻抗最简明的方式
 - PCB 线路 **IPC-TM-650**
 - 电缆
 - 多芯片模块
- 发现和测量阻抗不连续点或变化
 - 在连接器中
 - PCB上的拐角和过孔
 - 从连接器转到电路板，或从电路板转到IC封装
- 基本TDR的多项扩展非常重要
 - 差分TDR
 - TDT – 发送测量，而不是反射测量
 - 串扰 (差分, 单端)



ASSOCIATION CONNECTING
ELECTRONICS INDUSTRIES ®

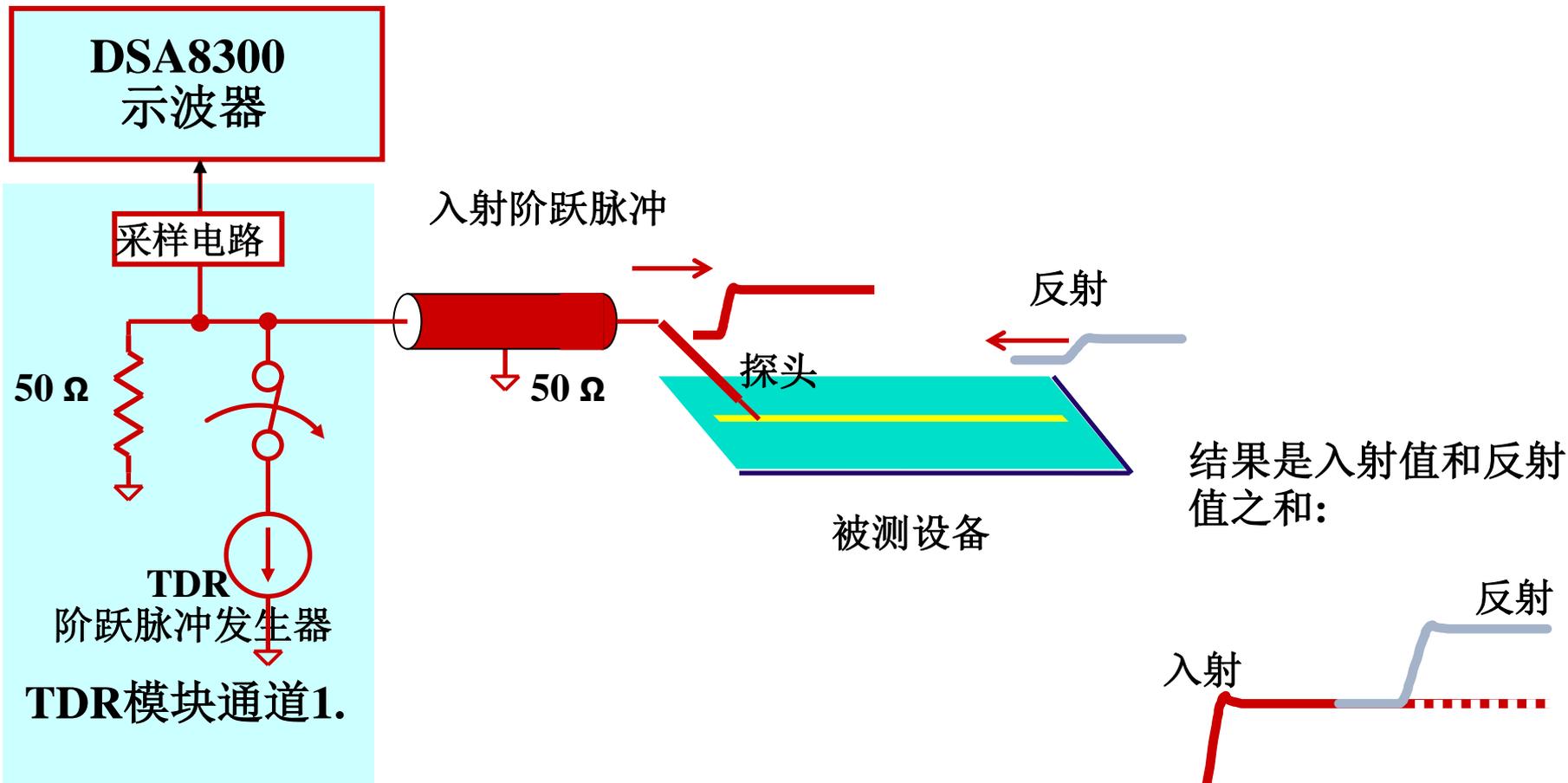
2215 Sanders Road
Northbrook, IL 60062-6135

IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL

测试PCB、Cable、Connector等互连环境的特性阻抗的最常用的方法是使用时域反射计TDR。TDR规范由IPC.org (美国电子电路和电子互连行业协会)制订，可以在网站上免费下载：

www.ipc.org/4.0 Knowledge/4.1 Standards/test/2.5.5.7.pdf

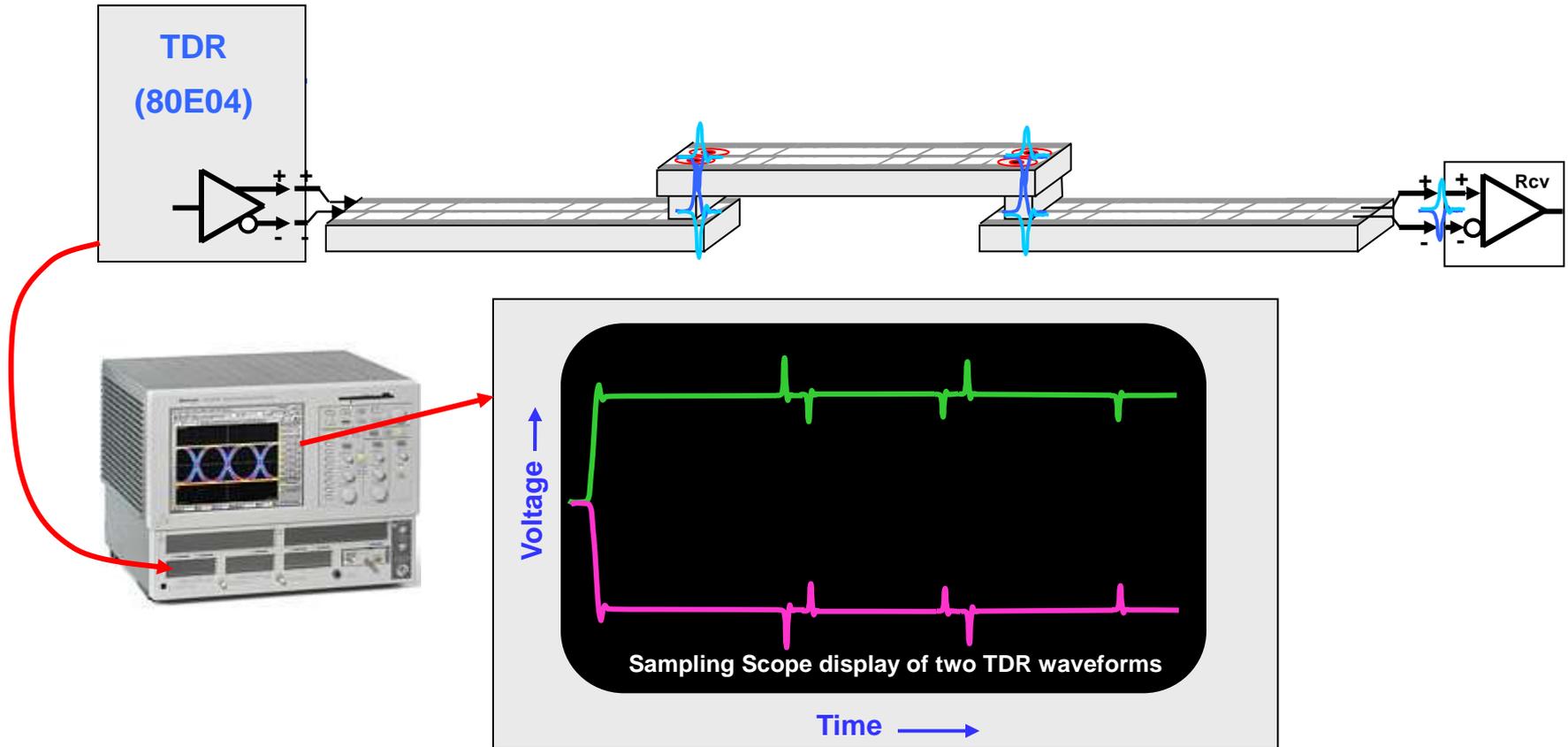
TDR概述及原理—典型系统



KEITHLEY
A Tektronix Company

Tektronix

TDR概述及原理



- Two TDR sampling channels allow the differential impedance between the DATA+ and DATA- serial paths to be measured.

TDR概述及原理——TDR单位: Rho单位; Z (非线性)

测得的 ρ

$$\rho = \frac{V_{reflected}}{V_{incident}}$$

计算的 ρ

$$\rho = \frac{Z_L - Z_{ref}}{Z_L + Z_{ref}}$$

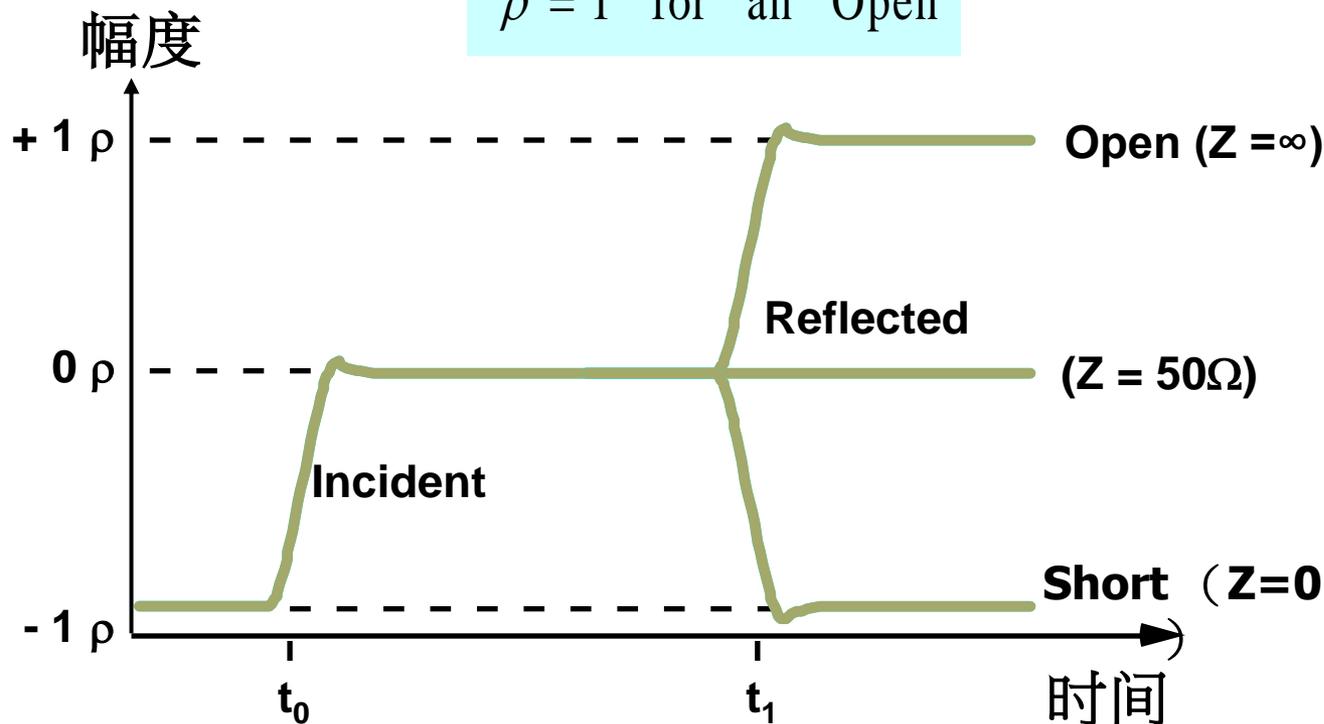
$$\rho = 0 \text{ at } Z = Z_0$$

$$\rho = -1 \text{ for a Short}$$

$$\rho = 1 \text{ for an Open}$$

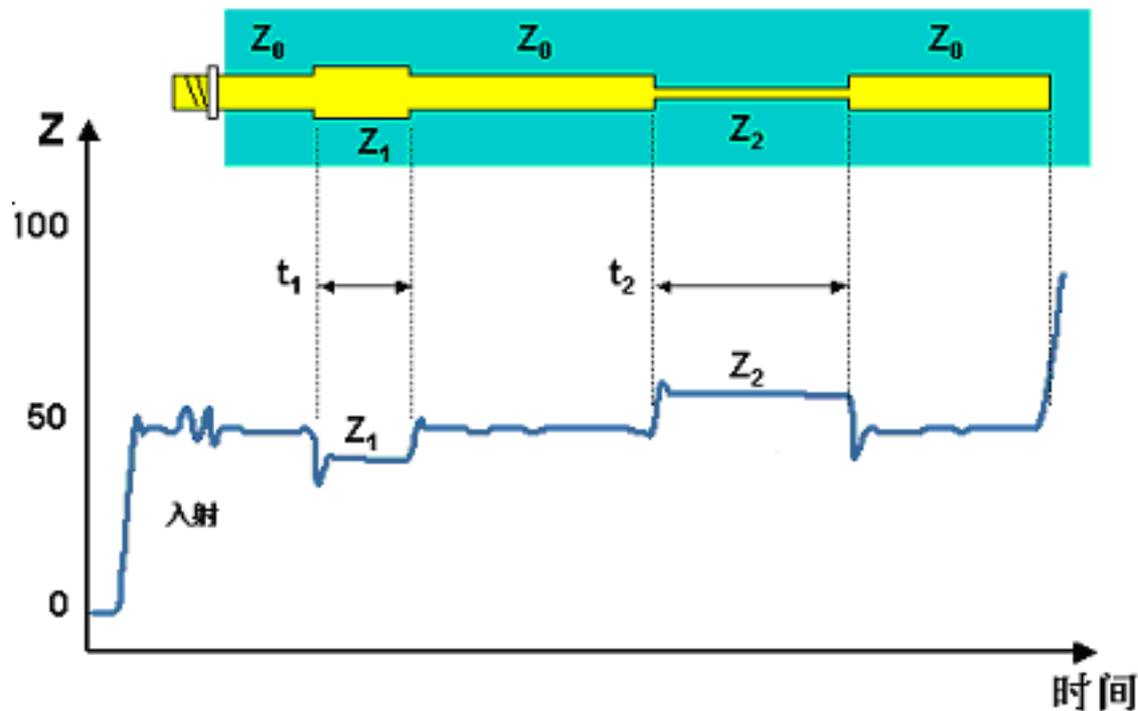
测得的 Z

$$Z = Z_{ref} \frac{1 + \rho}{1 - \rho}$$



TDR曲线映射着传输线的各点

- 其中 ρ 是反射系数， Z_0 是参考阻抗（一般为50ohm，由测试系统决定）， Z 是待测阻抗。由此仪器可以计算显示出传输线各个点的阻抗，从而可以在仪器的屏幕上显示一条TDR曲线，曲线的每一点对应传输线上的每一点的反射系数或特征阻抗。



计算阻抗变化点的位置

- 同时通过测量被反射信号的传输时延，就可以计算阻抗变化，即反射点的位置：

$$L = \frac{V * T}{2} = \frac{C * T}{2\sqrt{\epsilon_r}}$$

V = 电信号在介质中的传输速度

T = 从发出信号到反射信号再达到出发点之时间

C = 光速

ϵ_r = 介电常数

常见的介电常数

Materials	ϵ
Air	1.0006
Teflon Coax Cable	2.06
Teflon	2.2
Polyethylene	2.25
Rubber (hard)	3
Silicon Dioxide	4
Modified Epoxy	4.2
FR4 epoxy	4.4
Bakelite	4.8
Glass	5.5
Corning glass	5.75
Alumina 92%	9.2
Alumina 96%	9.4
Silicon	11.9
Ferrite	12
Gallium Arsenide	12.9
Diamond	16.5
Water distilled	81

