



# 25 Gb/s 信令测量方式

## 应用指南

### 我们将学习哪些内容：

本应用指南描述了在 100 G 系统中对 25+ Gb/s 信令发射机和接收机进行检定和一致性测试时使用的测量方式。本文的重点是示波器测量，部分涉及 BERT。

# 目录

1. 100GBE、32GFC、OIF CEI 及类似标准中 25+ Gb/s 信令概述.....	3
1.1. 25 Gb/s 电接口信令环境.....	3
1.2. 测量考虑因素 .....	3
2. 带宽要求和互连选择 .....	4
2.1. 带宽要求 .....	4
2.2. 连接器建议.....	5
3. 互连反嵌 .....	6
4. 外部时钟恢复及其互连 .....	6
4.1. 时钟恢复考虑因素 .....	7
4.2. 没有时钟恢复的试验 .....	7
5. 互连元器件.....	8
5.1. 触发拾拾装置 T .....	8
5.2. 配套触发拾拾装置 T 或 20–80 分路器.....	9
5.3. 配套分路器或 50–50 分路器 .....	9
5.4. DC 模块.....	9
5.5. 电缆.....	9
5.6. 从 {1.85 mm, 2.4 mm} 到 2.92 mm 连接器适配器 .....	9
5.7. 采样模块扩展器.....	10
6. 2.4 mm 互连的实用推荐	
6.1. 互连.....	10
6.2. 采样模块扩展器.....	10
6.3. 采集中使用单片电路采样模块时采样模块扩展器 .....	11
7. 使 DUT 和测量设备之间的互连达到最小 .....	11
8. 数据路径与时钟路径延迟匹配.....	12
8.1. 对数据路径和时钟路径延迟匹配的需求.....	12
9. 垂直校准和相差校正 .....	13
9.1. 垂直校准的重要性 .....	13
9.2. 垂直校准程序整体评论 .....	13
9.3. 垂直校准 .....	14
9.4. C5 到 C6 相差校正 .....	17
9.5. 相差校正说明 .....	20
9.6. C5 到 C6 相差校正：步骤 E：最大限度地减少 眼图交点之间的间隔，提炼相差校正 .....	21
10. 测量 .....	22
10.1. 执行基本系统测量.....	22
10.2. 执行抖动分析 .....	23

## 1. 100GBE、32GFC、OIF CEI 和类似标准 25+ Gb/s 信令概述

### 1.1. 25 Gb/s 电接口信令环境

电接口互连 ( 芯片到芯片、芯片到模块、盒中板卡到板卡 )、电接口背板和短 ( <15m) Infiniband 级无源电缆必须支持标准中 100 Gb/s 光学信令面向的系统，如 100GbE 光学系统 (802.3ba) 和 OTN。最早的系统设计使用 10x10G 电接口信令实现了这一点，10x10G 电接口信令以前是为支持 10 Gb/s 光学链路 ( 如 802.3ae) 而研制的。

由于 10x10G 信号发送起来非常困难、非常复杂，光学模块在两端要求使用变速箱 ( 在发射机从 10x10 传送到 4x25，然后在接收机中反向传送 )，因此业界正转向更加高效的 4x25 电接口互连。

在转向 25 Gb/s 信令的过程中，出现的第一个标准实体是 OIF CEI，它制订了 VSR、SR 和 LR ( 超短距离、短距离、远距离 ) 标准。目前，它正在开发以太网的 802.3bm 100GBASE-KR4 背板标准，以及以太网互连标准 802.bj CAUI4。这些标准是本文的主要论题。

本文重点介绍示波器，这是物理层测量的首选工具。从实践角度看，采样示波器或最快速的实时示波器是一种解决方案；其它方案如 BERT 误码检测器，目前要么不能支持所有测量，要么不能提供所需的精度 ( 抖动本底、噪底 )。

本文的姊妹篇“测量 25 Gb/s 信号：测试测量设备要求”讨论了更广泛的测量系统的优缺点，包括实时示波器和采样示波器在执行 25 Gb/s 信令测量时的性能比较。总体上看，实时示波器可以用来检定 25 Gb/s，但性能较差，成本较高；而其主要优势是方便。

### 1.2. 测量考虑因素

在这种背景下，本应用指南首先介绍示波器的测量设置问题，特别是采样示波器，包括发射机和受压眼图发生器的检定测量和一致性测量。尽管大部分市场使用与 10 Gb/s 标准相同的 NRZ<sup>1</sup> 信令，但在转向 25 Gb/s 的过程中，存在着许多重大挑战。例如，大量的实现方案被迫从传统 SMA/3.5 mm /2.92mm ( “K” ) 连接器系统转向更高性能的互连，如 2.4 mm 连接器，这在历史上还是第一次。

<sup>1</sup> 部分市场使用 13.8 Gbaud 的 PAM4，这似乎是一个小众市场。本文没有讨论这种信令。

## 2. 带宽要求和互连选择

这里，我们将展示一个可重复的实际测量系统设置，记住下述考虑因素：

互连应有足够的带宽，而没有频域不规则性（“吸出”），没有大的时域畸变，频率与关心的带宽中的损耗相关度不能太大。

除选择连接器和电缆外，明显的优化方式是互连长度；应在每一步尝试限制电缆长度，最大限度地减少连接器和器件的数量。

### 2.1. 带宽要求

#### 2.1.1 标准定位

在 25 Gb/s 时，标准通常要求 40 GHz 频率带宽的测量设备。此外，CEI VSR<sup>2</sup> 要求 Bessel-Thompson 滤波器响应，这在电气标准中还是第一次。

在本文编写时，可以理解为标准允许使用仅 40 GHz 带宽的连接器 / 电缆系统互连，但其处于边际状态；特别是在检定重要器件时（如芯片），泰克推荐采用更高带宽的互连，如 50 GHz。

#### 2.1.2 连接器和电缆跳模和插入损耗

众所周知，连接器或电缆（空）的内径限制着没有跳模时能够承载的最高频率。例如，由于内径限制，2.92 mm 连接器和电缆限于传送大约 40 GHz 信号，更高频率限制需要更小的连接器几何形状。

许多其它资料描述了波传播和跳模后面的机制，在本文中，必需指出，如果只是略微超过互连的最大带宽，跳模效应并不总是有害的。特别是，对非常短的互连（分路器、适配器），如果不同模式没有足够的距离、以在时间上相对分散，那么跳模影响并不大。

另一方面，破坏性模式重组一般会导致明显的“吸出”或跳模，因此比较长的软互连，如电缆，对信号完整性损害非常大，同时这些效应将与电缆位置、紧固等有关。

<sup>2</sup> 在本文编写时，标准还没有明确测量设备频响需要怎样密切地追踪理想的 Bessel-Thompson 响应，标准也没有解释它应该追踪多高的频率。光学领域已经稳定化，规定响应必须与 B-T 滤波器匹配，并支持最高 1.5 \* 位速率频率的某个容限，也就是说，28 Gb/s 测量系统必须追踪最高 42 GHz 的 B-T。

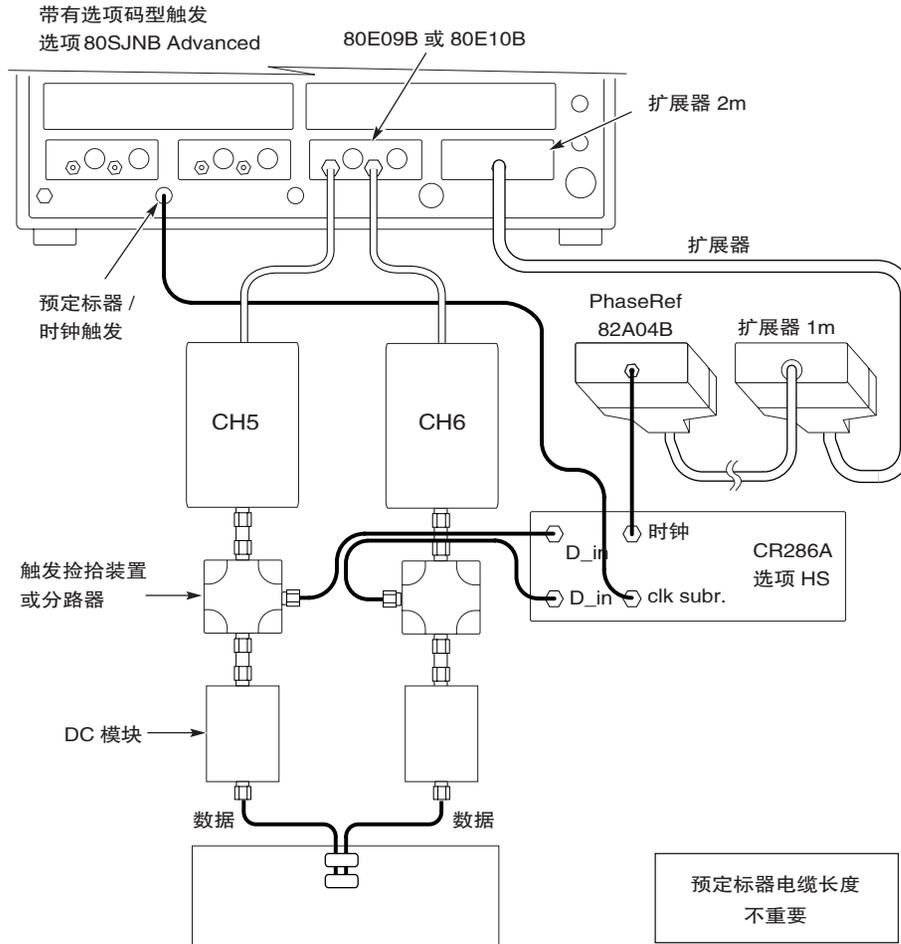


图 1. 使用直接硬件时钟恢复的测量设置。

## 2.2. 推荐连接器

泰克推荐为 40 GHz 以上带宽设计测量。这意味着偏离 SMA 兼容 2.92 mm 连接器 (“K”) 连接器。下一个更高的带宽选择是 2.4 mm 连接器的 50 GHz 带宽；50 GHz 互连是一个很好的选择 – 它高于要求的最低带宽，并向上兼容更快的 “V” 连接器系统，而且不是太稀缺，也不太贵。

还可以使用 1.85 mm (即 “V”) 接头互连；“V” 连接器兼容 2.4 mm 连接器，V 连接器支持 70 GHz 以上的带宽。

2015 前年制造的 CMOS 元器件的大多数信号都没有足够的带宽，受益于 “V” 互连 (在 2.4 mm 互连上)，而明智的用户必须做出最终决策，确定使用哪种连接器 (2.4 mm 或 1.85 mm “V”)。

系统互连很少带有 2.92 mm (“K” 元件)，在尝试时，应注意避免 3.5 mm 或 SMA 电缆。

2.4 mm 建议很容易出现的一个例外情况是接收机测试使用的受压眼图发生器，它生成故意缓慢边沿的信号。在受压眼图生成设置中，不一定要保留 50 GHz 互连，因为无论如何，信号都必须通过大约 20 GHz 滤波器。

### 3. 互连反嵌

可以对采集信号使用处理和分析技术，反嵌部分互连，以便在与实际采集平面不同的测量平面上观察信号。这已经成为示波器信号处理套件的商用功能，如 80SJNB Advanced 抖动测试软件包的 SDLA (串行数据链路分析) 功能，或实时示波器 SDLA 软件包。

在 25+ Gb/s 标准中，有两个主要应用，可以考虑反嵌：

■ 反嵌夹具 – 如测试电路板

■ 反嵌示波器与夹具之间的互连

在实际部署中，反嵌功能的实用性通常不如其方便性。例如，在实时示波器中，采集系统的分辨率很少超过满刻度信号的 5 ENOB (有效位数)；对几分之一的信号功能或频谱低能量部分，分辨率相应地只有几分之一。在信号捕获产生不可接受的结果之前，只能使用少量反嵌。

采样示波器提供了更高的分辨率，因此反嵌比较实用。记住，反嵌把损耗转换成噪声，因此使反嵌数量达到最小非常重要。

不管是哪种反嵌，关键点是在采集被测信号的优质网络描述 (S 参数)。不言而喻，网络测量中 20 dB 的吸出效应将在结果中产生 20 dB 尖峰，使试验失效。

建议：

应把精力放在最大限度地减少互连长度和损耗、其质量和可重复性上。只有在完成这一点之后，才能按需应用反嵌。

### 4. 外部时钟恢复及其互连

一般来说，DUT(串行数据传输设备本身)运行接收机 (RX) 中的时钟恢复电路 (CR)。因此，标准规定测量设备拥有“允许的尽可能最坏的 RX CR”。“允许的尽可能最坏的 RX CR”意味着测量设备的 CR 应不好于最坏的满足标准的接收机的 CR。在采样示波器设置中，CR 要么位于单独的 CRU (时钟恢复单元) 中，要么位于采集模块内置电路中；BERT 误码检测器也有类似的选项。

一般来说，外部时钟恢复的优势包括更高的灵活性 (如可以与示波器或 BERT 使用相同的 CRU) 和更高的功能 – 如接入模拟 PLL 控制电压，调试时钟问题。

在实时示波器中，可以使用软件实现时钟恢复。软件时钟恢复的优势是全面的灵活性、没有互连影响。劣势是使用软件时钟恢复，几乎不可能找到低概率的时钟问题。

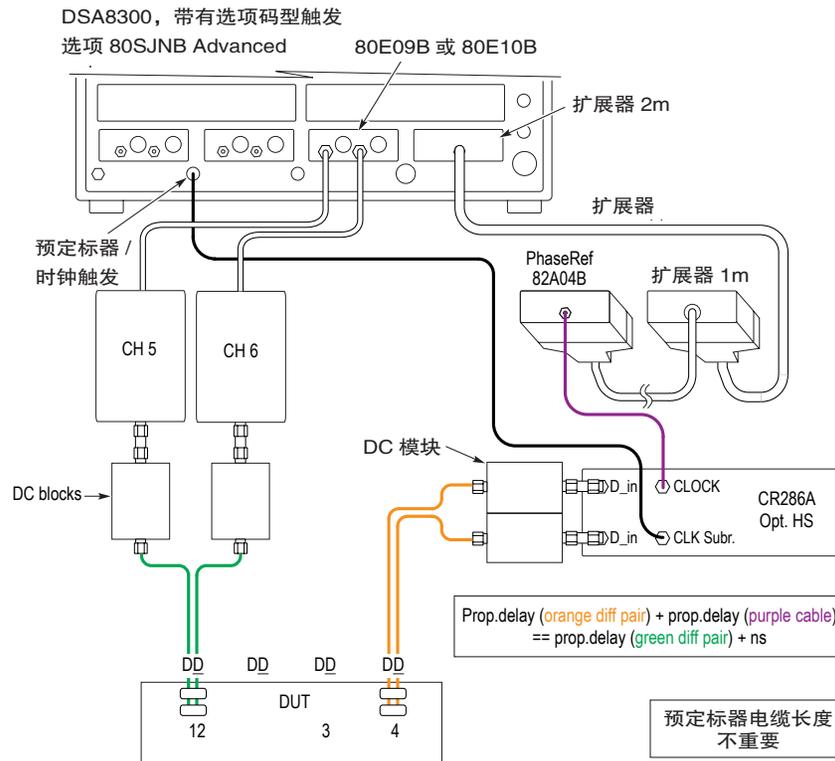


图 2. 采用基于邻道的硬件时钟恢复的测量设置。注意数据路径中没有分路器。另外注意，必须先验证用来驱动 CRU 的邻道与来自采集通道的信号拥有相同的不相关抖动。

#### 4.1. 时钟恢复考虑因素

图 1 是采用明确的硬件时钟恢复单元 (CRU) 的典型设置。标准要求时钟恢复，其仿真物理接收机的特点。

必须审慎地考虑数据路径中的分路器，参见“5. 互连器件”部分。有几种情况，可以避免分路器：

- 在被测系统的时钟信号与 CRU 追踪的时钟足够接近时，例如，在系统中没有周期性抖动 (PJ) 时。
- 在可以使用另一条路径为时钟恢复提供信号时，如图 2 所示。这种设置需要满足一个条件，如 DUT 通道上的抖动必须类似、并同相。错误的假设会导致悲观的 (提高的) 抖动结果。

#### 4.2. 没有时钟恢复的试验

在实践中，简单地测试不包括再定时器的器件是不需要 CR 的，如在测试简单的缓冲放大器时，我们可以直接从 BERT，合理地驱动缓冲放大器；直接从 BERT，驱动采样示波器的时钟，而不用使用 CRU。CRU 不追踪 DUT (缓冲放大器) 的变化，这一点是悲观性的 (CR 可能不能追踪部分抖动，因此将出现更大的抖动结果)，在没有自己的再定时器的短 (传播延迟) DUT 中，这种悲观性非常小。

## 5. 互连器件

概述：

**DC 模块：**在面对 50 欧姆 DC 到地的负载时，某些 SerDes 将被损坏。在这种情况下，DC 模块是把 DC 负载与测试测量设备分开的首选方式。

注意，并不是一直必需 DC 模块，有时 DUT 不要求 DC 模块，或作为夹具的一部分已经包括某种形式的 AC 耦合。如有疑问，应与 SerDes 制造商或设计人员确认。