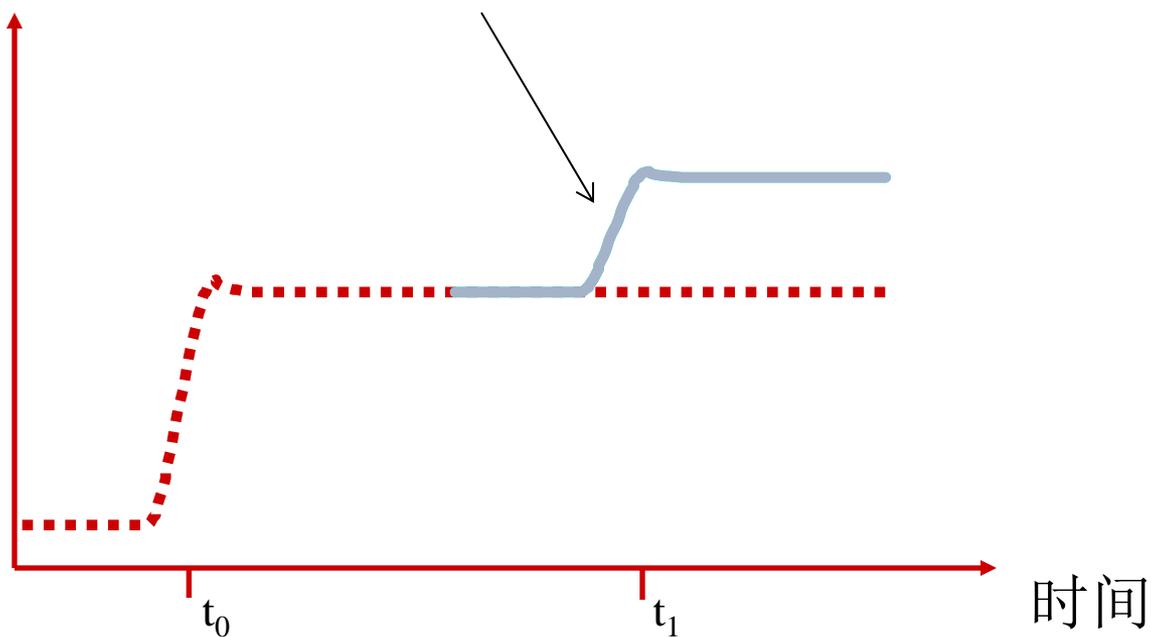
- 一般FR4 PCB印刷线路板的介电常数为：4.4。注意：在多层线路板表面最外围的路径，其介电常数在1(空气)与4.4之间；内层路径才是4.4

- 因为 $V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}}$ ，所以越小的 ϵ_r ，信号在介质中的速度越快。

- 在FR4 PCB中，
 - 1ns传输时延 => ~15cm长度 或
 - 1cm长度 => ~67ps传输时延

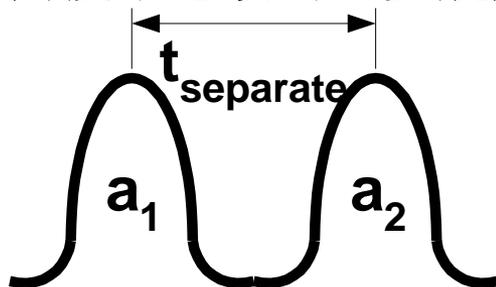
高精度阻抗测试 ----TDR上升时间的重要性

- TDR上升时间与测量的分辨率相对应。泰克解决方案提供了最小**15ps**的性能，是当前业界领先的方案,完全满足当前和未来的设计和应用。



高精度阻抗测试 --TDR 上升沿时间和分辨率

- 解析两段不连续的主要规则:



To resolve a_1 and a_2 as separate discontinuities:

$$t_{\text{separate}} > t_{\text{TDR_risetime}} / 2$$

- 80E04 TDR 上升沿时间:测量夹具,探头,电缆末端典型值为 30-40ps
 - $1/2t_{\text{rise}}$ 分辨率: 15-20ps
 - 0.1"-0.12" in FR4
- 80E08,80E10提供更快的上升沿时间,更高的分辨率:

Electrical Modules	Selectable Bandwidth	Ch / Connector	Step Incident / Reflected Rise Time (Typical)	Acquisition Rise Time (10%-90%)	RMS Noise	De-skew range	Remote Sampler
80E10	50 GHz	2 / 1.85mm (V)	12 ps / 15 ps	7 ps	600 μ V typical ≤ 700 μ V max	± 250 ps	Yes, 2 meter cable
	40 GHz			8.8 ps	370 μ V typical ≤ 480 μ V max		
	30 GHz			11.7 ps	300 μ V typical ≤ 410 μ V max		
80E08	30 GHz	2 / 2.92mm (K)	18 ps / 20 ps	11.7 ps	300 μ V typical ≤ 410 μ V max	± 250 ps	Yes, 2 meter cable
	20 GHz			17.5 ps	280 μ V typical ≤ 380 μ V max		

高精度阻抗测试 --TDR 上升沿时间和分辨率

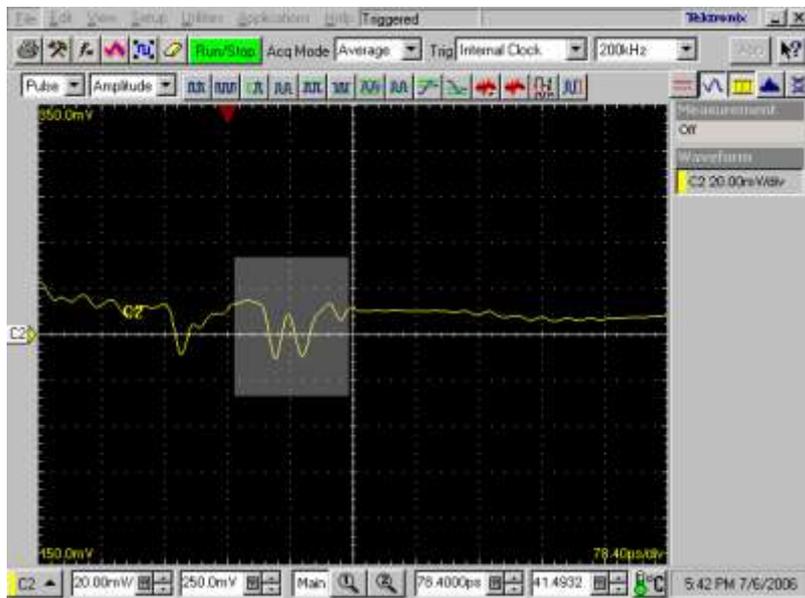
TABLE 2 RESOLUTION DATA

Rise time (psec)	Resolution in air (mm)	Resolution in FR4, buried run (mm)	
10	1.5	0.67	80E10
15	2.25	1	
20	3	1.34	80E08
28	4.2	1.87	80E04
40	6	2.68	
150	22.5	10.04	

高精度阻抗测试 --TDR 上升沿时间和分辨率



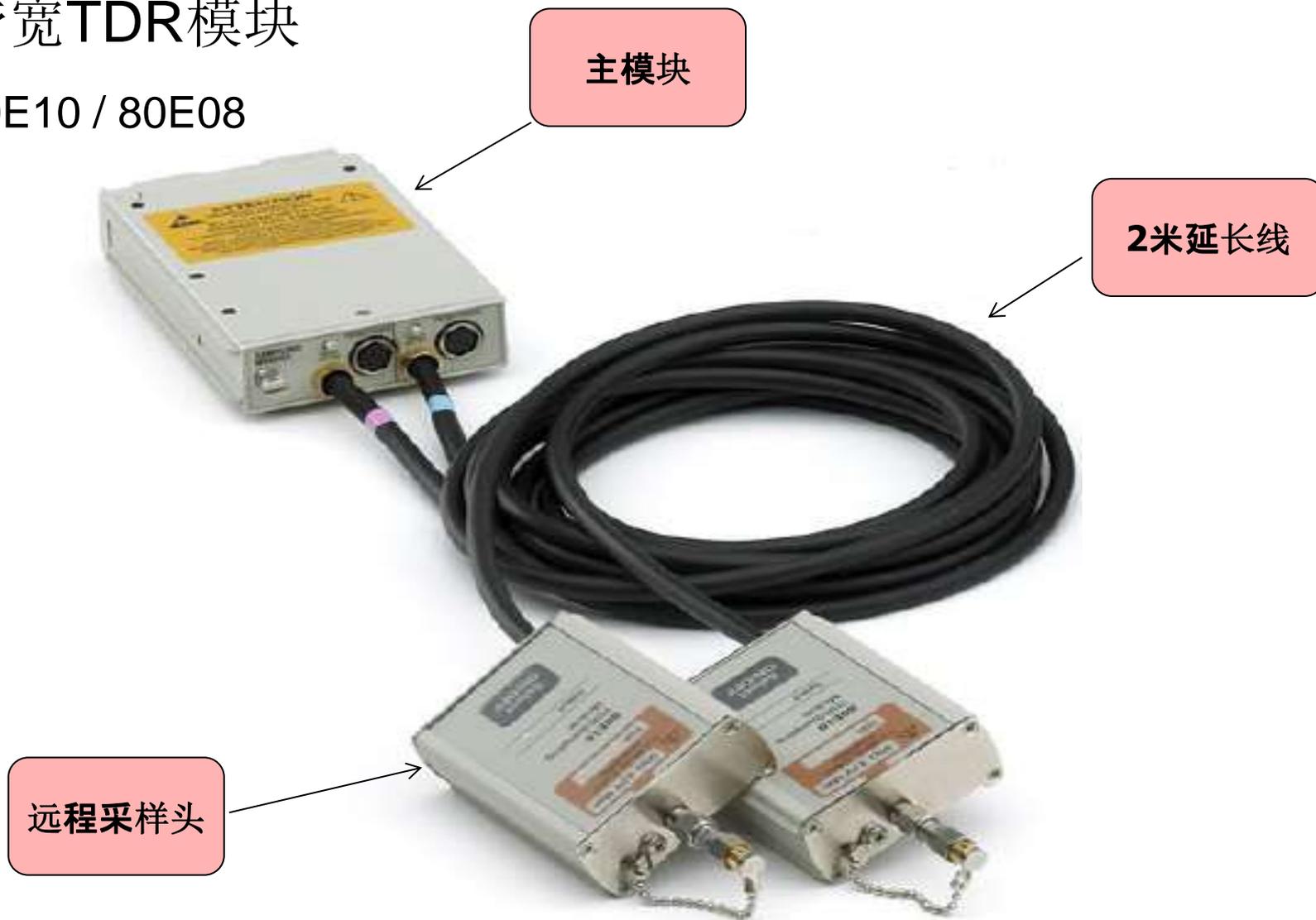
- 15 ps反射上升时间, 2.5mm间隔
- 15ps反射上升时间, 1.25mm间隔



- 在**1.25mm**以下时会发生什么情况?
- 不连续点没有消失, 而是变成一个不连续点
- 可以明显看出, 能够使用**15ps**和**80E10**实现单个不连续点的亚毫米分辨率

高带宽TDR模块

- 80E10 / 80E08



高带宽TDR模块

■ 80E10 / 80E08

- 如果需要进行亚毫米级别阻抗波动的验证
- 如果需要进行元器件内部布线的验证，如芯片内
- 如果PCB板上有8Gbps以上的信号
- 如果需要进行高带宽高动态范围的S参数测试

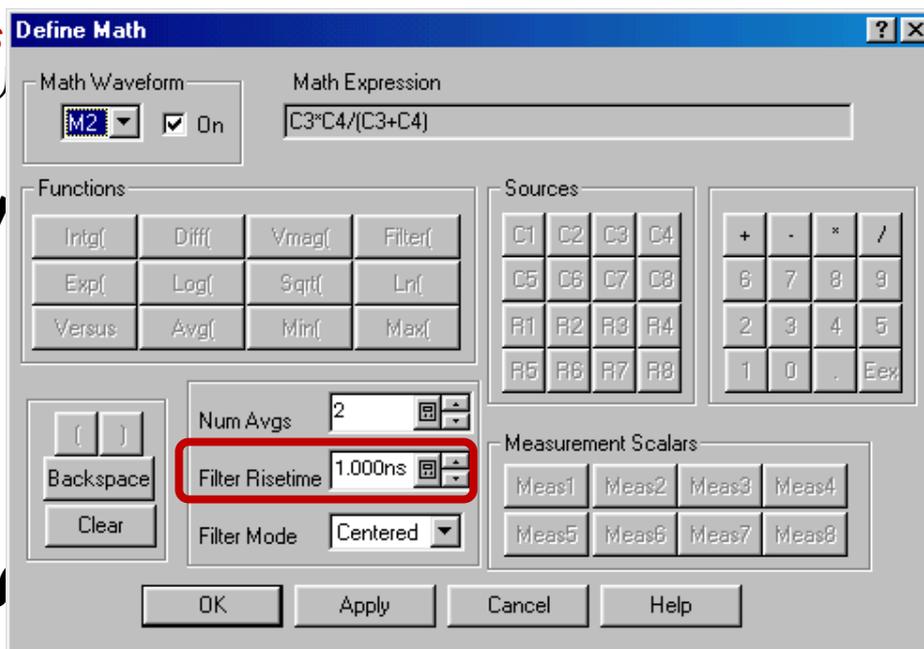
■ 小巧而高品质的前端采样头，

■ 1.85/2.92mm 高带宽SMA口接入



TDR 上升沿时间和分辨率

- 如果 30-40ps 上升时间可以



80ps 信号上升时间
?????????

- 针对信号完整性分析,采用**DUT**真实上升沿时间! (如果需要对上升沿时间进行滤波)

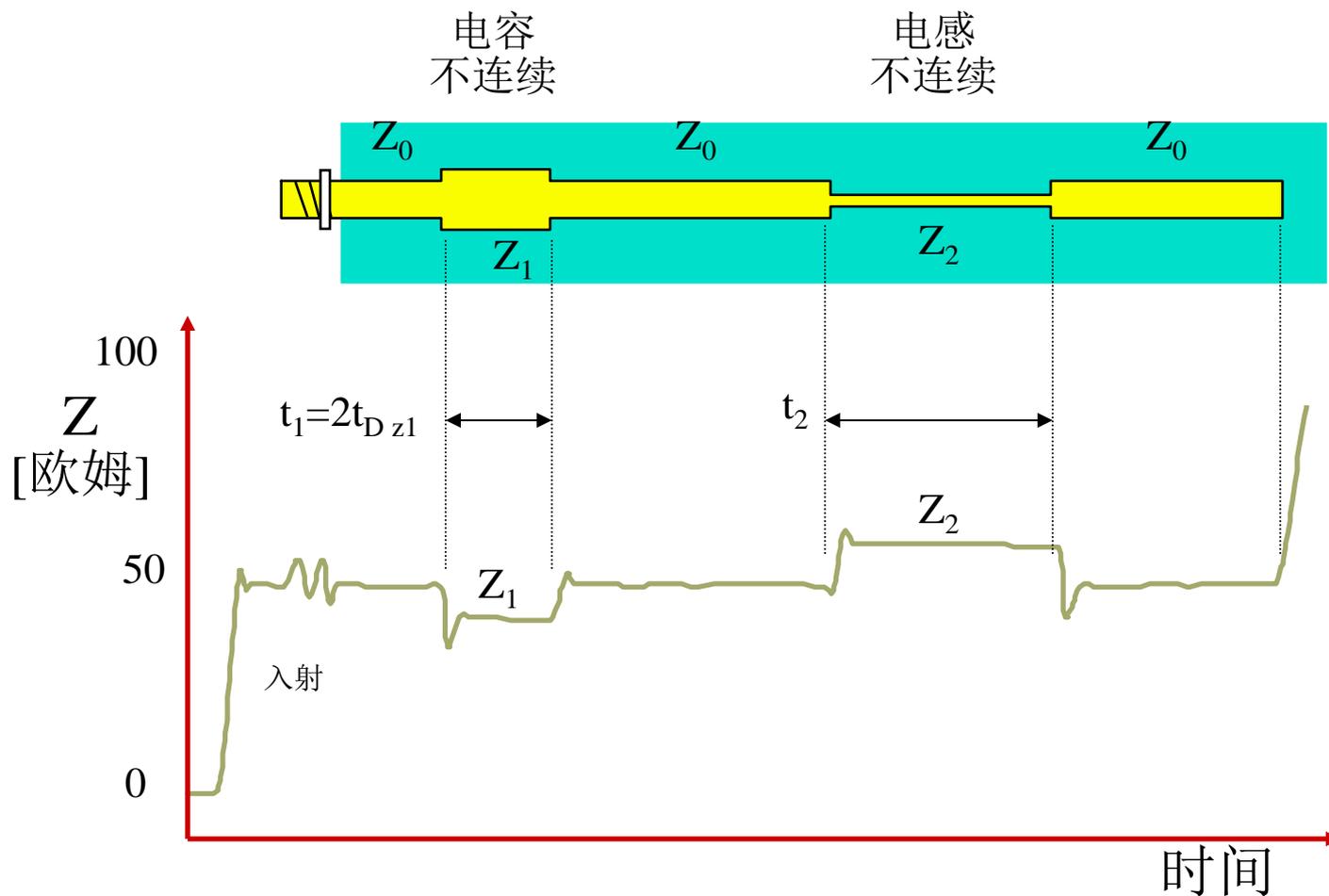
高精度阻抗测试 — TDR系统上升沿时间和分辨率

- IPC-TM-650手册给出的表格(2004年3月版, 第4页)
可比较准确进行测试的最短走线长度为分辨率的4倍
- 基本分辨率, 采用 $t_{\text{resolution}} = t_{\text{rise}} / 2$ 规则

Table 4-1 Resolution of TDR Systems

TDR System Risetime	Resolution	4X Resolution
10 ps	5 ps / 1 mm [0.04 in]	4 mm [0.16 in]
20 ps	10 ps / 2 mm [0.08 in]	8 mm [0.31 in]
30 ps	15 ps / 3 mm [0.12 in]	12 mm [0.47 in]
100 ps	50 ps / 10 mm [0.39 in]	40 mm [1.57 in]
200 ps	100 ps / 20 mm [0.79 in]	80 mm [3.15 in]
500 ps	250 ps / 50 mm [1.97 in]	200 mm [7.87 in]