**相差校正硬件：**大多数示波器都内置相差校正功能。在泰克 DSA8300 中，相差校正内置到采样选通路径中，而不是信号路径中，因此相差校正功能对信号质量没有影响。注：由于历史原因，这一名称容易引起混淆：DSA8300 的“相差校正”功能上实际是一个错误选择，您千万不能把它用于串行数据（它实际上是最初为 TDR 设计的多采集时基设置）。在 DSA8300 中，正确的刻度盘标为“Delay”<sup>3</sup>。

BERT<sup>4</sup> 的误码检测器要求精确校正硬件相差，但由于很难满足带宽和抖动本底要求，现有的 BERT 通常不用来执行精确的抖动和 / 或浴缸分析。

时钟恢复路径或误码检测器还需要硬件相差校正，如果数据和数据之间的相差是明显的 UI 的几分之一，那么也少不了硬件相差校正，但这里的灵敏度要远远低于采集路径中的相差校正，基于这一原因，一般可以使用精心设计的系统，其在 CRU 路径中没有硬件相差校正。

**适用于时钟恢复的分路器或“触发捡拾装置 T”**

如上面“4.1 时钟恢复”考虑因素中所述，在某些情况下，可以避免分路器，在这种情况下，我们推荐使用这种分路器或“触发捡拾装置 T”技术。

如果必需分路器，那么应考虑下述可能及优缺点：

### 5.1. 触发捡拾装置<sup>4</sup>

**优势：**最佳的平坦度，最佳的（最低的）损耗。

**劣势：**最快器件的输入和输出特性阻抗低于 50 欧姆，因此，对反射容限低或 S11 差的 DUT 不应单独使用这种方法；在输入路径中增加 3 dB 衰减器可以缓解这个问题。

例：Picosecond Pulse Labs PN 5361 在主路径中拥有大约 7ps 的上升时间。典型配置 5361-237-14DB（全部 2.4 mm）。

插座端口 1（输入），插头端口 2（高电源分路），插座端口 3（低电源分路）。

<sup>3</sup>即 Setup->Vertical->[选择的通道]->Delay。在实践中，最好一直调节偶数通道（尽管硬件允许调节偶数通道和奇数通道）。

<sup>4</sup>一般来说，（触发）捡拾装置 T 和分路器之间的差别在于，在分路器中，两个（或两个以上的）输出质量最大限度地接近 RF 质量。在触发捡拾装置中，设计人员一般刻意假设每条路径承担不同的任务，因此可以根据这种假设，在设计上做出某些折衷。这两种器件都是互易器件（不同于定向耦合器）。

## 5.2. 配套触发捡拾装置 T4 或 20–80 分路器

优势: 阻抗匹配度好; 主路径中的损耗低于配套的 50–50 分路器。

劣势: 市场上没有一种已知器件拥有足够的带宽<sup>5</sup>, 此外, 带宽平坦度与不配套的触发捡拾装置的带宽平坦度不匹配。

例: Picosecond Pulse Labs PN 5372; 典型配置 5372–112 (客户要求时提供 SMA 或 2.4 mm)

插座端口 1 (输入), 插头端口 2 (高功率分路), 插座端口 3 (低功率分路)。

## 5.3. 配套分路器或 50–50 分路器

优势: 阻抗匹配好; 触发路径损耗低于触发捡拾装置 T。

劣势: 直传路径损耗较高; DC 与最高频率之间的损耗增量较差 (差于触发捡拾装置 T)。

例: Picosecond Pulse Labs PN 5350, 主路径中上升时间约为 8 ps。5350–237 2.4 mm, 插座端口 1, 插头端口 2, 插座端口 3; (所有端口电气等效)。

例: Anritsu V240C ‘V’ (1.85 mm) 配套 65 GHz 电源分路器, 3 个端口全部为插座, 在需要时可以增加一个 Anritsu 34VV50 65 GHz 插头到插头适配器。

## 5.4. DC 模块

我们在市场上已经找到没有明显折衷的多款优秀 DC 模块。

例: Marki DCZM24F24 DC 模块 4 kHz–65 GHz (sic) 2.4 mm 插头 / 插座连接器; 例: Picosecond Pulse Labs DC 模块 PN 5509–205–224 2.4 mm 40 GHz DC 模块。

## 5.5. 电缆

在非常高的频率不跳模的电缆有着与连接器相同的问题: 外部导体的内径必须小于带宽较低的电缆。考虑到固定阻抗, 这还会导致内部导体较小, 进而导致更高的损耗, 即使在低频时, 损耗仍会高于带宽较低的电缆。

这是我们推荐远程采样头示波器准确捕获信号的主要原因: 远程采样头限制了所需的电缆数量, 在理想情况下为 0。

例: Gore TEK67HF06PS 两端 152 mm (6”) 插头 “V”, 67 GHz 电缆, 配套于 < 5 ps 的线对相差。

例: 泰克产品编号待定, 软同轴电缆, 两端都带有 2.4mm 插头 (5 cm), SV MICROWAVE 公司制造的 7016–TBD, 匹配线对相差 < 5 ps。

电缆相差: 示波器通道能够校正相差。CRU 不能校正相差, 但其对相差的灵敏度很小。

## 5.6. 从 {1.85 mm, 2.4 mm} 到 2.92 mm 的连接器适配器

在信号源带有 2.92 mm 连接器时, 必需使用这一适配器。

此外, BERTScope 和 CRU 都使用 Crown 适配器, 这些适配器可以订购 2.4 mm。

例: Marki ADPM24F29 适配器, (插头) 2.4mm 到 (插座) 2.92mm

例: 泰克 PN 011–0187–00 适配器, (插头) 2.4mm 到 (插座) 2.92mm, 如 Rosenberger 适配器, RF, PRCN; 2.4mm 或 1.85mm 插头到 2.92mm 插座。

例: Crown 2.4 mm, 适用于 BERTScope 或 CR286A CRU

例: Aeroflex PN 7005A–12, 2.4mm Crown 连接器: 部件编号 7005A–12 2.4mm 插座

<sup>5</sup> 据我们所知,  $t_r < 8\text{ps}$  的器件是不存在的。如果我的理解不对, 请发送邮件至 pavel.zivny@tek.com, 十分感谢!

## 5.7. 采样模块扩展器

采样模块扩展器电缆是“2m 采样模块扩展器电缆 Tek 80N01”和“1m 采样模块扩展器电缆 Tek TBD”。

### 5.7.1 采集使用远程采样头采样模块时的采样模块扩展器

如果使用带有远程采样头的采样模块(80E09B、80E09、80E10B、80E10)，如本指南中所有设置示意图所示，82A04B 或 82A04 PhaseRef 模块需要放在扩展器上，如示意图所示。

### 5.7.2 采集使用单片电路采样模块时的采样模块扩展器

如果使用单片电路采样模块(如 80E11)，应考虑把它放在 1m 或 2m 扩展器上。如果模块位于 2m 扩展器上，那么延迟应同于本处给出的实例。

如果 80E11 与 1m 扩展器电缆一起使用，那么需要把 PhaseRef 的扩展器电缆延迟减少 1m。(如在为远程采样头模块指定 2m+1m 扩展器时，如果 80E11 位于 1m 扩展器上，那么将只使用 2m 扩展器)。

如果 80E11 没有位于扩展器电缆上，那么需要把 PhaseRef 的扩展器电缆延迟减少 2m(相对于本指南中所示实例)。

## 6. 2.4 mm 互连的实用推荐

除上述讨论外，我们选择下述部件作为基本推荐设备：

## 6.1. 互连

下面列出的是单路系统，差分设置需要翻倍。

- DC 模块  
PSP Labs 5509-205-224 16 V max. 2.4 mm 插座到 2.4 mm 插头
- CRU 数据拾拾装置：  
拾拾装置 TPicosecond Pulse Labs 触发拾拾装置 T (大约 7 ps 上升时间)，5361-237-14DB 2.4 mm 插孔 (插座) 插头 (插头) 插孔 (插座)，得到的 CRU 灵敏度  $\leq 160 \text{ mV}_{\text{diff}}$  [带有 CR286 选项 HS]
- 连接器适配器，从 {1.85 mm, 2.4 mm} 到 2.92 mm 泰克 PN 011-0187-00 适配器，(插头) 2.4mm 到 (插座) 2.92mm，即 Rosenberger 适配器，RF, PRCN；2.4mm 或 1.85mm 插头到 2.92mm 插座
- 从分路器 T 到 CRU 的连接：  
电缆，约 2ns (40cm, 即 2") 2.4 mm / 60GHz 额定带宽电缆 SV Microwave TFlex-405，2.4 mm 插头到 2.4 mm 插头，5 ps 匹配。到 Crown 2.4 mm (适用于 BERTScope 或 CR286A CRU)；Aeroflex PN 7005A-12
- 到 2.4 mm 接头 DUT 的连接：  
电缆，约 5cm (2")；即非常短) 2.4 mm / 60GHz 额定带宽电缆 SV Microwave TFlex-405，2.4 mm 插头到 2.4 mm 插头，5 ps 匹配。