TDR原理及其它——更加复杂的走线



除了阻抗测试外，TDR还可以

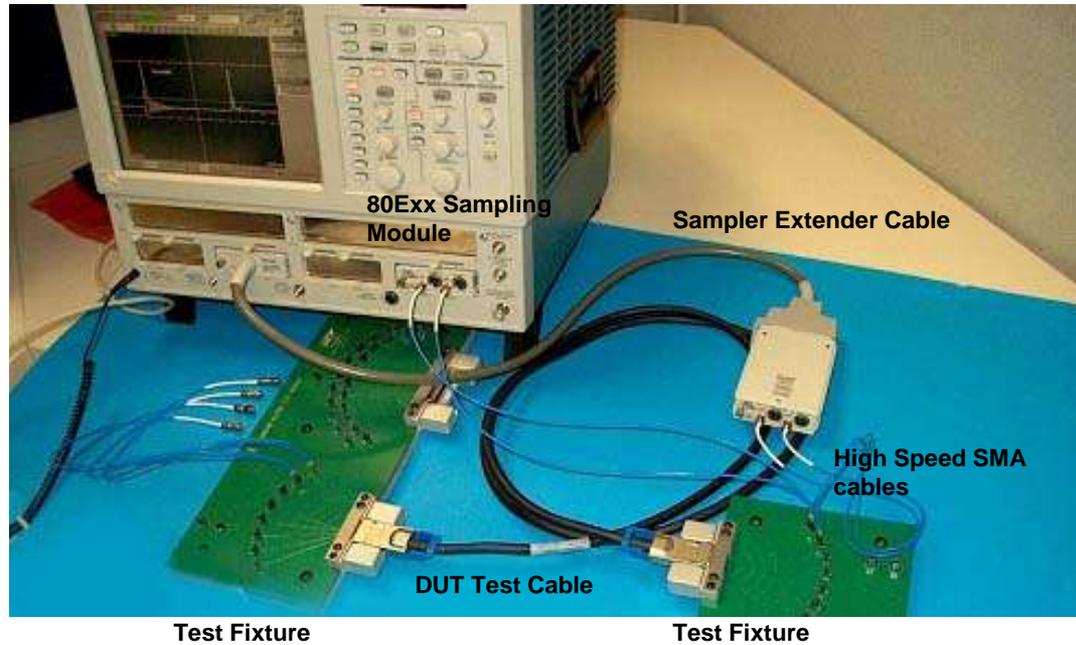
- 上升下降时间
- 传输时延
- TDT – 发送测量，而不是反射测量
- 时域串扰和反射(差分, 单端)
- 频域串扰 (FEXT, NEXT)
- S参数测量

上升沿时间测量(Rise Time Measurement)



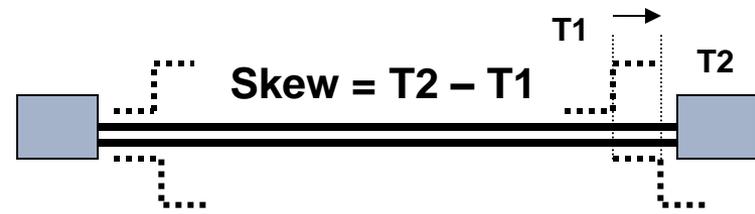
- 测量线路缆或连接器远端的上升沿时间。

DSA8300 Sampling Oscilloscope



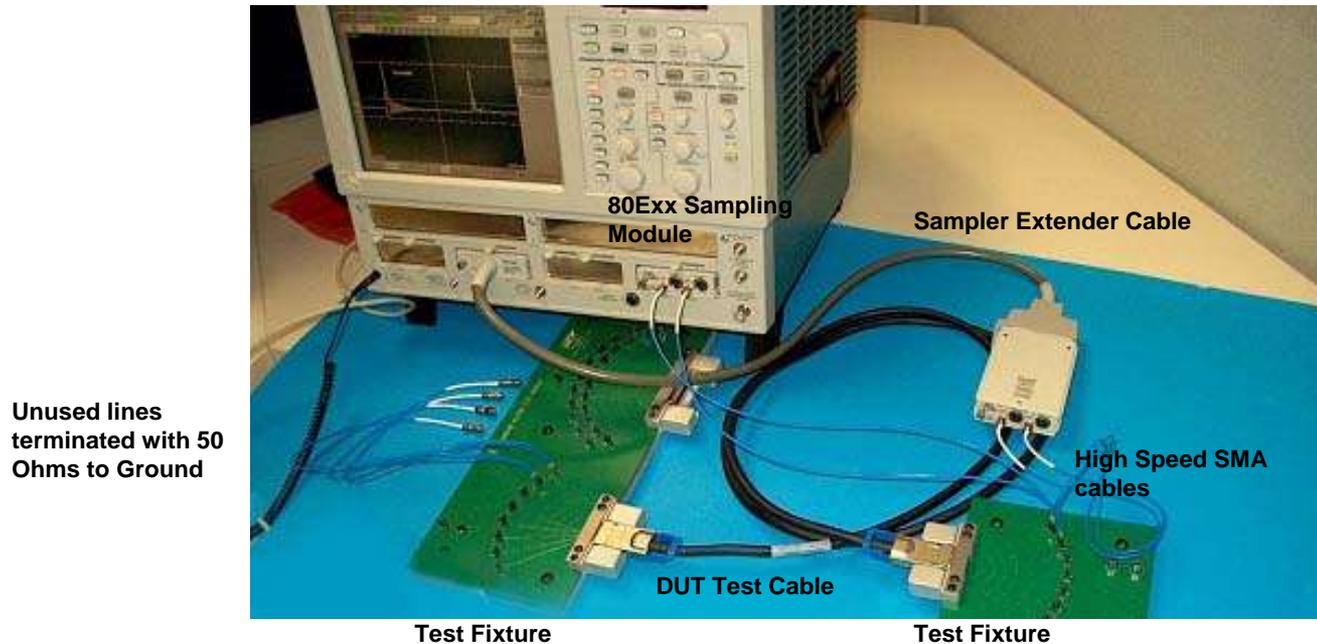
Unused lines
terminated with 50
Ohms to Ground

时滞偏差测量(Skew Measurement)



- 测量线路线缆或连接器从近端差分对到远端的时滞偏差。

DSA8300 Sampling Oscilloscope

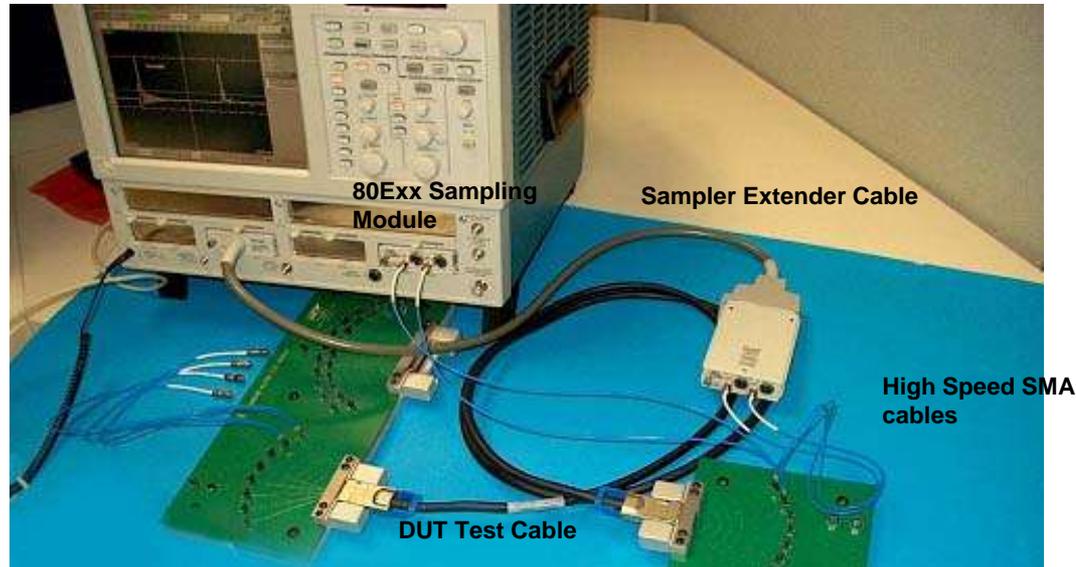


串扰测量(Crosstalk Measurement)



- 测量在线路线缆或连接器近端上加载信号时对相邻信号线产生的串扰.

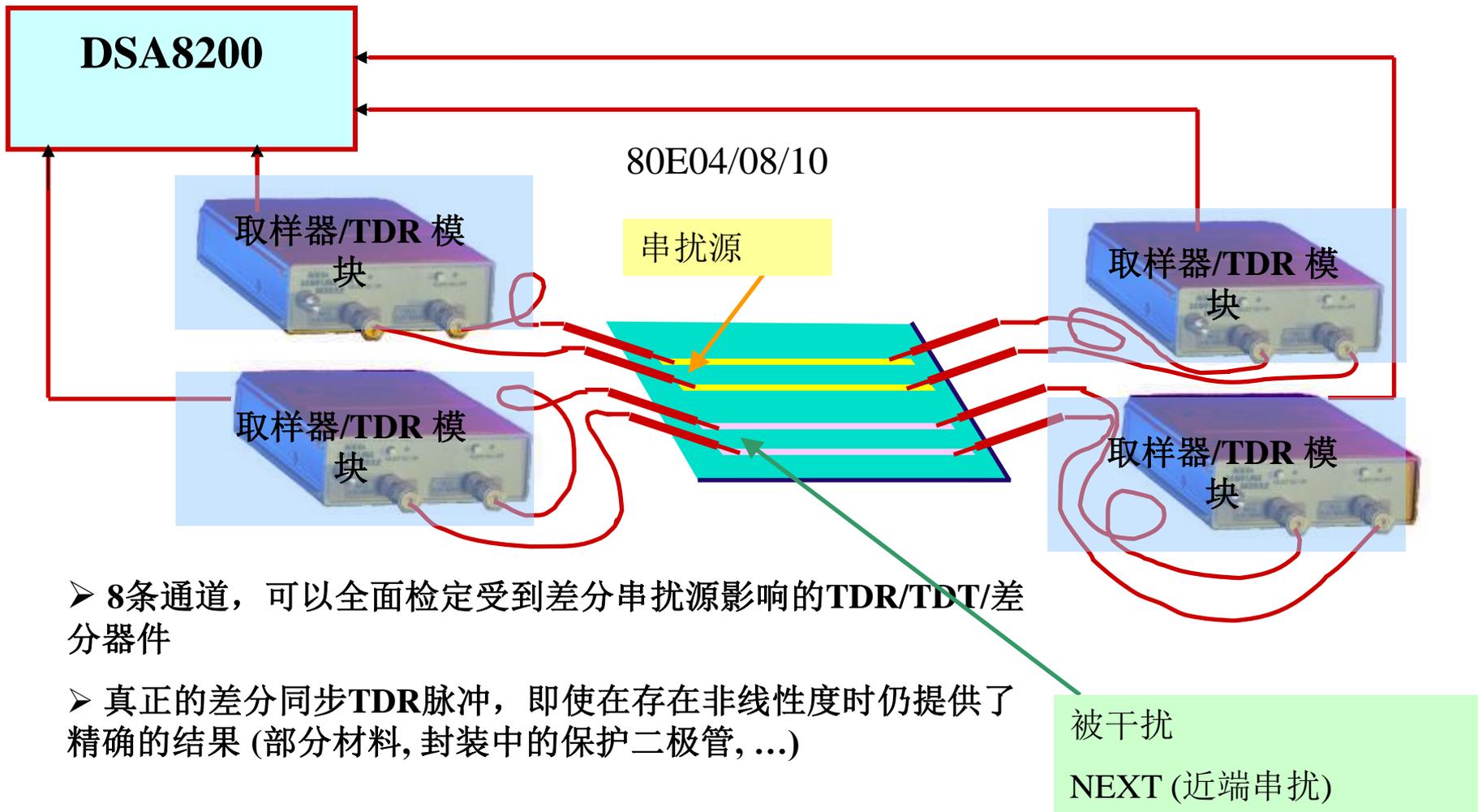
DSA8300 Sampling Oscilloscope



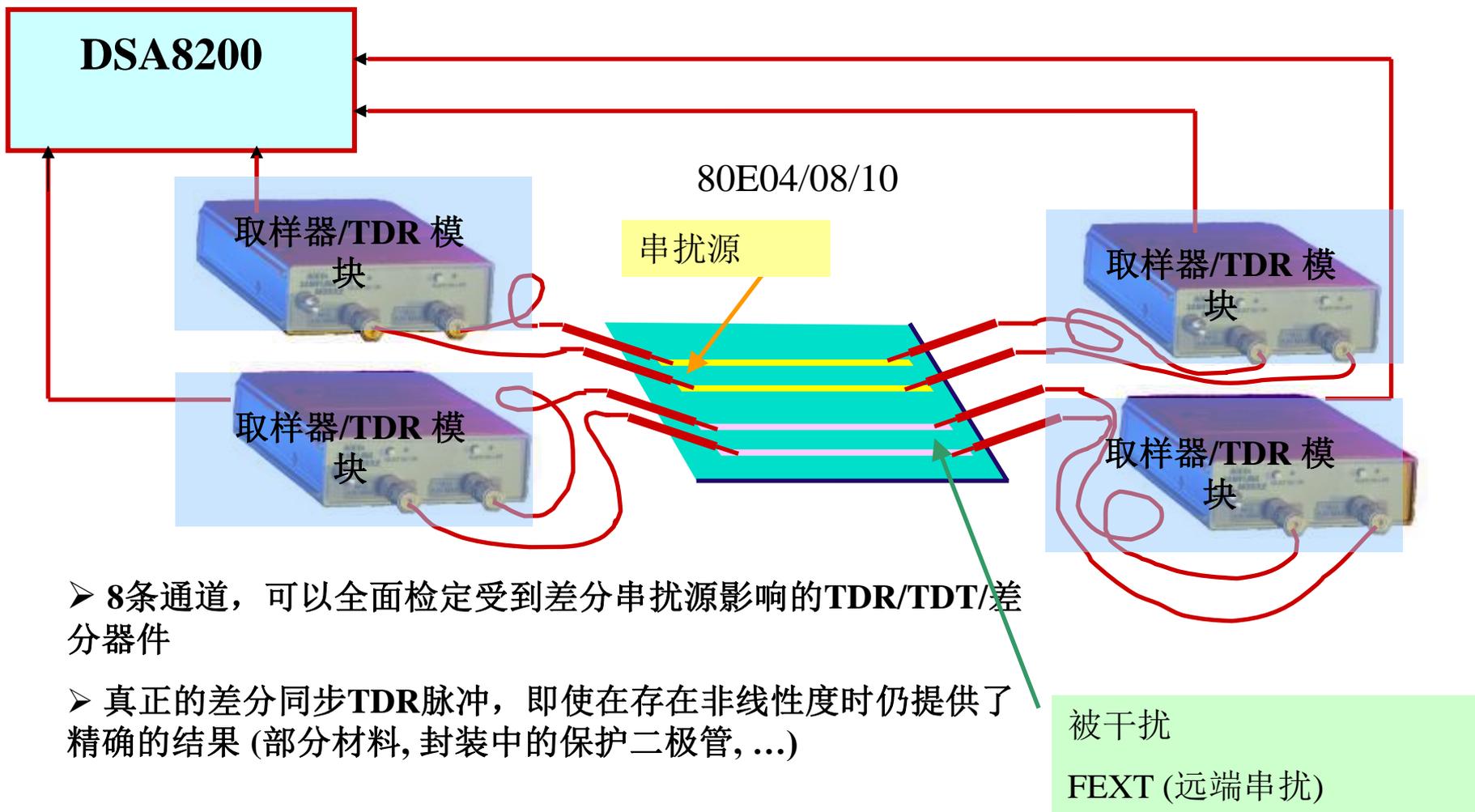
Test Fixture

Test Fixture

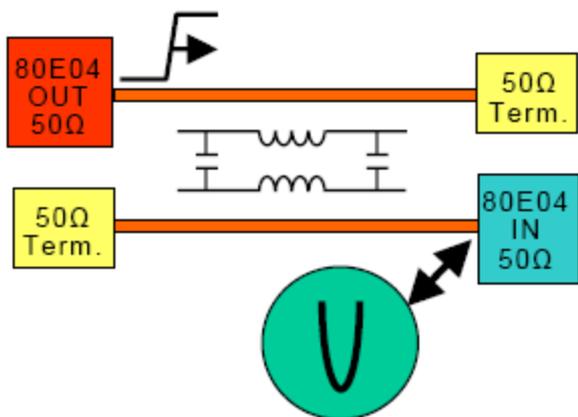
串扰测试



串扰测试



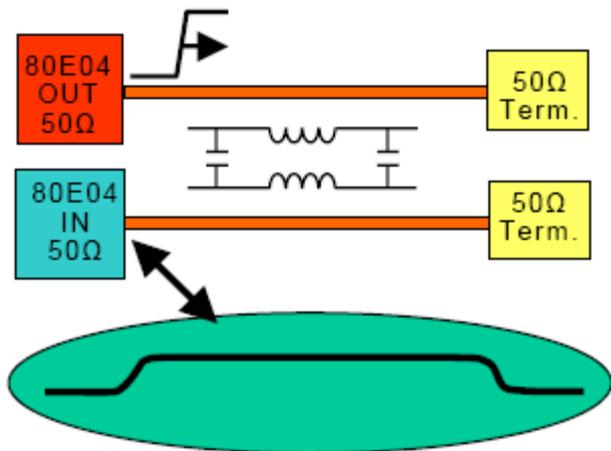
TDR在信号完整性SI(Signal Integrity)中的应用——前向串扰测量



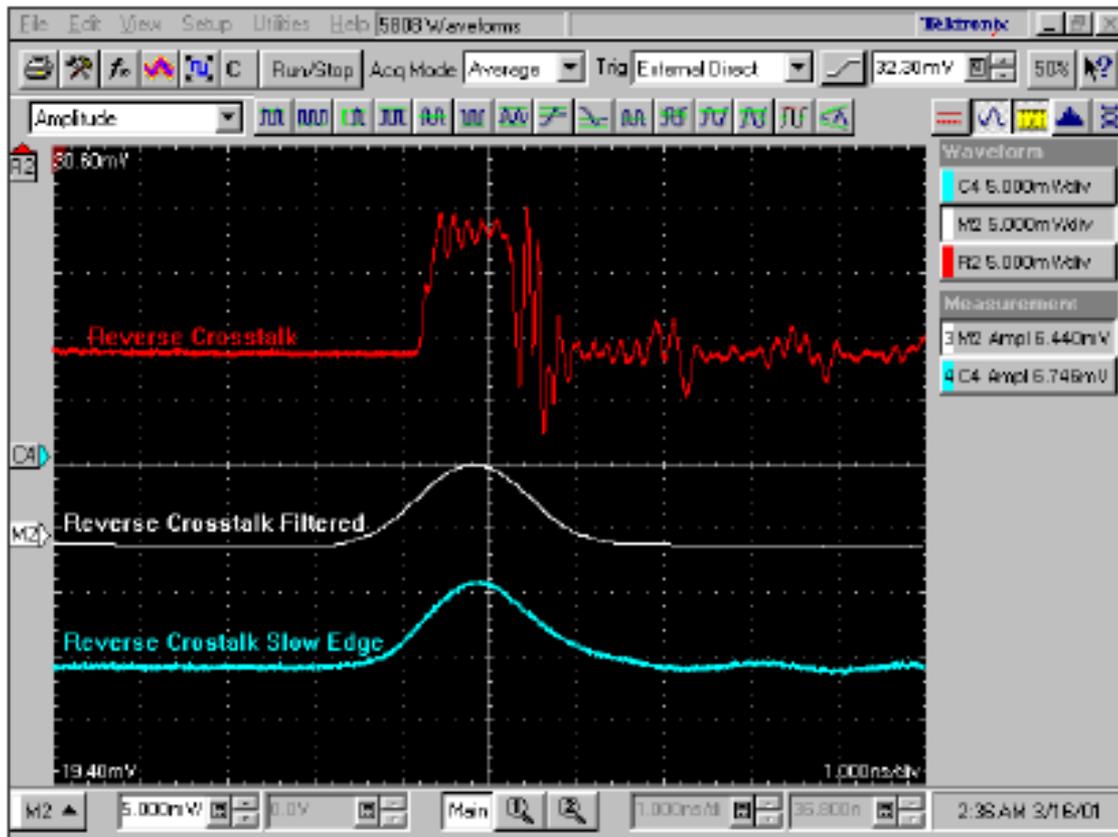
所有线路必须端接以消除反射



TDR在信号完整性SI(Signal Integrity)中的应用——后向串扰测量



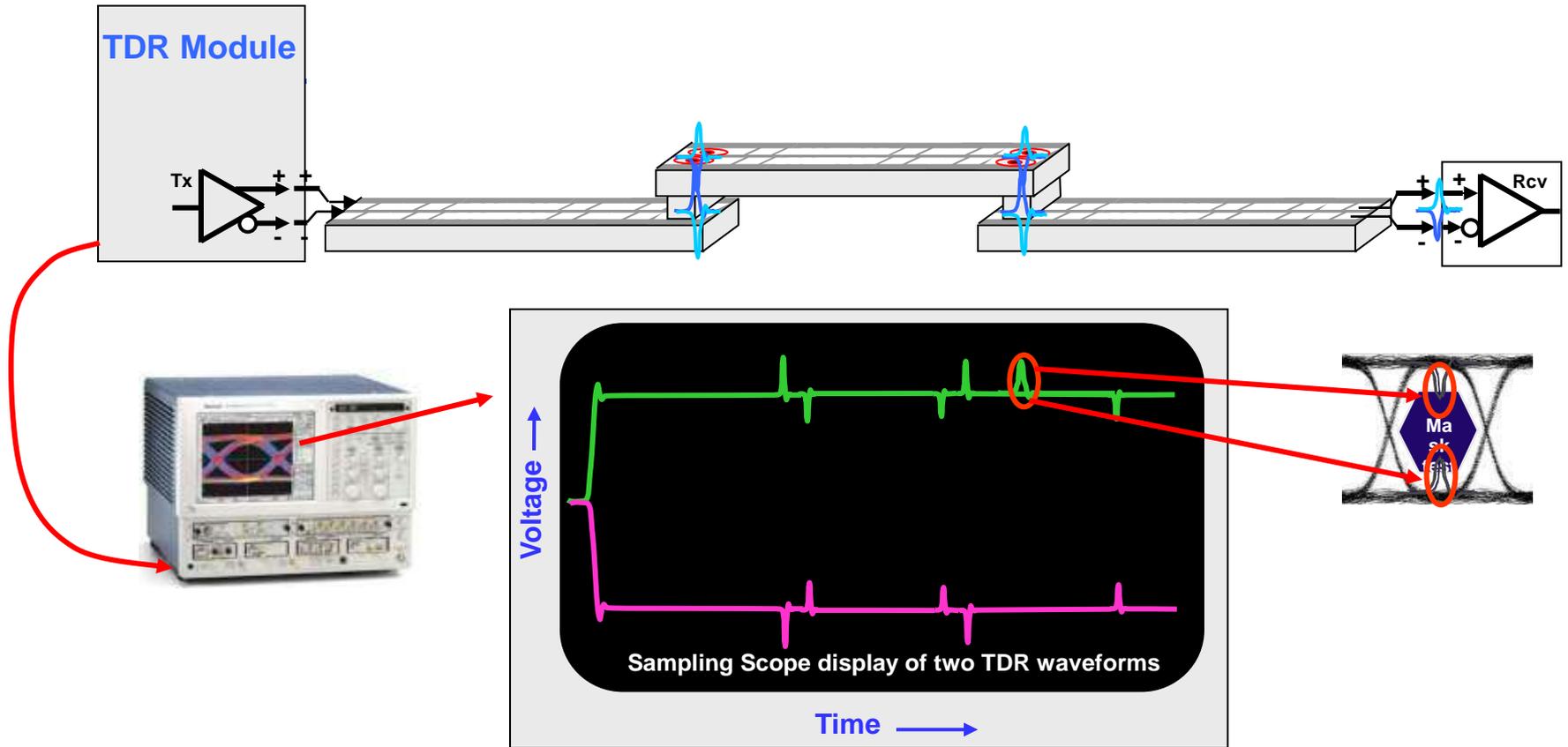
所有线路必须端接以消除反射



线路没有正确端接会出现什么结果

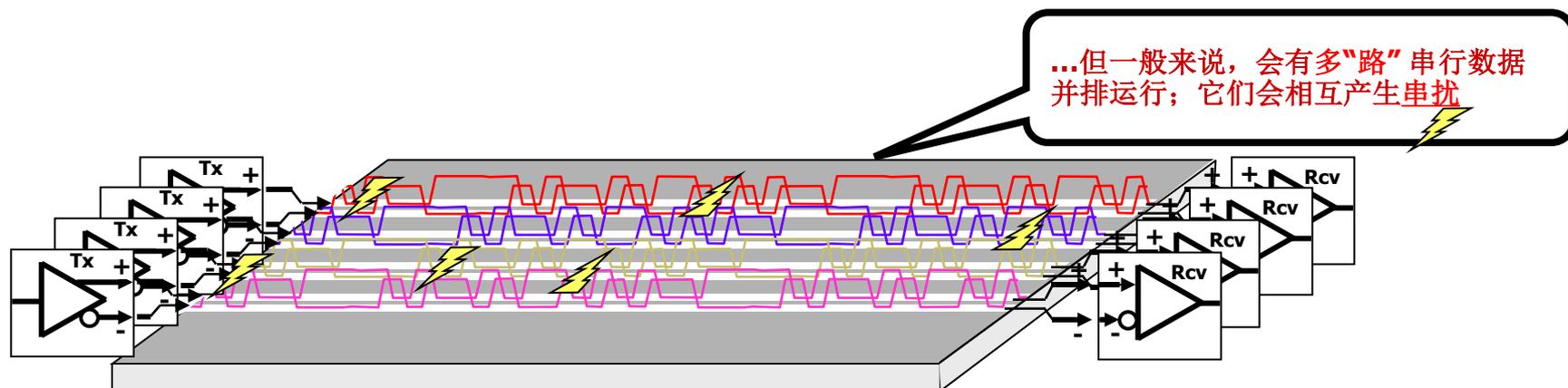
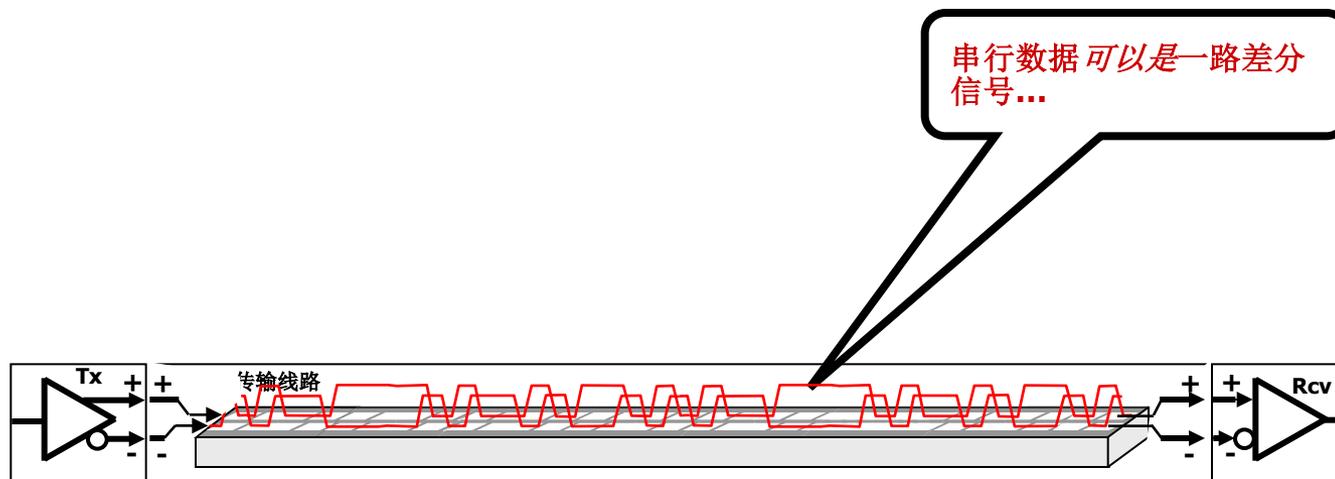
请参阅www.tektronix.com Crosstalk Measurements on PCB.pdf

Reflection(反射)

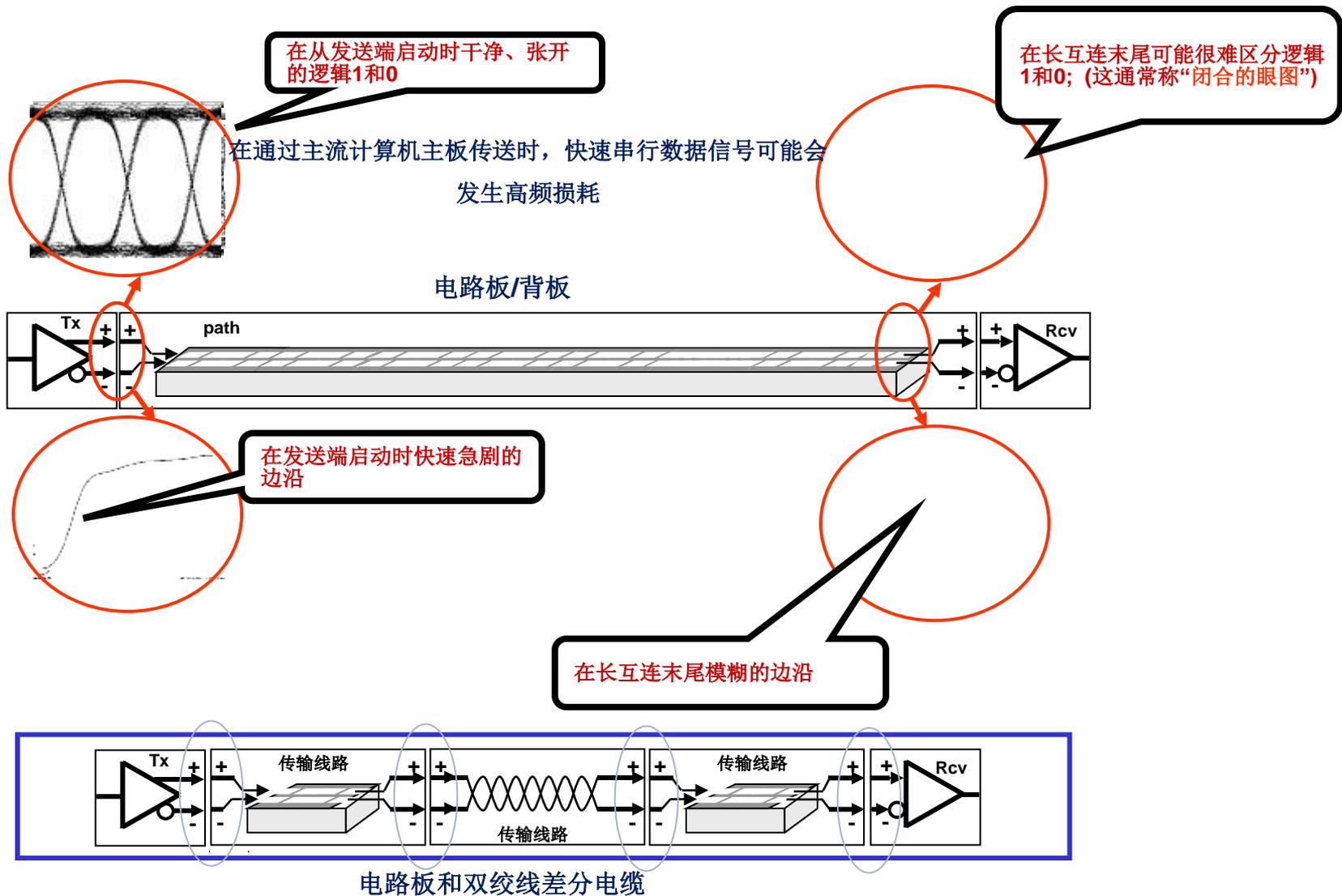


- Transition points involve combinations of **solder joints**, **circuit board vias**, and **connectors**; these all can have substantial effect on the total link performance.
- TDR also is capable of producing **S-parameters**