## 6.2. 采样模块扩展器

电源：

- 2m 采样模块扩展器电缆，Tek 80N01；
- 1m 采样模块扩展器电缆，Tek TBD。

注意，这些模块将与 82A04B 模块一起自动提供。

<sup>3</sup> 即 Setup->Vertical->[选择的通道]->Delay。在实践中，最好一直调节偶数通道(尽管硬件允许调节偶数通道和奇数通道)。

<sup>4</sup> 一般来说，(触发)拾拾装置 T 和分路器之间的差别在于，在分路器中，两个(或两个以上的)输出质量最大限度地接近 RF 质量。在触发拾拾装置中，设计人员一般刻意假设每条路径承担不同的任务，因此可以根据这种假设，在设计上做出某些折衷。这两种器件都是互易器件(不同于定向耦合器)。

### 6.3. 采集使用单片电路采样模块时的采样模块扩展器

如果使用单片电路采样模块 (如 80E11), 应考虑把它放在 1m 或 2m 扩展器上。如果模块位于 2m 扩展器上, 那么延迟应同于本处给出的实例。

如果 80E11 与 1m 扩展器电缆一起使用, 那么需要把 PhaseRef 的扩展器电缆延迟减少 1m。(如在为远程采样头模块指定 2m+1m 扩展器时, 如果 80E11 位于 1m 扩展器上, 那么将只使用 2m 扩展器)。

如果 80E11 没有位于扩展器电缆上, 那么需要把 PhaseRef 的扩展器电缆延迟减少 2m (相对于本指南中所示实例)。

## 7. 最大限度地减少 DUT 与测量设备之间的互连

图 3 中的图片是连接到采样示波器 (Tek DSA8300) 及其采样模块 (Tek 80E09B) 远程采样头的芯片检定电路板实例。

电路板带有 SMP-M (也称为迷你 SMP) 连接器接头。连接器在垂直方向有一条大约 30 mm 的“SMP-M 到 2.4 mm”电缆, 这条电缆连接到拾拾装置 ‘T’ 上。拾拾装置 T 连接到插头到插头适配器上 (由于拾拾装置 T 选择有误, 必需使用适配器)。连到照片左方外面的蓝色电缆连接到 CRU; 后台中可以看到 CRU 本身。

远程采样头的重量由泰克探头固定器 “PPM203B” 关节臂承担, 每只采样头一个 (参见模块上方的黑色臂)。

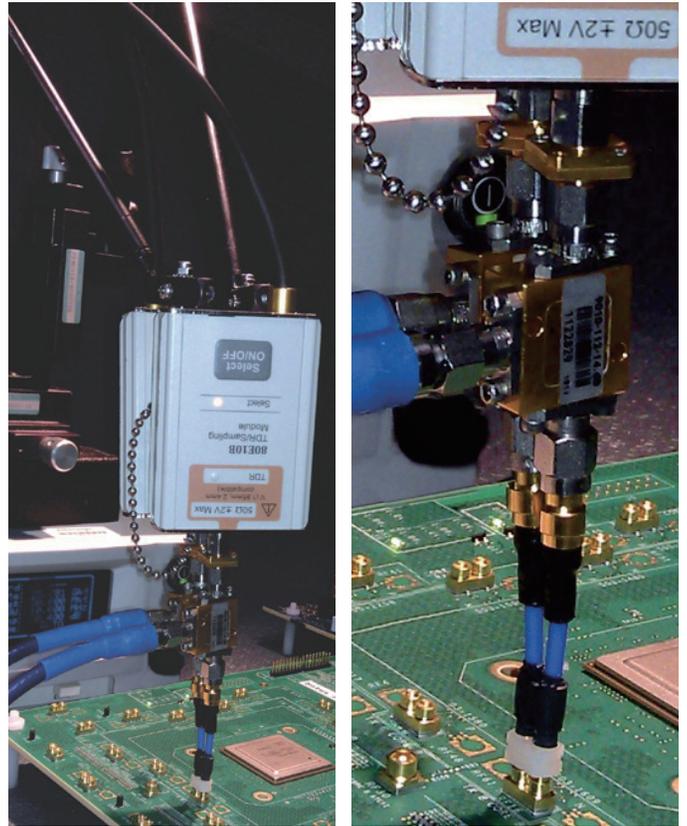


图 3. 用于短互连长度的远程采样头实例。

(注: 为清楚起见, 背景进行了编辑)

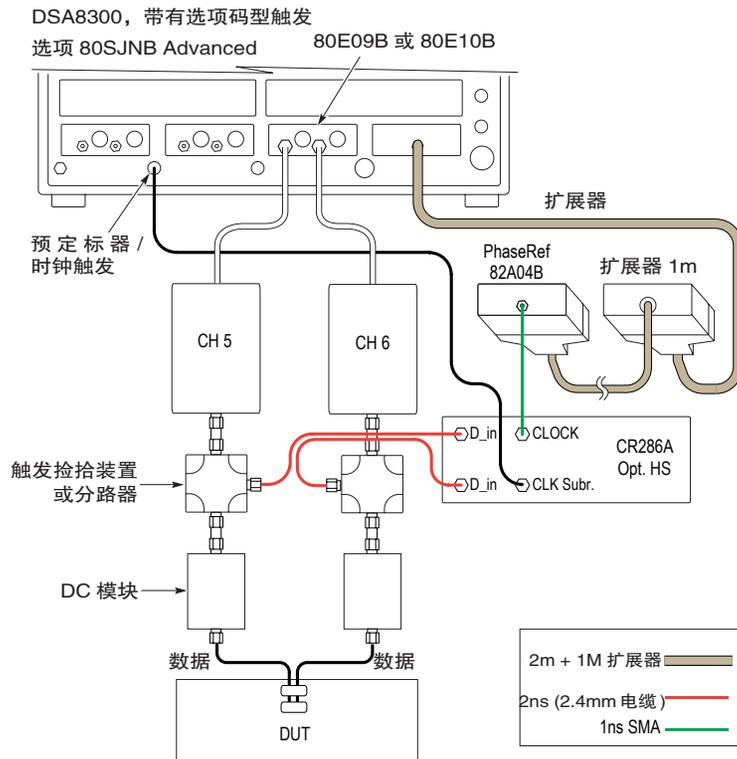


图 4. 直接硬件时钟恢复的测量设置中的电缆延迟。红色连接对延迟非常关键。

## 8. 数据路径和时钟路径匹配

### 8.1. 数据路径和时钟路径延迟匹配需求

对互连的要求有两个：

- A. 应尽可能缩短高速数据路径的长度。
- B. 应根据从数据中以接近零的延迟恢复的时钟导出的时序，来采集数据。

在采样示波器设置中，这两个要求相互矛盾：CR 及其互连插入一个数据路径中不存在的非零传播延迟。在实时示波器中，这可以在软件中处理，通过在数据路径中插入一个延迟实现；而在采样示波器中，数据路径中的硬件延迟似乎必不可少，但数据路径中的硬件延迟线将违反要求“A”。

解决方案是不延迟数据路径，而是延迟到 PhaseRef 模块的定时参考，这个模块采集时钟恢复生成的相位时钟，进而获得数据和时钟之间的精确定时。图 4 中用红色突出显示了这一点，所有用红色显示的电缆都对长度要求都非常关键，以便正确匹配数据采集点与时钟采集点之间的定时。

视不相关的抖动数量和频率，数据采集路径与时钟采集路径之间的这种延迟匹配误差将影响周期性抖动、随机性抖动和 NP-BUJ（非周期性有界不相关抖动）结果。在普通 25 Gb/s 系统中，数据路径和采集路径之间的匹配度必须好于  $\pm 500$  ps，这样才不会影响抖动结果<sup>6</sup>。

时钟路径和数据采集路径之间匹配不当一般是悲观性的（抖动结果要大于正确结果），（由时钟采集路径捕获）捕获的 CRU 抖动追踪相对于数据采集的数据上存在的抖动是不同相的。