多条通路导致串扰

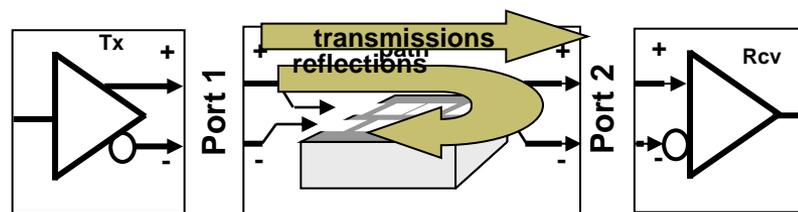


串行数据网络中的挑战



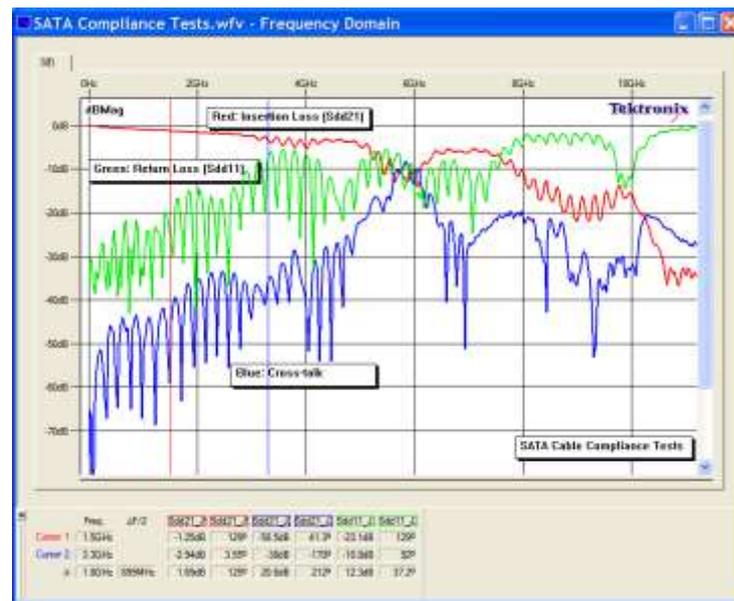
高速串行链路频域特性: S-Parameters

- 在频域中检定网络的反射与损耗
- 定量分析探究信号完整性问题的根源



- 常用S参数测试项
- 差分回波损耗
- 差分插入损耗
- 串扰

- 数据采集与输出
- 单端测试
- 差分与多端口的测试
- S参数文件输出



各种标准规定了要求

不管是在设计中还是在制造中，互连测试要求都是由标准推动的

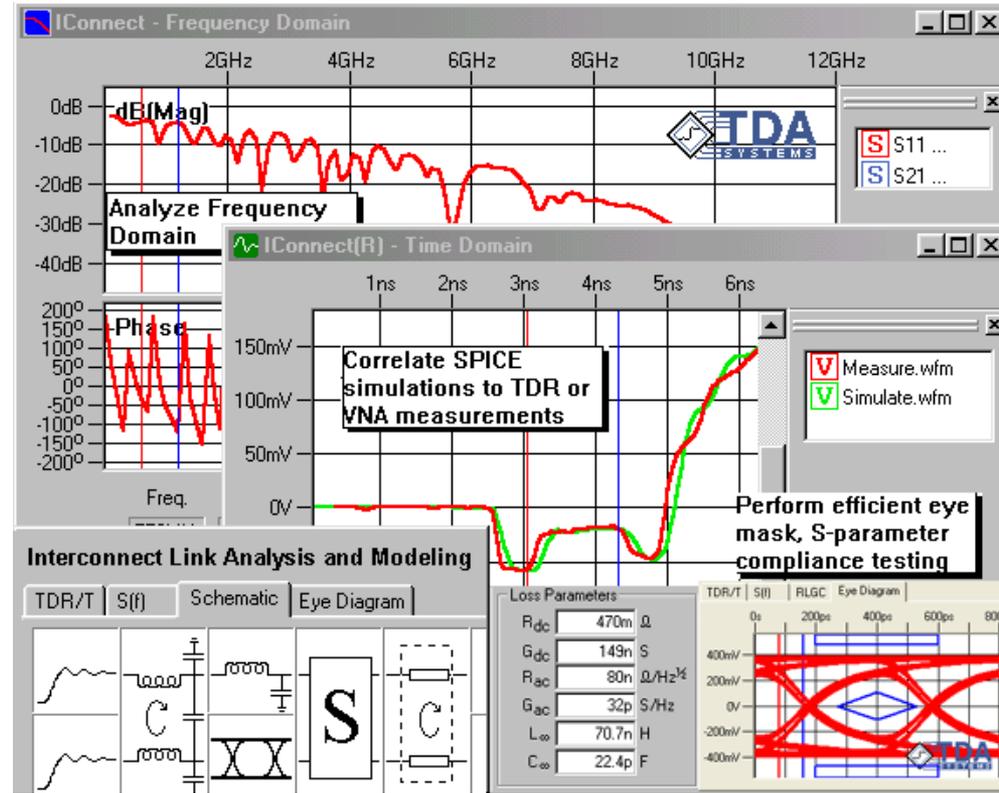
许多标准要求在一致性测试中进行S参数测量

- 测试的设备类型：
- PCBs
- 电缆组件
- 连接器
- 插座和其它小型设备
- Tx/Rx输入

标准	数据速率	TDR	要求的频域测量		
			差分回波损耗	差分插入损耗	差分串扰
SATA II	3 Gb/s	★	★	★	★
PCI Express 1.0	2.5 Gb/s	★	★	★	-
PCI Express II	5 Gb/s	★	★	★	★
HDMI 1.3	.75 Gb/s - 2.25 Gb/s	★	-	★	★
FC 1, 2, 4 Gb/s	1 Gb/s - 4.25 Gb/s	★	★	★	-
FB-DIMM II	4.25 Gb/s	★	★	-	-
Infiniband	2.5 Gb/s	★	★	★	-
XUAI	3.125 Gb/s	★	★	★	★

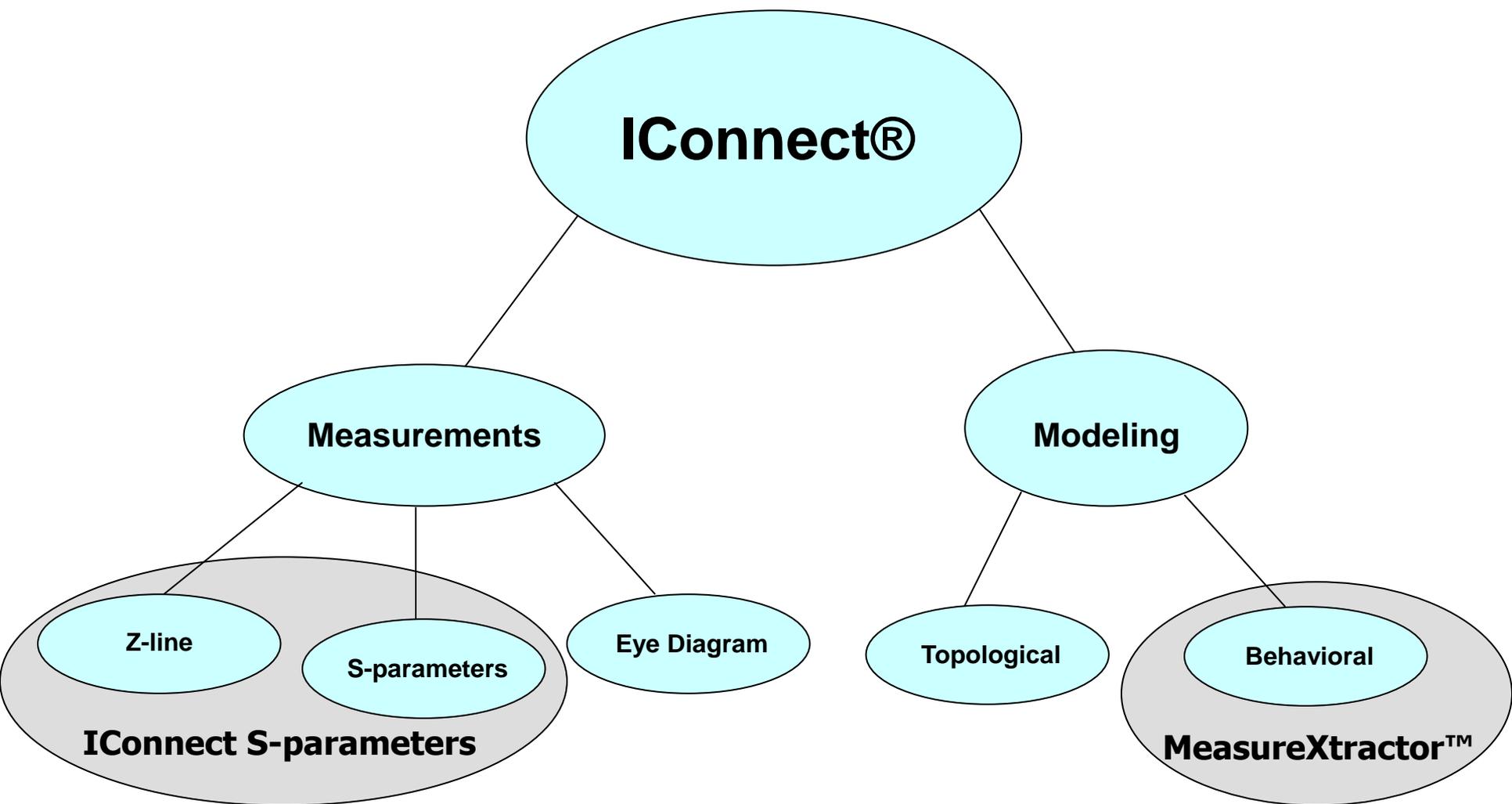
什么是 IConnect®?

- IConnect TDR and VNA software 针对 Gigabit级数字高速链路:
 - 为信号完整性分析提供快速SPICE 建模和分析
 - 简单、准确的 S-parameter 和 Eye diagram 测量
 - 广泛用于电气规范一致性测试
 - 更准确的阻抗测量
 - 有效的故障隔离和失效分析
- MeasureXtractor™
 - 自动将TDR/T测量结果或S-parameter数据转化为精确的频率相关模型
 - 易于确保SPICE / IBIS 仿真准确度



- Efficient, easy-to-use and cost-effective!
- Works with DSA8300 TDR scope

IConnect 软件架构



IConnect软件的选件以及功能

- IConnect 80SSPAR

Z-Line 真实阻抗测试； S参数测试

- IConnect 80SICON

Z-Line 真实阻抗测试； S参数测试； 眼图测试

- IConnect 80SICMX

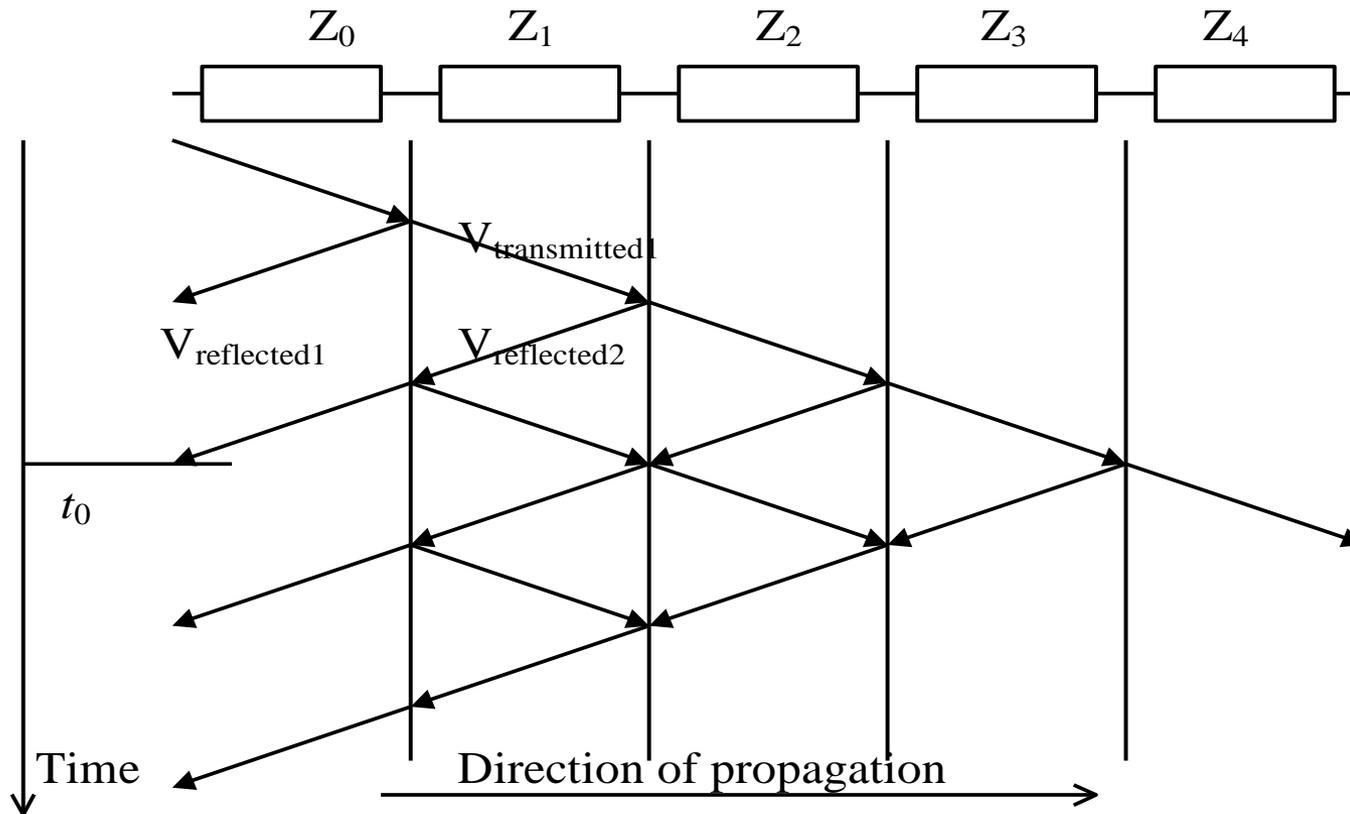
Z-Line 真实阻抗测试； S参数测试； 眼图测试； 电路模型提取

IConnect® 软件 Z-line 算法

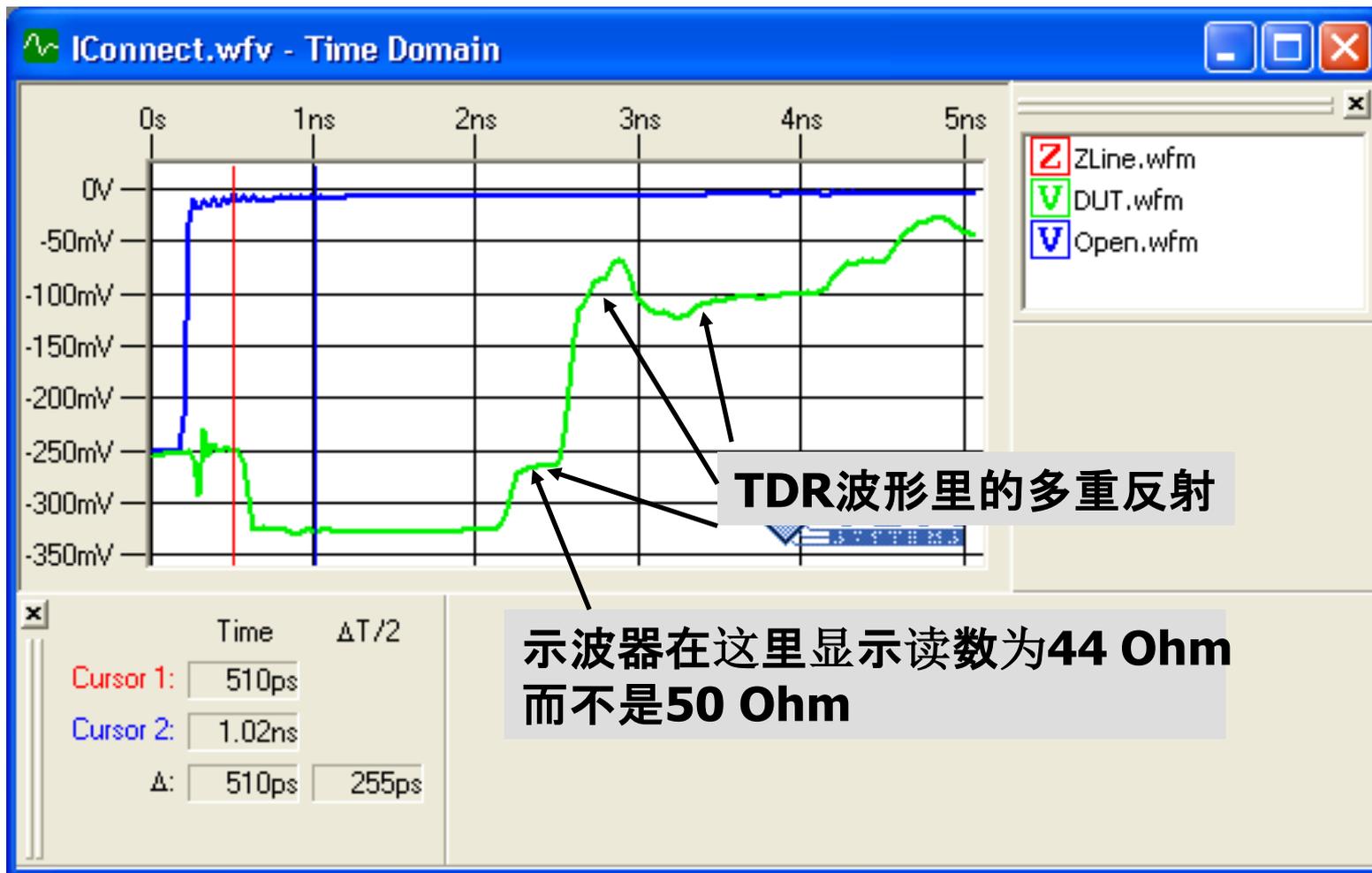
- Z-line可以做什么？
 - 修正在DUT中的由于多重反射造成的阻抗测量错误
 - 对TDR没有限制,在频域VNA中也没有限制
- IConnect 可以消除多重反射
 - 确保在多阻抗值DUT中阻抗测量的准确性
 - 直接准确的读出阻抗(Z),延时(t_d), L, C
 - 相对直接从示波器读取阻抗值有所不同也更加准确
- 应用:
 - 提高PCB阻抗测量准确度
 - 包括PCB生产制造和研发
 - 提高故障隔离和失效分析的分辨率
 - 封装,电路板, 连接器
 - 直接从修正阻抗线读出阻抗(Z),延时(t_d), 电感和电容