<sup>6</sup> 这取决于测量的抖动数量和要求的抖动数量。这里，我们假设发射机器件的性能约为 100 fs - 300 fs。

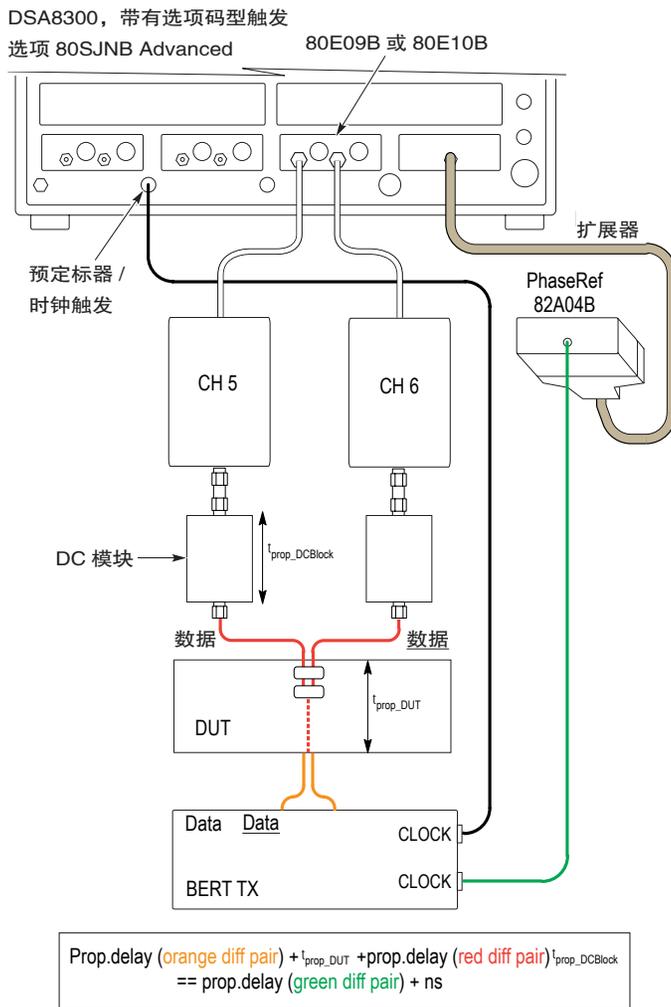


图 5. 基于邻道中信号的硬件时钟恢复测量设置。注意数据路径中没有分路器。红色连接对延迟非常灵敏。

还需要以不同方式考虑没有 CRU(时钟恢复单元)时设置中的电缆延迟,如图 5 所示;数据路径的传播延迟包括 DUT 互连和 DUT,时钟路径的传播延迟现在只是时钟互连的延迟。

到目前为止,在我们讨论的所有设置中,非常重要的一点是远程采样头电缆和扩展器电缆的电长度。远程采样头电缆设计为 10 ns 传播延迟,与 2m 扩展器电缆一样。

## 9. 垂直校准和相差校正

### 9.1. 垂直校准的重要性:

如果来自 DUT 的信号必须通过 DC 模块及通过分路器 / “T” 捡拾装置,那么必需校准最后的垂直灵敏度。

在 DC 模块或 CRU 连接到数据路径的系统中,必需使用 AC 信号进行校准。我们推荐使用方波信号,在跳变周围最多 0.1 us 窗口内进行校准(如上升时间)。

通过这种方式,典型 AC 耦合的顶降将不会影响校准结果。

### 9.2. 垂直校准程序整体评论

把采样模块连接到 AC 波形信号源上,可以执行垂直校准,这个 AC 波形信号源可以不具体了解,但要稳定。

在第一步中,采样模块用来确定稳定校准源发出的信号幅度。

在第二步中,校准源经 CRU 信号捡拾装置(捡拾装置 T 或分路器)连接到示波器上,经 AC 耦合连接到示波器上;调节垂直校准增益校正因数,以与校准源的原始幅度相匹配。

由于来自 DSA8300 自己前面板 AC 信号源的 TDR 时钟输出 SMA 的幅度太大,在大多数情况下不能使用模块直接进行测量,必需衰减这个信号,使用另一个信号,或最终使用垂直偏置,分两步捕获信号 – Low 电平和 High 电平。

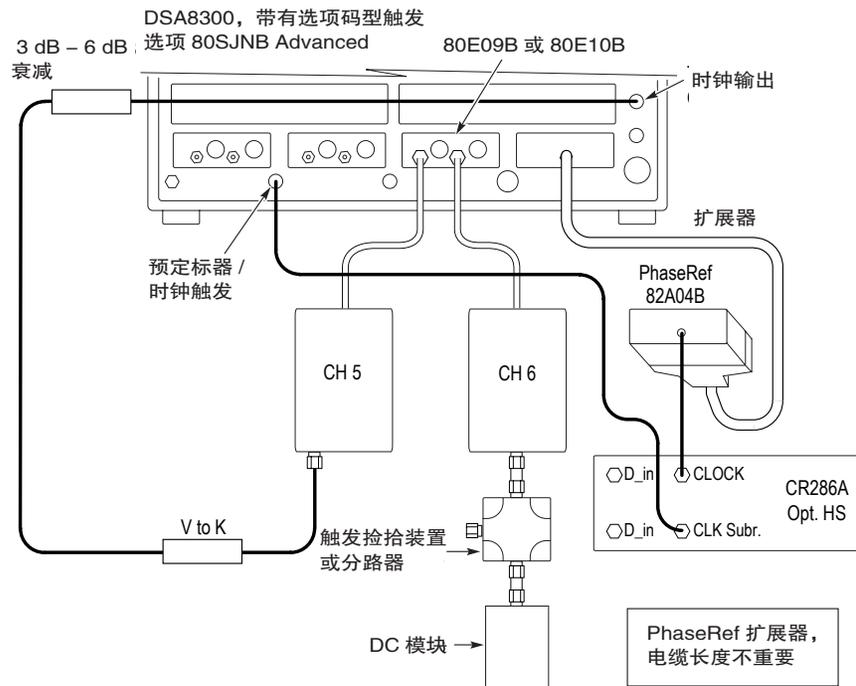


图 6. 垂直校准系统设置，第 B 步。校准信号用赭色突出显示。

### 9.3. 垂直校准

如果设置使用信号分路器和 / 或 DC 模块，那么根据下述程序校准垂直幅度：

#### 9.3.1 垂直校准，步骤 A：基本示波器设置

- 执行默认设置 Default Setup (如从前面板中)
- 执行 Setups->Mode/Trigger->Trigger Source: TDR
- 选择 (启用) C5 (通道 5)
- 把 Horizontal Scale 时间格设置成 1us/div
- 设置 Setups->Horz-> Record Length > 1000 [S( 样点 )]
- Setups->Disp->Style: Show Vectors
- 确认 Oscilloscope Run/Stop 状态为 Run
- Setups->Acq->Acquisition Mode: Average( 默认 16 个样点平均值足够了 )

#### 9.3.2 垂直校准，CH5，步骤 B：测量参考幅度

- 选择 (启用) C5 (通道 5) (如果还没有启用)。
- 把输入直接连接到示波器通道 5 上<sup>7</sup>，经电缆连接示波器前面板上的“TDR Clock OUT” SMA。参见图 8。

<sup>7</sup> 直接：应没有 DC 模块、没有分路器或“T”拾拾装置。在需要时应使用 V 连接器 (即 1.85mm 连接器) 到 K/SMA 适配器；参见“图 8. 垂直校准的系统设置，步骤 A”，参见第 5 页附录。