TDR原理及其它-Multi Reflection

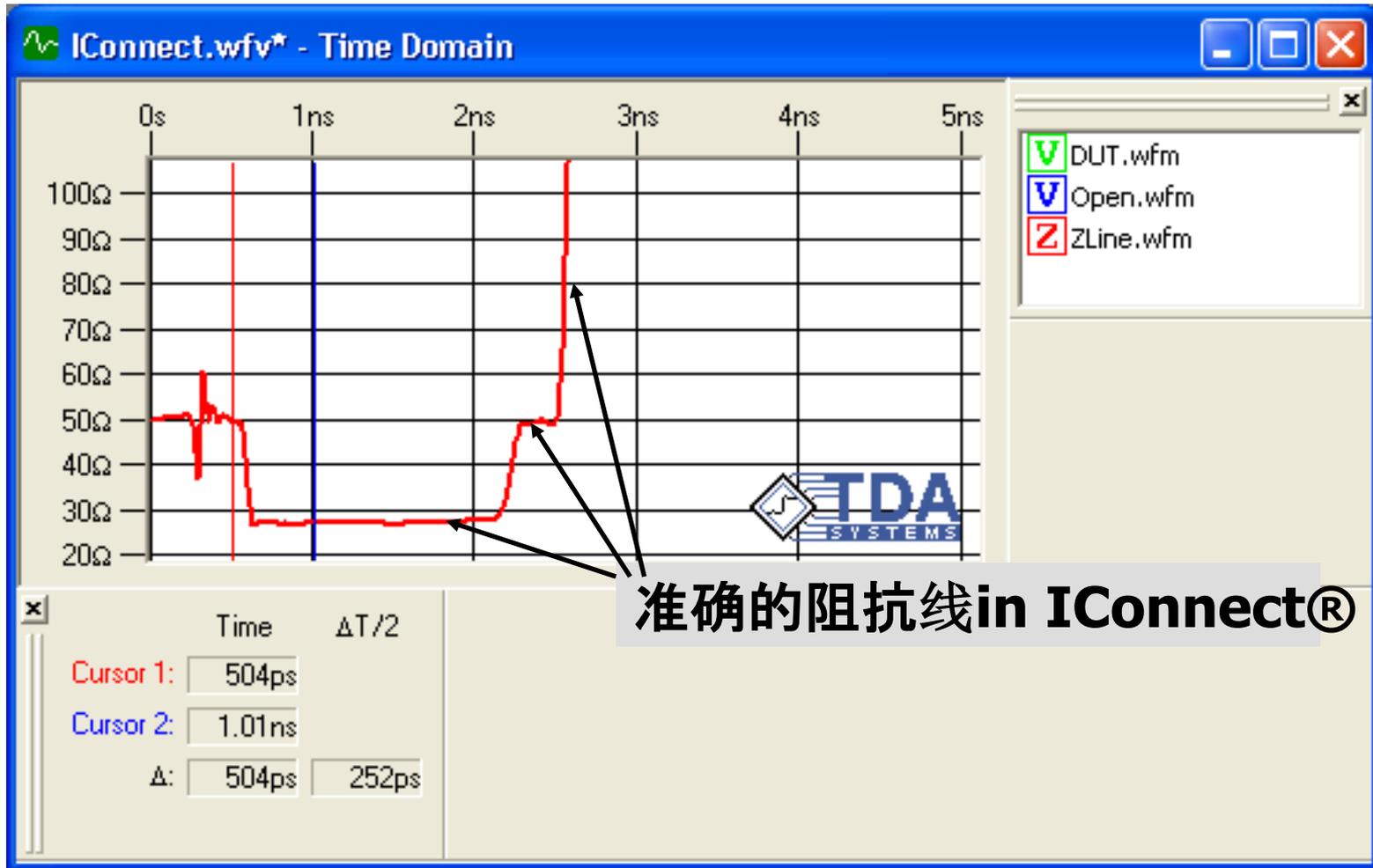
- 问题: 在DUT内部由于信号再反射阻抗测量准确性受到极大困扰



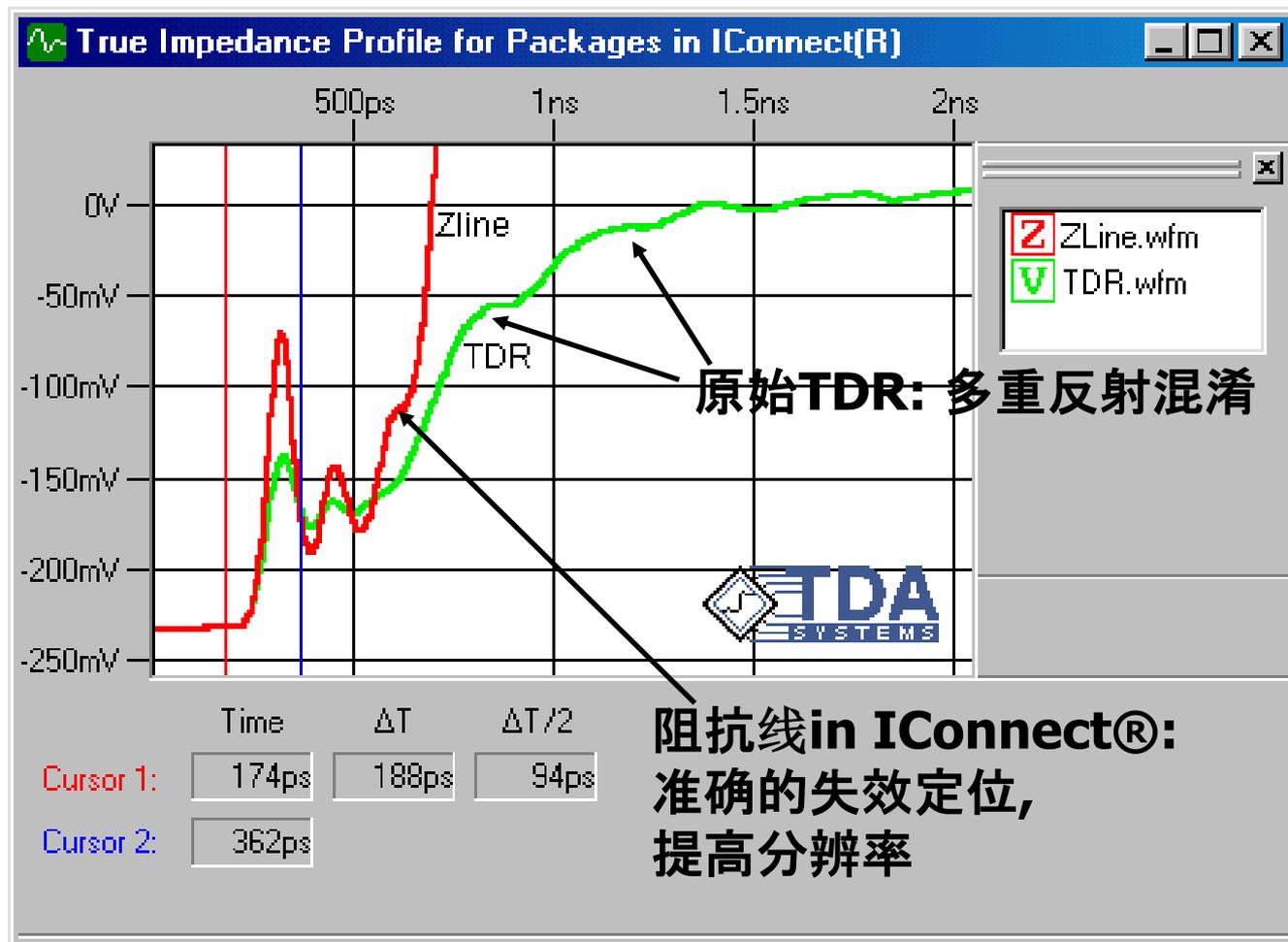
典型电路板走线 IConnect® Z-line



典型电路板走线 IConnect® Z-line

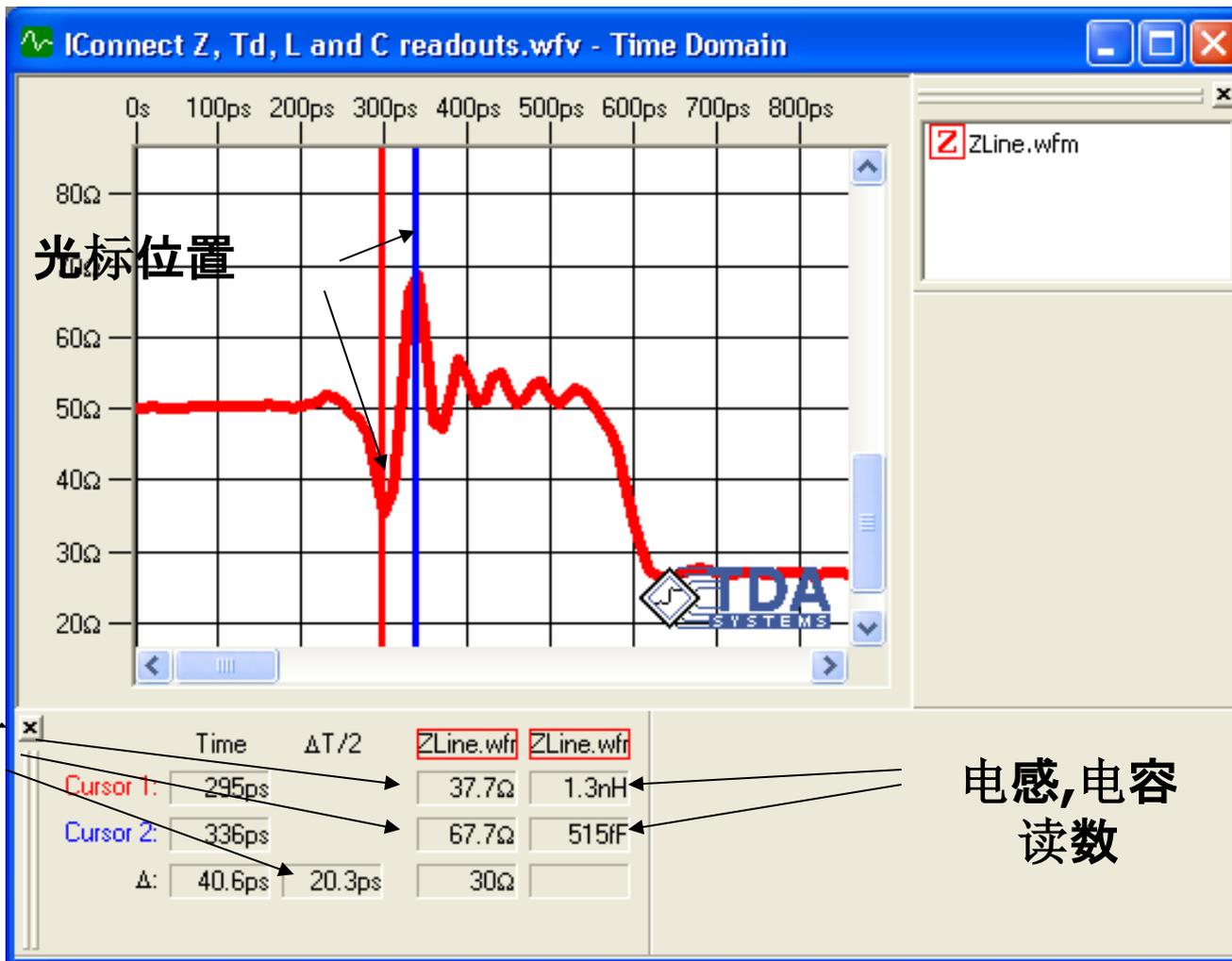


典型封装走线 IConnect® Z-line



阻抗准确性

阻抗, 电感和 电容 读出



光标位置

阻抗, 延时
读数

电感, 电容
读数

IConnect S-parameter 计算

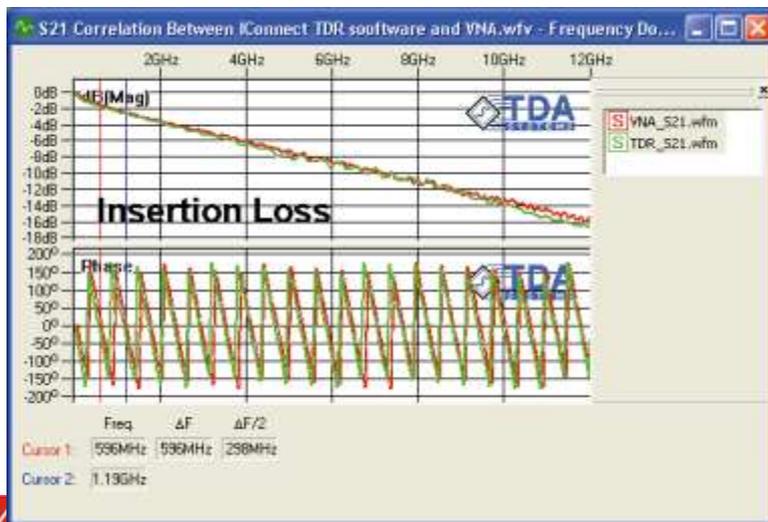
- IConnect S-parameters 可以做什么？
 - 针对数字互连的最容易的S-parameter测量
 - 差分,混合模式和单端测量
 - 简便的反嵌(de-embed)夹具效应
 - 基本的校准能力
- 应用:
 - 测量插入损耗,回波损耗,花最小的努力进行频域串扰测量
 - 包括有源器件输入回波损耗 – 常见指标!
 - 进行线缆装配和PCB电气一致性测试(SATA, PCI Xpress, Infiniband, Gigabit Ethernet) – 极小的成本,高效,快速!
 - 提供2和4端口S-parameter Touchstone文件可用于通道仿真

Frequency Dependent S-parameters

IConnect® S-parameters

最容易的方法实现数字互联的S参数测试

- 真实的差分、混合模式、单端
- 一致性测试需求：PCI-Xpress, Serial ATA, Infiniband, Gigabit Ethernet and other standards
- 非常容易反嵌夹具带来的测试影响
- 只需执行简单的校准（一个开路或短路的TDR波形）
- 现有的TDR设备非常容易就可升级至IConnect



Compute: S-Parameter

TD Source Waveform Viewer: TD Waveform Viewer 1

FD Target Waveform Viewer: New Waveform Viewer

Waveforms

DUT: Odd.wfm

Ref: Step.wfm

Frequency content

Set manually

Max Δf: 5M Hz

F_{max}: 10G Hz

Compute

Calibration

Use 50 Ohms calibration

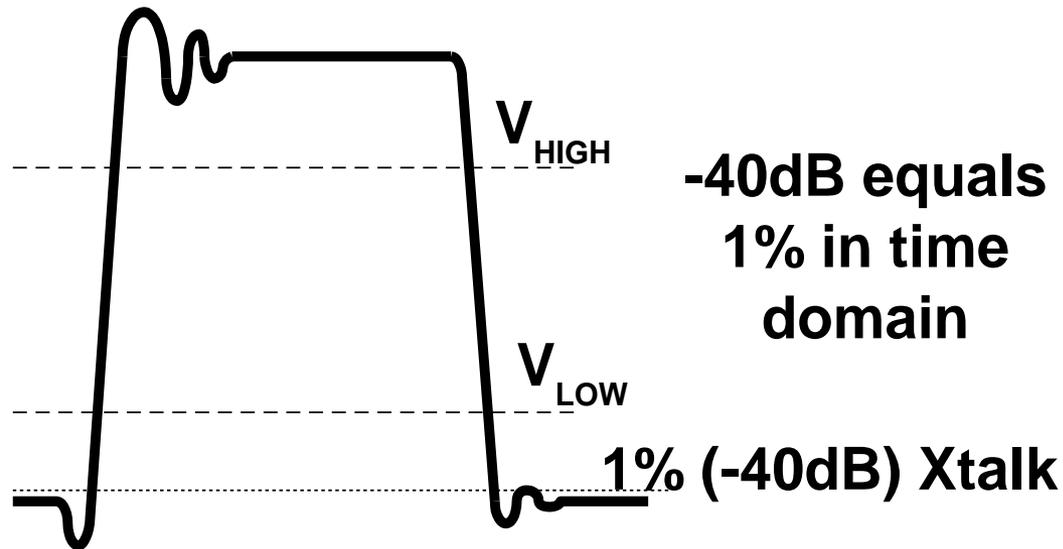
Ref type: Open/Short

DUT Type: Insertion loss/Δ

Load 50 Ohms Waveform: Load.wfm

Time or Frequency Domain?