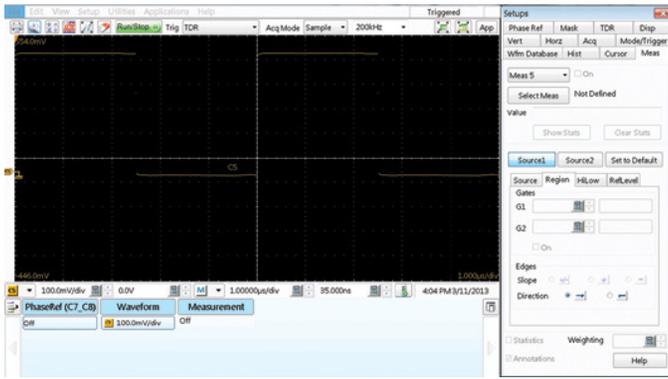


图 7. 经过衰减器的 TDR 时钟输出信号。

■ 屏幕应显示一个方波，如图 7 所示。

■ 视衰减因数和采样模块，可能需要使用垂直偏置，把信号完全移到模块的幅度范围内，即：

Setups->Vertical->Channel: Offset (在 C5 上)：设置成 200 mV

把阶跃信号的 Meas1 of the Amplitude 测量设置在上升时间周围：

Setups->Meas->Signal Type: Pulse

Setups->Meas->Source: C5

Setups->Meas->Pulse Amplitude: Amplitude

Setups->Meas->Meas1: 勾选 On(示波器作为 Meas1 创建这一设置)。

Setups->Meas->Region: On

Setups->Meas->Region: Gates G1: 46%

Setups->Meas->Region: Gates G1: 54%

Setups->Meas->Annotations: On；观察脉冲幅度测量数据。

注：由于 DC 模块可能会对信号的置平部分产生影响，我们将只使用上升时间周围的一个短窗口。

注意(记下)报告的幅度为 Meas1，如 496.2 mV；这是参考的幅度。

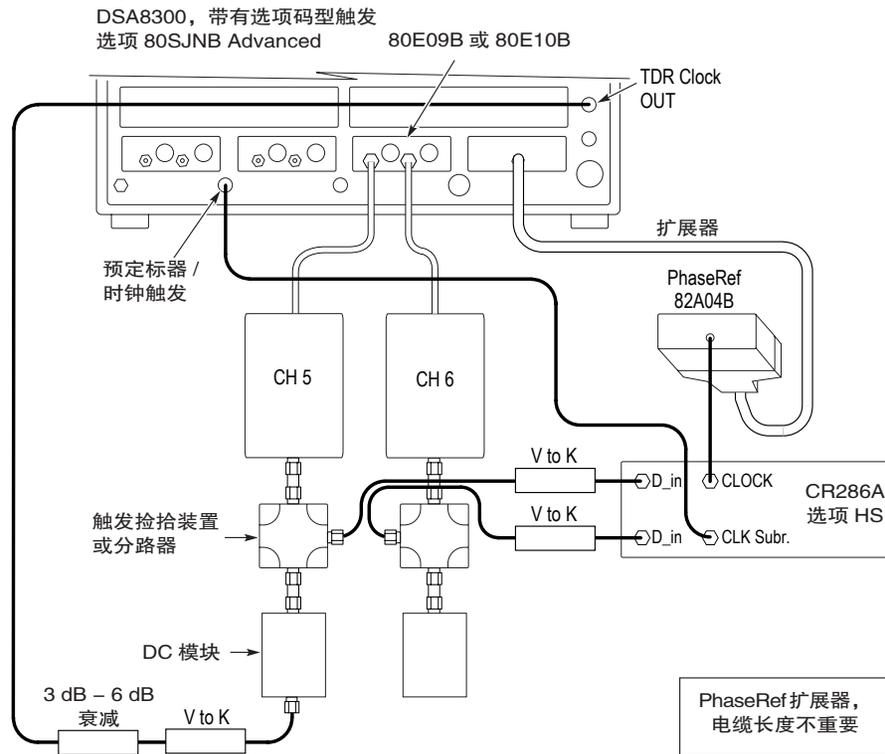


图 8. 垂直校准的系统设置，步骤 C。

### 9.3.3 垂直校准，CH5，步骤 C：测量表现幅度

- 使用 DC 模块 ( 在使用 DC 模块时 ) 或触发拾拾装置 T ( 在使用触发拾拾装置 T 时 ) 连接示波器的 C5，如图 8 所示。

Setups->Vertical->Channel: Offset ( 在 C5 上 )：设置成 0 V ( 如果以前的设置偏离 0 V )。

再次注意 ( 记下 ) 幅度报告为 Meas1，如 398.4 mV，这次之所以较小，是因为分路器及可能 DC 模块中的损耗。这是表现幅度，其中包括所有损耗。

注意方波在高电平和低电平时可能有明显的斜坡，这与 DC 模块中的电容器尺寸有关，视使用的 DC 模块不同而不同。( 本图摘自部件清单中提到的 Marki DC 模块 )。

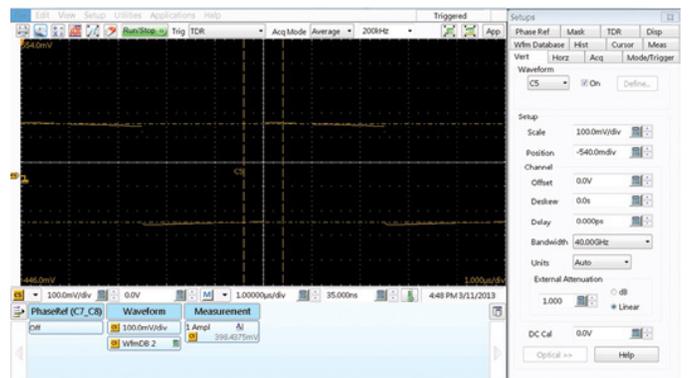


图 9. 经过 DC 模块的 TDR 时钟输出信号。

### 9.3.4 垂直校准, CH5, 步骤 D: 设置外部衰减因数

- 计算增益校正因数: =  
< 幅度参考 TDR 时钟输出 > / < 表现幅度 TDR 时钟输出 >, 如 1.245 [-]。

这是 C5 增益的校正因数。把校正因数改写成 C5 垂直衰减校正, 如下:

- Setups->Vertical (C5) ->External Attenuation (Linear): < 增益校正因数 >。
- C5 的垂直增益校准结束。

### 9.3.5 垂直校准, C6, 步骤 B、C、D:

- 对 C6, 重复上述步骤。
- C6 的垂直增益校准结束。
- 保留记下的外部衰减值。
- 设置 Setups->Mode/Trigger->Trigger Source: Clock
- 把 Horizontal Scale 时间 / 格设置成 40 ps/div
- 确认 Oscilloscope Run/Stop 状态为 Run。
- 设置 Setups->Acq->Acquisition Mode: Sample
- C5 和 C6 垂直校准结束。保存设置, 继续校正相差。

## 9.4. 校正 C5 到 C6 相差

相差校正假设:

- 我们假设测量设备上应该已经以最优方式校正 DUT 信号的相差。
- 在步骤 A 到步骤 D 中, 我们并不是要测量相差校正, 而是要使用简单的程序优化测量设备输入, 这个程序能够容忍大的相差。
- 在相差小于  $1/2$  UI 时, 应采用 9.6 “C5 到 C6 相差校正: 步骤 E: 通过最大限度地减 DataDataDUTor DividerTrigger Pick-off cable lengths unimportantPhaseRef Extenders, 80E09B or 80E10BCLOCKCLK Subr.D\_inD\_inOpt. HSCR286ADC blocksCH 6Opt. 80SJNB AdvancedOpt. Pattern TriggerDSA8300 withPhaseRef82A04BExtender(s)V to KV to KClock TriggerPrescaler / CH 5 少眼图交点之间的间隔, 提炼相差校正” 中给出的方法, 以获得最优结果。另请参阅相差校正注释 3。

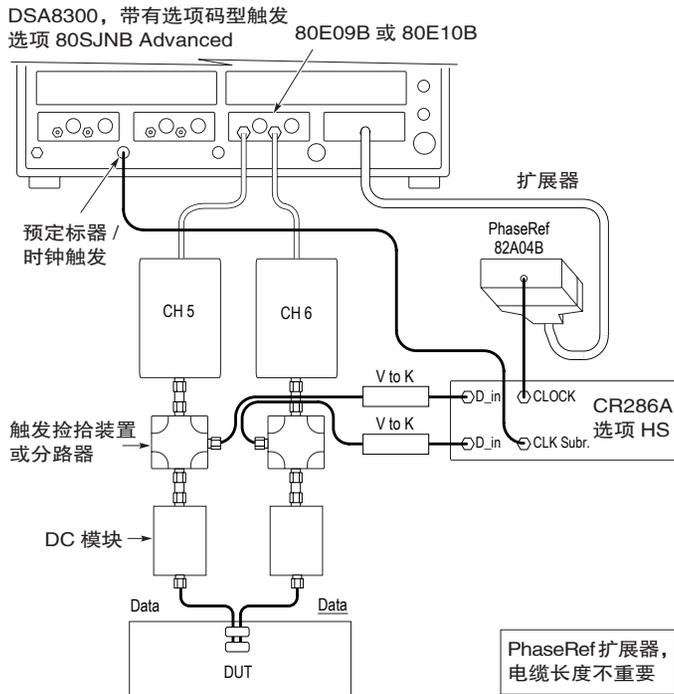


图 10. 系统互连方框图。

#### 9.4.1 步骤 A: 设置

根据 DUT 的信号测量，把示波器连接到 DUT 上：

- 在 DUT 上：
  - 启用 DUT 输出，进行标准操作。
  - 设置 DUT，生成一个短码型（如 PRBS9）。
- 在示波器上：
  - 执行 Setups→Mode/Trigger→Trigger Source: Clock Clock/ Prescale
  - 选择（启用）C6（通道 6），关闭任何其它通道。
  - Setup→Acq→Acquisition Mode: Sample
  - Setup→Disp→Style: 反选 Show Vectors
  - 在 Setups→Meas, 对所有测量反点 On
  - 把水平时间 / 格设置成大约 1 UI/div（如对 25Gb/s 为 40 ps）
  - 设置 Setup→Horz→ Record Length → 1000 [S( 样点 )]
  - 打开 Utilities→Autoset Properties: 反选 Options: Horizontal, 点击 Autoset。关闭 Autoset Properties。
  - 确认 Oscilloscope Run/Stop 状态为 Run。