- SI 测量不需要高动态范围

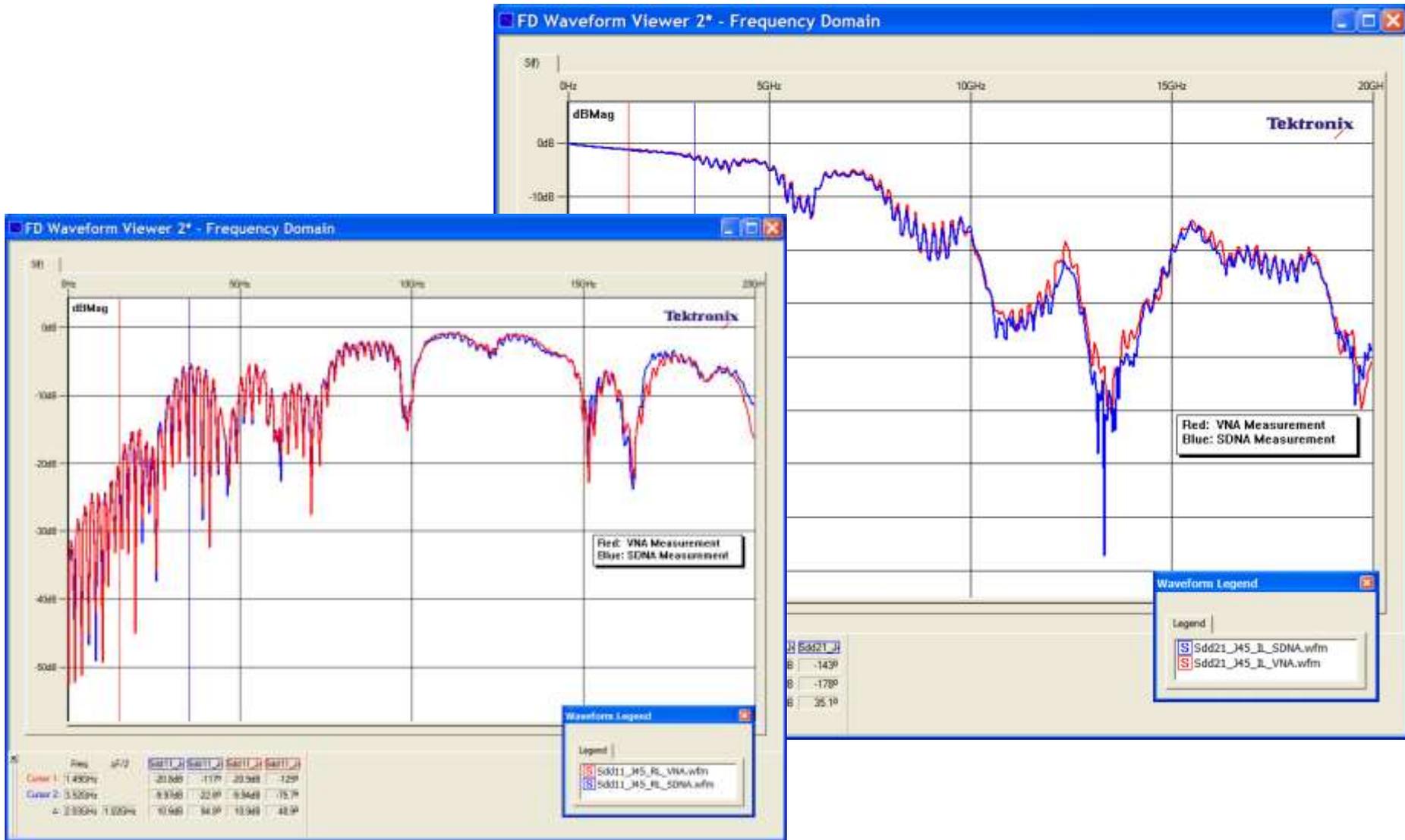


- 一致性测试也不需要高动态范围
 - About -10 dB for insertion loss
 - -25 to -35 dB for return loss
 - Higher for frequency domain crosstalk

为什么选择泰克串行数据解决方案?

- 业内最高分辨率 80E10 50GHz带宽真正差分TDR模块
- 70dB动态范围，足够串行信号40dB的要求
- 比VNA更快、校准和使用更简便
- 支持检定、标准一致性检验和制造测试
- 直观的多用途平台，除S参数外，提供了直观的时域结果
- 为满足串行数据要求专门设计的工具
- 对研发应用(使用80SICMX)，在满足通道分析要求中明显优于竞争对手

TDR和VNA S参数相关实例

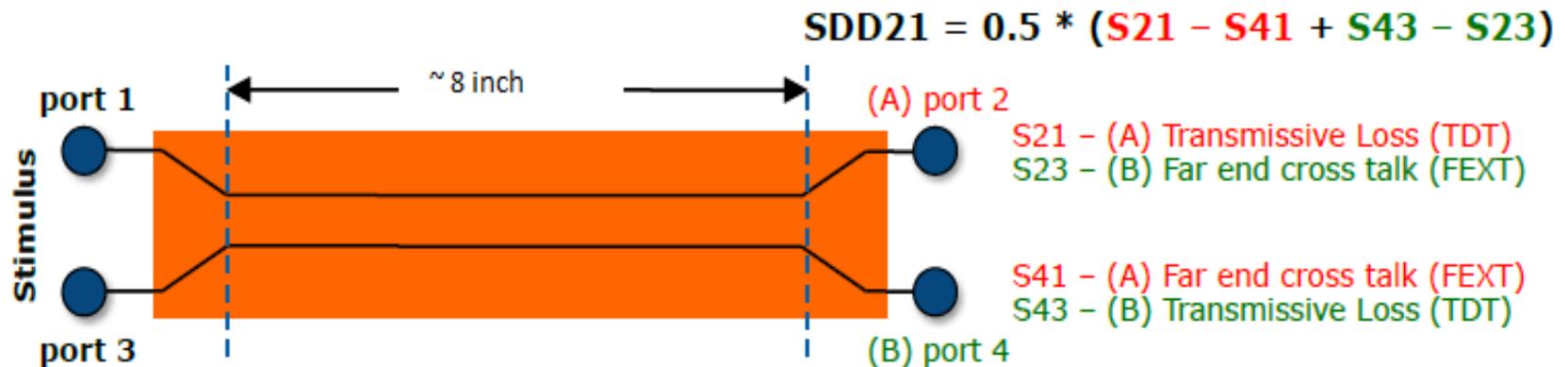


Interconnect Loss New Testing items

- 1. Intel/ SE2IL
- 2. IBM/ SPP
- 3. IPC/ EBW

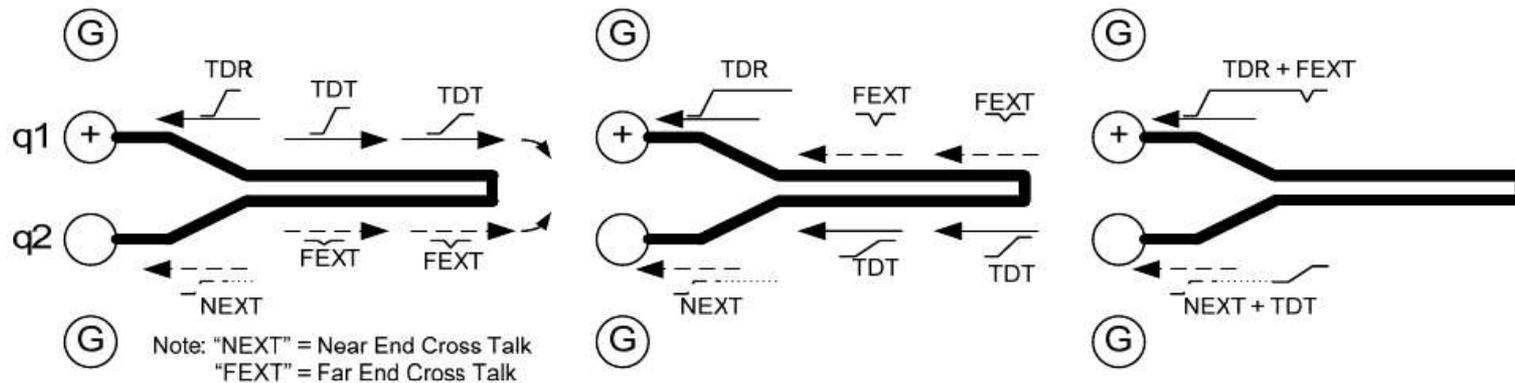
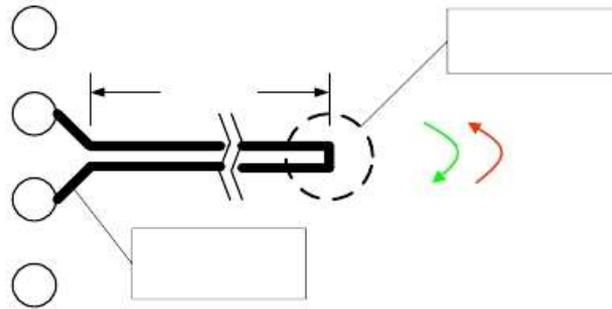
Intel S参数测试软件SET2DIL

- **SET2DIL:** Method to Derive Differential Insertion Loss from Single Ended TDR/TDT Measurement
- Intel 主推，第三代处理器Romley/Grantley平台，集成了如10G以太网、6G SAS等，测试PCB板的S参数——SDD21



- 图片节选自Intel, SET2DIL, A Simplified 2-port Loss Measurement Technique

Now, loop back the DUT to itself at the far end (SET2DIL Structure)



Short Pulse Propagation (SPP)

Manual Laboratory process developed by IBM Research in early 90's

Time domain measurements provide frequency dependent differential interconnect loss:

Attenuation (α)

Phase constant (β)

SPP Description

Signal Processing Propagation Constant Calculation

$$\Gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f) = -\frac{1}{l_1 - l_2} \ln\left(\frac{A_1(f)}{A_2(f)}\right)^{\frac{1}{2}} + j\frac{\phi_1(f) - \phi_2(f)}{l_1 - l_2}$$

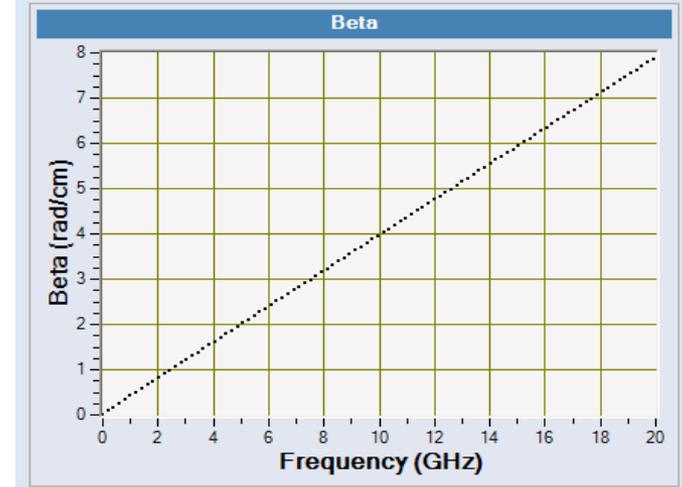
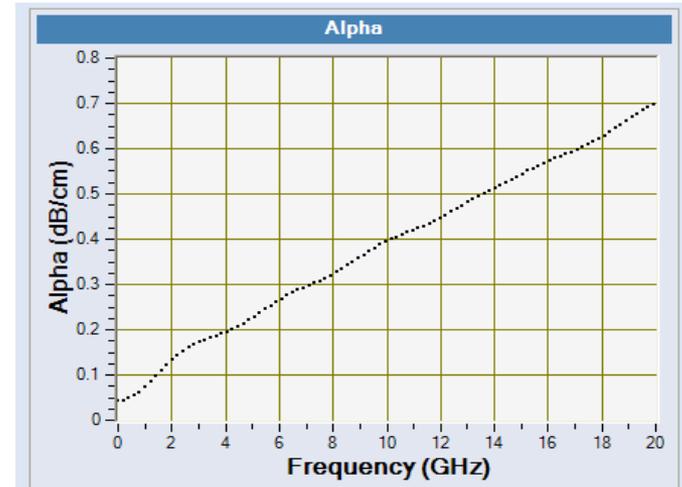
$\Gamma(f)$ is the propagation constant.

$\alpha(f)$ is the attenuation. $\beta(f)$ is the phase constant.

l_1 and l_2 are the lengths of the long and short lines respectively.

$A_1(f)$ and $A_2(f)$ are the magnitude of the Fourier Transforms for the long and short lines respectively.

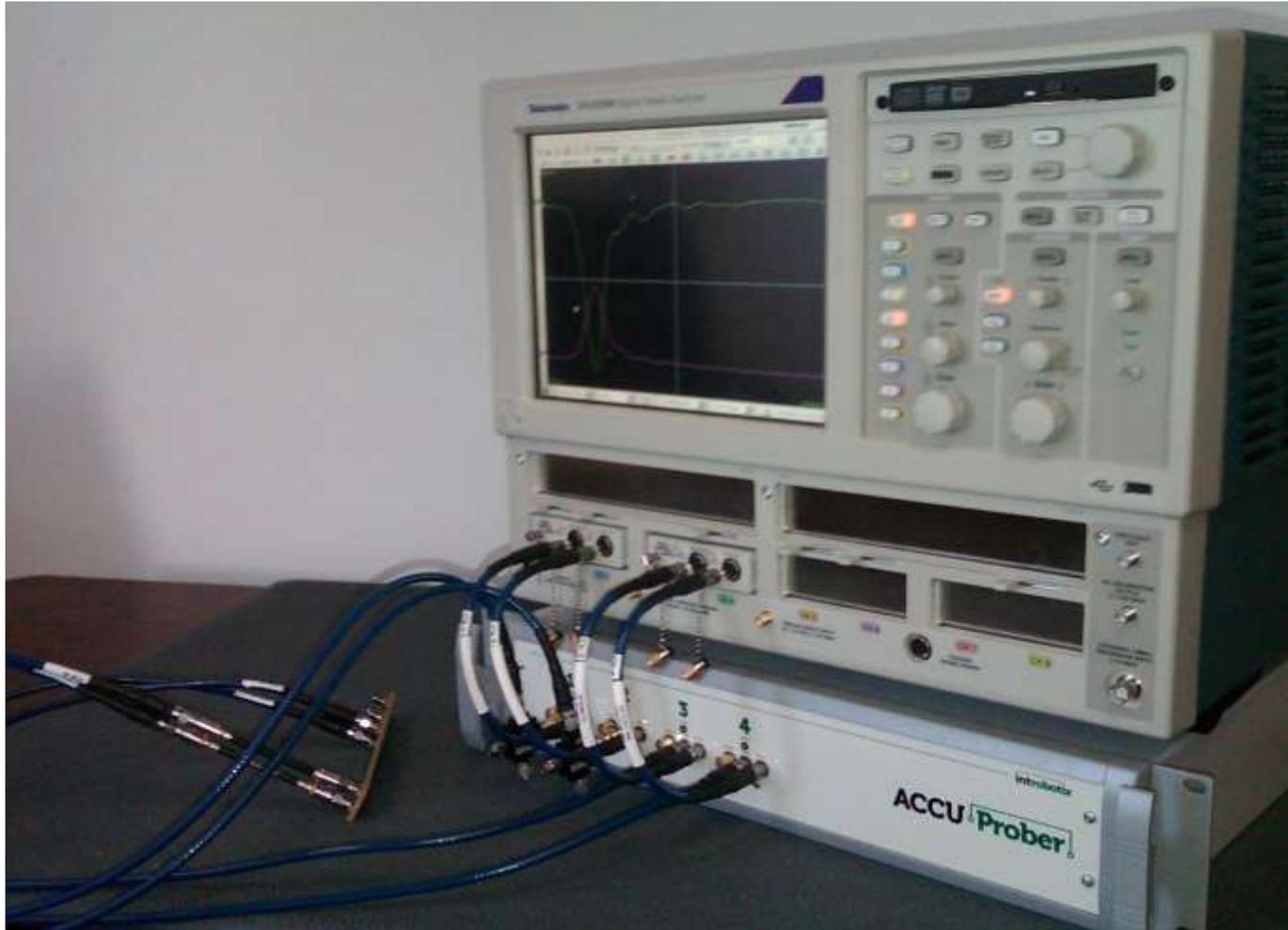
$\phi_1(f)$ and $\phi_2(f)$ are the phase of the Fourier Transforms for the long and short lines respectively.



Equivalent Bandwidth (EBW)

- Measured same time as impedance and delay
- Provide certification data for alternate laminate use
- Understand material loss variation over production lots
- Approved by IPC TM-650 2.5.5.12

SPP Production Test System for loss (SPP/SET2DIL/EBW)



Summary of Production Loss Test Method

	EBW	SET2DIL	SPP	SET2SEIL	TVNA	VNA
Developed by	IBX	Intel	IBM	Intel	IBX	Agilent
PWB Production Test	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Coupon	Not Required	Yes	Yes	Yes	Not Required	Not Required
SE or DIFF	Both	Diff	Both	SE	Both	Both
# of Measurement Ports	1,2	2	2,4	2	2,4	2,4
Insertion Loss Values	Gvolts/sec	dB/inch vs. Freq	dB/cm vs Freq	dB/in vs Freq	dB vs Freq	dB vs Freq
Impedance	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Calculated
Return Loss	No	No	No	No	Yes	Yes
Effective Dk(f)	No	To be Announced	Yes	No	No	No
Effective Df(f)	No	To be Announced	To be Announced	No	No	No
Via Loss Included	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes, unless TRL
Probe	Probe Independent	Micro-probe	SMA or Micro-Probe	Micro-probe	Probe Independent	Probe Independent
Test time	4sec	12sec	4-10mins	6sec	6-12sec	10sec
Typical Test Frequency	15GHz	4 & 8GHz	20GHz	4 & 8GHz	20GHz	20GHz
Maximun Test Frequency	30GHz	30GHz	50GHz	30GHz	50GHz	65GHz
IBX Equipment	ACCU-Prober Standard, CI1000	ACCU-Prober with SET2DIL	ACCU-Prober with SPP	ACCU-Prober with SET2DIL	ACCU-Prober with TVNA, CI1000	NA
Calibration	Simple-TDR Risetime	Thru/Offset Deskew	Impedance/Pulse Sync (Diff)	Thru	Thru & Load	TRL or SOLT
Measurement Assumptions	Relative measurement	Via Loss = 0	Long & Short traces have the same cross section	Via Loss = 0	Total Loss (Via & Trace)	Total Loss (Via & Trace)
IPC TM-650 2.5.5.12	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Special Measurement Requirements	Golden measurements	Symmety in Diff Pair	TDR Impedance Pre-screen process	None	None	High Operator Skill Level
Backdrill Required on thicker boards	No	Yes	Yes	Yes	No	No

泰克公司TDR测试方案-P8018/P6150



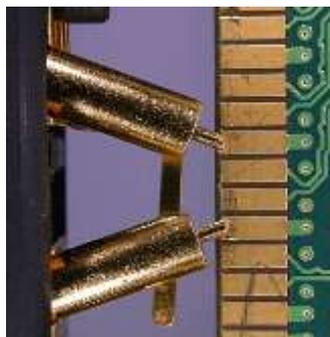
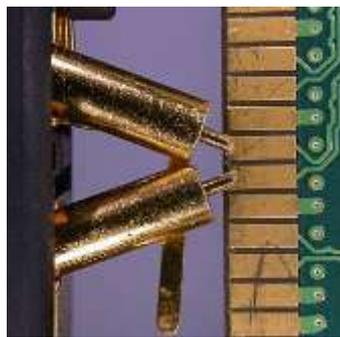
20 GHz Probe Tip Bandwidth
50 Ω Impedance TDR Passive Probe



>9GHz带宽
1X, 10X 衰减探针
可调距离宽度的接地线
<38.8ps上升时间
<0.15pF 输入电容

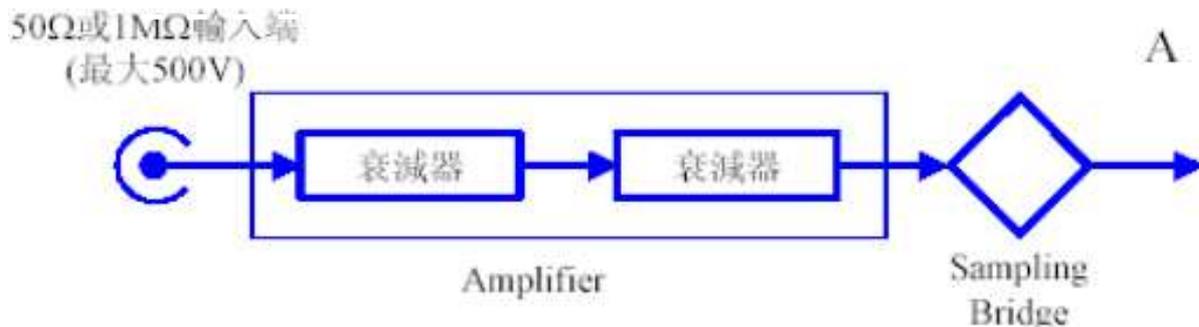
泰克公司TDR测试方案-P80318-业界独一无二的 18GHz 差分TDR探头

- **P80318** – 18GHz 100 Ω 手持式TDR阻抗测量探头
 - 0.5mm to 4.2mm可调间距探头尖
 - FR4材质PCB最小2.5 mm (0.1 in.) 间距分辨
 - 与80A02模块一起使用时提供EOS/ESD 保护功能
- 专门优化用于差分TDR/TDT测量(不支持共模和单端测量)
 - 单端测量请使用P8018!
- **P80318X** – 18GHz 100 Ω 手持式TDR差分阻抗测量附加探头
 - 用于主要探头需要维护时的替代品,确保生产时间

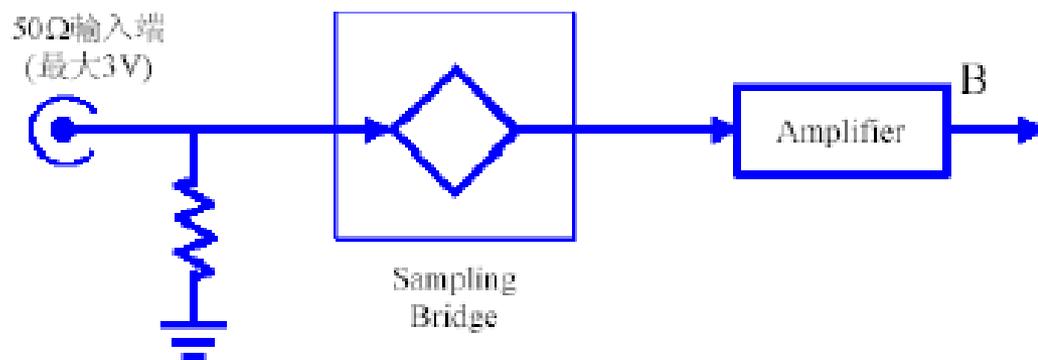


泰克公司TDR测试方案——TDR静电保护——为什么

- 右图为等效采样示波器和实时采样示波器的垂直通道对比框图。
- 等效采样示波器为了获得高达70G以上带宽,垂直通道通常没有衰减放大器.因此容易被静电损坏,通常是EOS (Electrical Over Stress),因此对静电防护要求很高.
- 需要对采样模块80E04配置专门的防静电模块80A02,泰克公司提供了业界最全面的防静电保护方案,还有P8018和P80318探头.

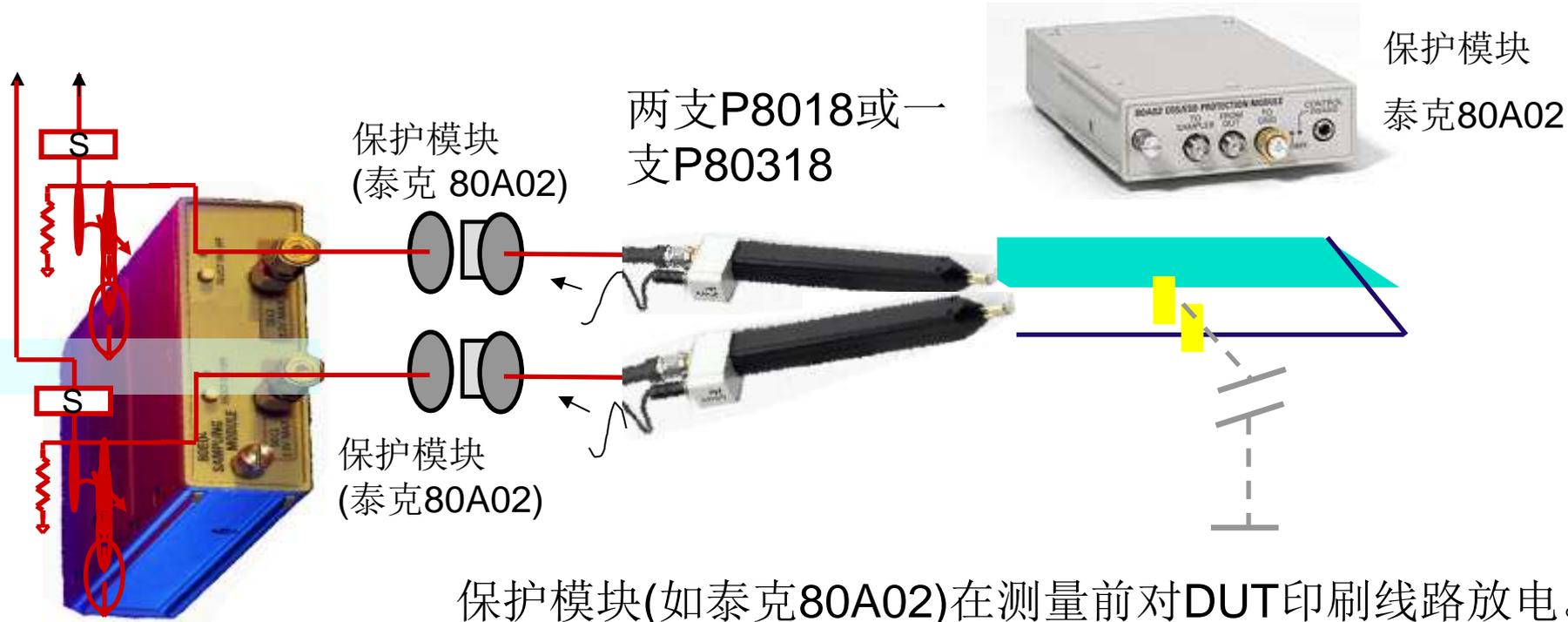


含衰减器的实时采样示波器的模拟通道



不含衰减器的高带宽采样示波器的模拟通道

泰克公司TDR测试方案——TDR静电保护——解决方案



80E04 TDR模块通道 1和
通道 2

保护模块(如泰克80A02)在测量前对DUT印刷线路放电。

保护模块可以通过TTL信号控制，或通过PCB探头
P8018/P80318的信号控制。

The new 80A09 ESD protector

Key specifications (typical)

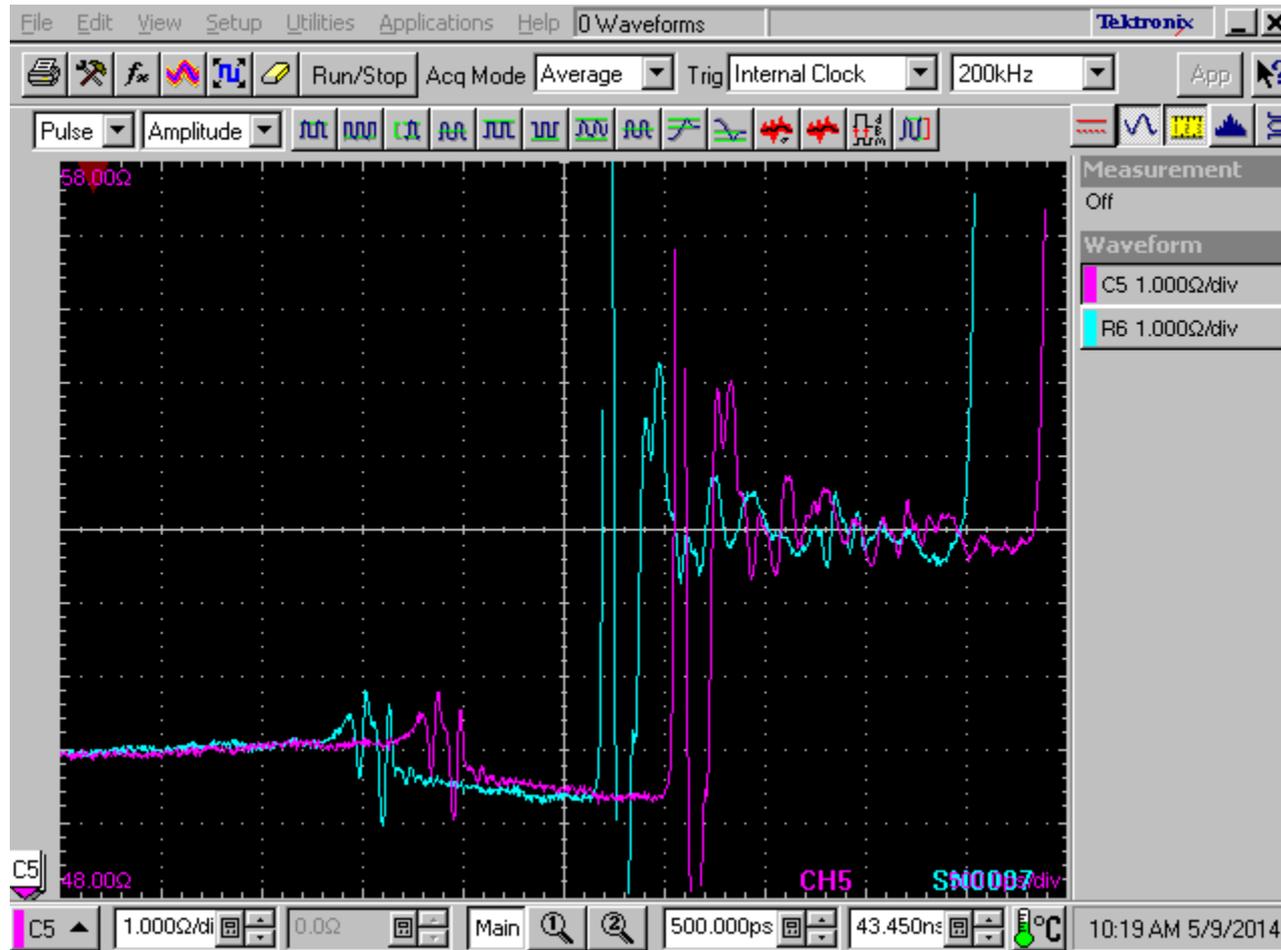
- Nominal Impedance: 50 Ω
- Operating input signal range: ± 1 VDC
- Frequency Range: DC to 26.5 GHz
- Insertion Loss:
 - DC - 15 GHz: ≤ 0.3 dB
 - 15 GHz - 20 GHz: ≤ 0.5 dB
- Connectors: One male and one female K (2.92 mm): mates with SMA, 2.92 mm, and precision 3.5 mm connectors

Sampling modules with dual electrical channels, such as the 80E04 dual channel 20 GHz electrical sampling module with TDR, require two 80A09 devices.

Step generators within the 80E04 TDR modules uses ≤ 250 mV, which is less than the diode threshold of the 80A09 device.



What does these translate into for TDR users?



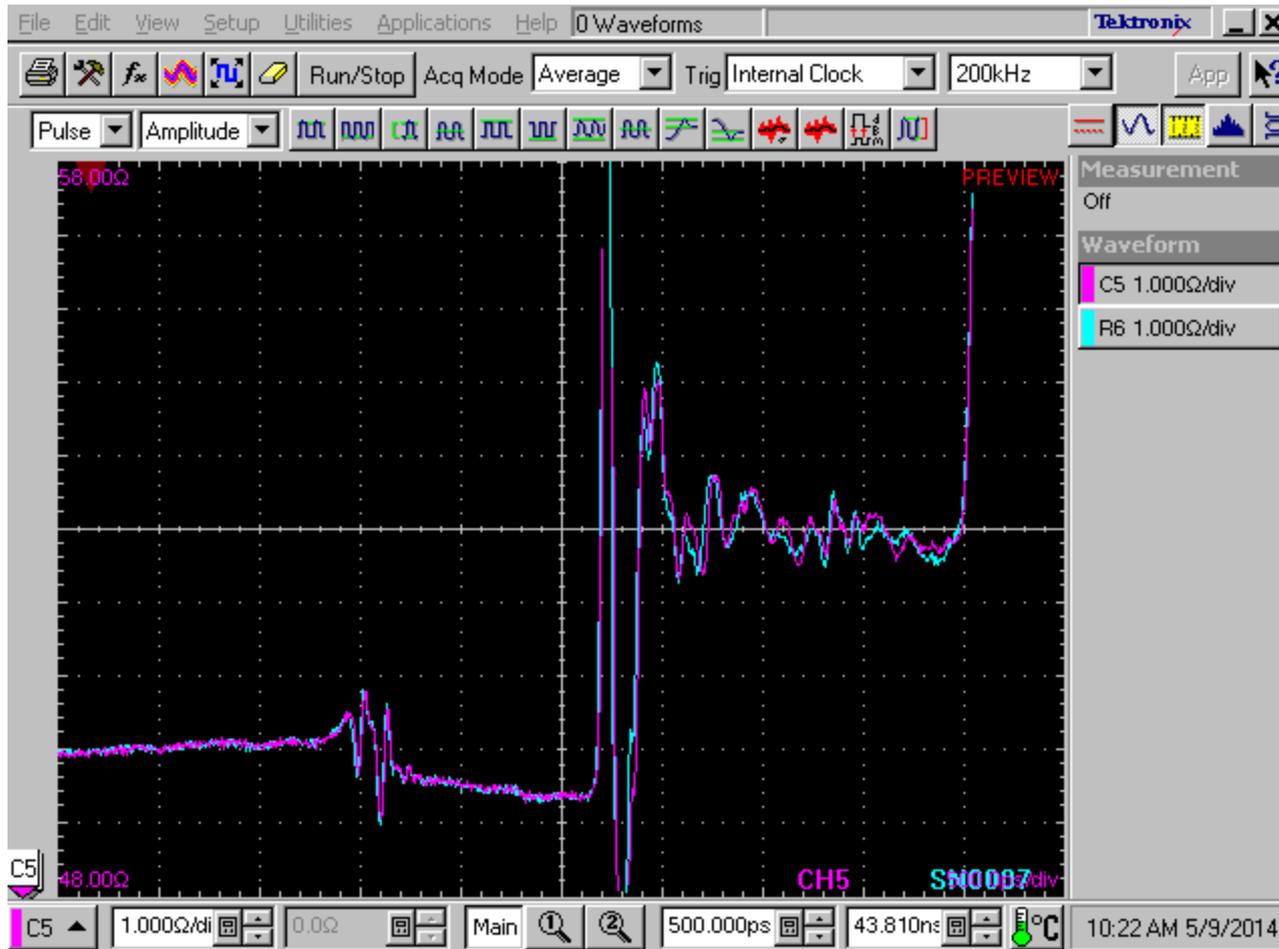
TDR of a single ended test coupon using a P8018 probe.

Cyan trace: probe directly input to 80E04

Pink trace: 80A09 inserted between the probe and 80E04

Next slide shows how close the measurements are after timing delay compensation

Timing corrected TDR traces with and without an 80A09



Only very minor differences are seen between the two traces.

Bandwidth of P8018 is good enough to reveal subtle impedance variations along the coupon trace



Tektronix®

Thank You For Attending!