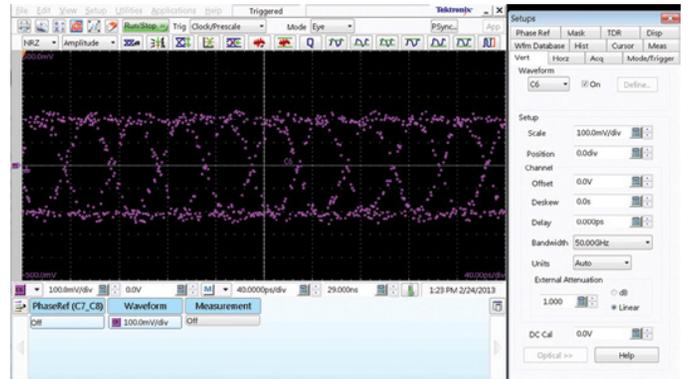


图 11. 自动设置眼图，矢量关闭。（本图中加强了样点）

观察屏幕上出现朦胧可见的眼图。如果没有，手动调整 C6 V/div、Vertical Position 和 Vertical Offset，在屏幕中间获得一条轨迹。参见图 11。

选择 Setups→Vert→Waveform: C5

如果遵守的标准对电接口采集要求某个带宽（如 40 GHz Bessel-Thompson 滤波器），相应地设置带宽；如对 100GBASE-KR4 背板以太网：

- 设置 Setup→Vert (Waveform C6): 带宽设置为 40 GHz。对 C5 设置相同带宽；
- 设置 Setup→Vert (Waveform C5): 带宽设置为 40 GHz。
- 确认 C5 和 C6 都有第 9.3 步“Vertical Calibration”确定的正确的外部衰减。

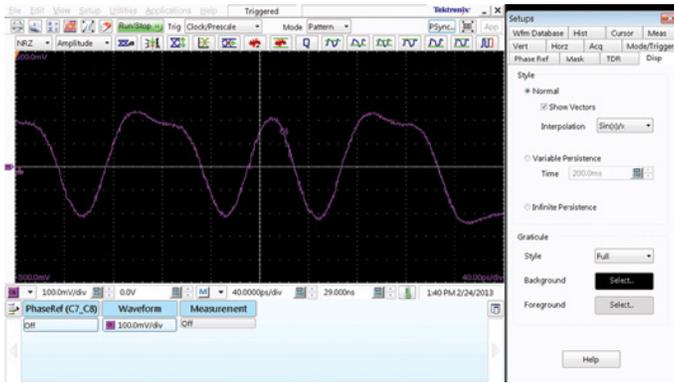


图 12. 在实现码型同步后。

#### 9.4.2 步骤 B: 触发码型

打开 Pattern Sync 对话框 ( 工具条右上方; 或在 Setups->Mode/Trigger 中 )。

反点 “Data Rate”, 填入 Data Rate ( 如 25.781Gb/s)。

点击 “AutoSync to Selected Waveform。”

Setup->Disp->Style: 选中 Show Vectors

如果不存在类似于图 12 的轨迹, 那么应检查设置。

启用 C6。

选择 Setups->Vert->Waveform: C6

如上面 C5 一样, 设置垂直带宽。

打开 Utilities->Autoset Properties

点击 Mode: Period, 反选 Horizontal, 点击 Autoset ( 所有均在 Autoset Properties 中 )。关闭 Autoset Properties。

观察 C5 和 C6 同时显示在屏幕中间, 没有削波。

这两个信号的幅度应该类似, 否则, 应调试到 DUT 的互连。

屏幕位置应能够看到多个过零点。

另一种方案: 放慢时间 / 格, 以便码型中最长的运行长度不超过屏幕的 1/3, 即如果码型为 PRBS9, 那么最长的运行长度是 9 位; 如果 UI 是 40 ps, 那么最长的记录长度时长为  $40^*9 \rightarrow 360$  ps。把时间 / 格设置成  $3^*360/10$ , 即约为 110 ps/div)。

定义数学运算:  $M2:=C5+C6$

观察到共模波形为白色轨迹。

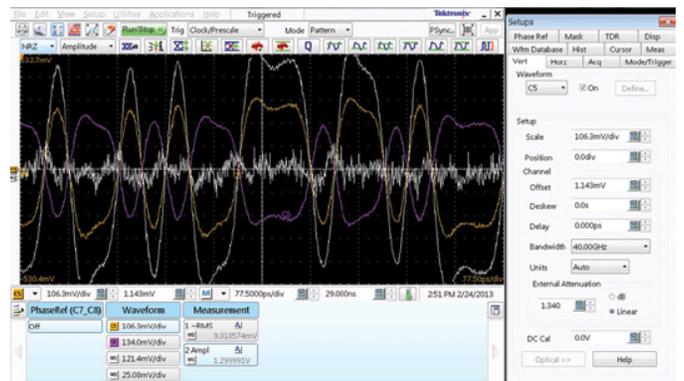


图 13. 校正相差后的信号实例。注意已经填充外部衰减和延迟值。

#### 9.4.3 C5 到 C6 相差校正: 步骤 C: 相差校正

设置 Meas1, 测量共模信号的 AC RMS 电平:

Setups->Meas->Signal Type: Pulse

Setups->Meas->Source: M2

Setups->Meas->Pulse Amplitude: AC RMS

Setups->Meas->Meas1: 勾选 On ( 示波器作为 Meas1 创建这一项)。

选择 Setups->Vert->Waveform: C6

调节 Channel: Delay, 使 M2 ( 白色轨迹 ) 的长度最小。使用前面板上的 Fine 按钮以及 Front Panel 旋钮, 或在 Delay 窗口中输入数值。

另一种方案: 调节 Channel: Delay, 使 Meas1 (Math2 的 AC RMS) 的值达到最小。

定义数学运算:  $M1:=C5-C6$

观察校正相差后的差分信号。在需要时调节 M1 V/div。

另外: 参阅相差校正说明, 确定相差校正质量。如果需要, 启用差分信号幅度测量:

Setups->Meas->Signal Type: Pulse

Setups->Meas->Source: M1

Setups->Meas->Pulse Amplitude: Amplitude

Setups->Meas->Meas2: 勾选 On

### 9.4.4 C5 到 C6 相差校正：步骤 D

删除 M2 (Math2)，删除 C5。

在 Setups->Meas 中，对所有测量反点 On。

存储设置 (File->Save Setup As...)，以备以后调用；这一程序使用名称 “VertCalAndDeskew.stp”。

查阅相差校正说明 3 和第 9.6 步。如果不需要第 9.6 步，相差校正过程结束。

## 9.5. 相差校正说明

### 9.5.1 相差校正说明 1

DSA8300 提供了两种相差校正机制：

- 软件相差校正 (在 Setups->Vert-> Channel: Deskew 中) 和
- 硬件相差校正 (在 Setups->Vert-> Channel: Delay 中)。

除 TDR 操作外，不要使用 Setups->Vert-> Channel: Deskew。

### 9.5.2 相差校正说明 2

在校正相差时，共模噪声低的干净的系统一般共模 AC RMS 低于差分幅度的 2%，即  $\text{Amplitude}(C5-C6) > 50 * \text{AC\_RMS}(C5+C6)$ 。

### 9.5.3 相差校正说明 3

在前面的程序中，我们通过最大限度地降低共模波形的能量，实现了相差校正。这种方法对大的相差灵敏度较低，但可以提供多个最小值。另一种方法是最大限度地降低眼图交点到眼图交点<sup>8</sup>的延迟，参见 9.6 节。这种方法不能用于大的初始相差，但如果初始相差小于 1/2 UI，那么它可以提供最佳效果。因此，通过顺序遵循两个程序，可以获得最佳效果。明智的用户可以只选择一个程序或只选择另一个程序，具体视需求或手边的设置而定。

<sup>8</sup> 在 25 Gb/s 之类的高速下，通过最大限度地降低边沿到边沿延迟来校正相差的可靠性较差，因为不同的边沿经常会表现出不同的相差。

## 9.6. C5 到 C6 相差校正：步骤 E：最大限度地减少眼图交点之间的间隔，提炼相差校正

这是最大限度地减少眼图交点到眼图交点延迟的相差校正精调程序。

选择 ( 启用 ) C5 (Channel 5)。

设置 Setups->Horz-> Bit Rate 到 DUT 的位速率 ( 如 25.781 Gb/s)

设置 Setups->Horz-> Record Length > 1000 [S( 样点 )]

Setups->Mode/Trigger->Scope Mode: Eye

Setups->Wfm Database:

- 选择 Source: C5, 勾选 Display<sup>9</sup>; 勾选 Persistence Variable, Waveforms 500, Display Option: 勾选 Intensity
- 确认 Oscilloscope Run/Stop 状态为 Run。
- Autoset

观察屏幕略微跨越 1 个以上的 UI, 可以看到 1 个眼图以上的时长; 在需要时, 校正任何设置。

选择 ( 启用 ) C6 ( 通道 6)。

Setups->Wfm Database:

- 选择 Source: C6, 勾选 Display<sup>9</sup>; 勾选 Persistence Variable, Waveforms 500
- Autoset

观察屏幕同时显示两个眼图。

设置 C5 眼图交点与 C6 眼图交点之间的延迟测量:

Setups->Meas->Signal Type: NRZ

Setups->Meas->Source: C5 on Main

Setups->Meas->NRZ Timing: Delay

Setups->Meas->Meas1: 勾选 On

Setups->Meas->Source2

Setups->Meas->Source2: C6 on Main

Setups->Meas->Source1

调节水平位置, 使 C5 和 C6 上的交点至少距屏幕左边边沿一格。

C5 和 C6 之间的相差报告为 Meas1。

选择 Setups->Vert->Waveform: C6

调节 Channel: Delay, 最大限度地降低 Meas1 的长度。使用前面板 Fine 按钮和 Front Panel 旋钮, 或在 Delay 窗口中输入数值。确认 Delay 值变化远远低于 1/4 UI。

删除 C5, 删除 C6,

在 Setups->Meas 中, 对所有测量, 反点 On。

在 Setups->Wfm Database 中:

Database WfmDB<1> 到 <4>: 反选 On

存储设置 (File->Save Setup As...), 以备日后调用; 这个程序使用名称 “VertCalAndDeskew.stp” 。

相差校正过程结束。

<sup>9</sup> 如果通道已经使用波形数据库, 应找到连接到通道上的是哪个数据库, 并使用这个数据库。

## 10. 测量

### 10.1. 执行基本系统测量

调用 VertCalAndDeskew.stp 设置 (File->Recall Setup)

观察要进行相差校正的波形 (C6 “Delay” 在上面的相差校正程序中确定)。

确认已经设置 C5 和 C6 的外部衰减。

除 M1 外, 使所有通道失效。

清除所有测量。

Setups->Mode/Trigger->Scope Mode: Eye

设置 Setups->Horz-> Record Length > 1000 [S( 样点 )]

Setups->Wfm Database:

- 勾选 Display; 勾选 Persistence Variable, Waveforms 500, Display Option: 勾选 Color
- 调用一个模板, 如 100GBASE-ER<sup>10</sup>。
- 选择 Setups->Mask->Source: M1 on Main
- 点击 Autoset
- 看到一个眼图, 类似于图 14。

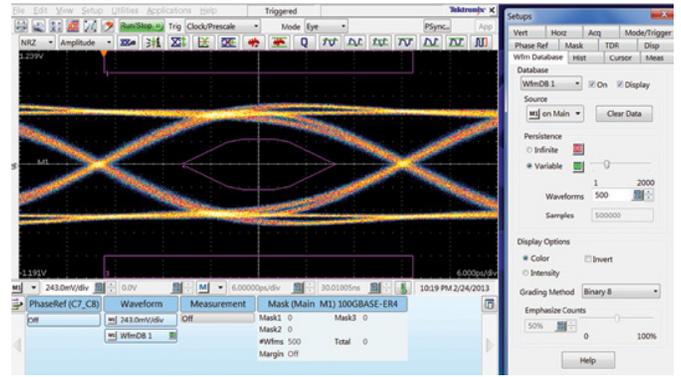


图 14. 眼图视图。

<sup>10</sup> 本例是 25.781 Gb/s 的光学模板。对许多电接口测试 (如对 100GBASE-KR4), 没有眼图模板测试, 在这种情况下, 应把 Setups->Horz-> Bit Rate 设置成 DUT 的位速率 (如 25.781 Gb/s)。

如果需要实用模板, 且在采样示波器的 Mask 菜单中没有, 那么可以从泰克获得相应模板的模板文件。使用 File->Import Custom Mask 加载模板文件, 使用 Setups->Mask->File Based/Customs 启用模板文件。

## 10.2. 执行抖动分析

### 10.2.1 设置示波器

调用 VertCalAndDeskew.stp setup<sup>11</sup> (File->Recall Setup).

观察要进行相差校正的波形

确认已经设置 C5 和 C6 的外部衰减。

除 M1 外, 使所有通道失效。

清除所有测量。

### 10.2.2 启动 80SJNB

选择 Applications->80SJNB ( 或 80SJNB Advanced, 如果列出该项目 )

在 80SJNB 启动时 ( 应立即出现一个飞溅屏幕, 工具本身启动时间不到 1 分钟 ), 选择 80SJNB Setup->Acquisition, 或最右面的工具条按钮 Acquisition; 将打开一个 Acquisition 窗格。

在 Acquisition 窗格中 ( 参见图 15 80SJNB 设置 ), 选择:

- Signal Source MATH1:C5-C6; 然后选择 AutoSync to Selected Source。
- Data Pattern: Rate and Data Pattern: 码型长度应使用示波器的值预先填充; 如果没有, 手动输入数值。
- 选择与主机中 82A04 或 82A04B 位置相关的相位参考源。
- 选择相位参考频率, 输入相位参考时钟的频率。

注: 对 14.1 GHz 以上的频率, CRU CR286C 和 CRU CR175 都生成 1/2 时钟 ( 即对 25.781 Gb/s 数据速率, CRU 的主时钟输出是 12.8905 GHz )。

因此, 如果位速率是 25.781 Gb/s, 那么相位参考频率应设置成 12.8905 GHz。

对任何测量难题, 使 Phase Reference 失效, 确认 80SJNB 抖动分析正确运行; 如果正确运行, 那么在示波器环境中 ( 不要在 80SJNB 环境中 ) 调试相位参考。

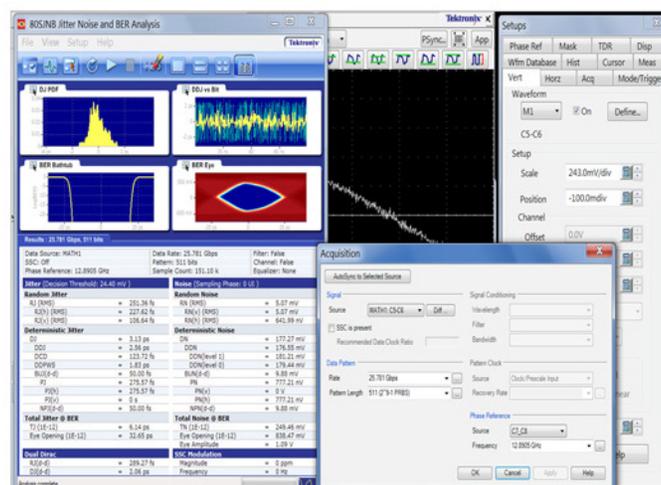


图 15. 80SJNB 设置。

<sup>11</sup> 根据上面“9. 垂直校准和相差校正”程序, 设置存储了已经校正相差及垂直校准的 C5 和 C6, 定义了差分波形 M1:=C5-C6。

**泰克科技(中国)有限公司**  
上海市浦东新区川桥路1227号  
邮编: 201206  
电话: (86 21) 5031 2000  
传真: (86 21) 5899 3156

**泰克北京办事处**  
北京市海淀区花园路4号  
通恒大厦1楼101室  
邮编: 100088  
电话: (86 10) 5795 0700  
传真: (86 10) 6235 1236

**泰克上海办事处**  
上海市徐汇区宜山路900号  
科技大楼C楼7楼  
邮编: 200233  
电话: (86 21) 3397 0800  
传真: (86 21) 6289 7267

**泰克深圳办事处**  
深圳市福田区南园路68号  
上步大厦21层G/H/I/J室  
邮编: 518031  
电话: (86 755) 8246 0909  
传真: (86 755) 8246 1539

**泰克成都办事处**  
成都市锦江区三色路38号  
博瑞创意成都B座1604  
邮编: 610063  
电话: (86 28) 6530 4900  
传真: (86 28) 8527 0053

**泰克西安办事处**  
西安市二环南路西段88号  
老三届世纪星大厦26层C座  
邮编: 710065  
电话: (86 29) 8723 1794  
传真: (86 29) 8721 8549

**泰克武汉办事处**  
武汉市解放大道686号  
世贸广场1806室  
邮编: 430022  
电话: (86 27) 8781 2760/2831

**泰克香港办事处**  
香港九龙尖沙咀弥敦道132号  
美丽华大厦808-809室  
电话: (852) 2585 6688  
传真: (852) 2598 6260

**如需进一步信息**

泰克维护着完善的由应用指南、技术简介和其它资源组成的资料库, 并不断扩大, 帮助工程师走在技术发展前沿。详情请访问 [www.tektronix.com.cn](http://www.tektronix.com.cn)。

© 2013 年泰克公司版权所有, 侵权必究。泰克产品受美国专利和正在申请的美国专利和国外专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。本文中的技术数据和价格如有变更, 恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有其它商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

05/13 EA/WWW

86C-29118-0