

100 Gb/s 通信系统物理层测试应用指南

1. 引言

在过去十年中，大量的带宽密集型应用迅猛增长。影视点播、IP 语音、云计算和存储技术对带宽的胃口非常大，这些技术推动了 100 Gb/s 技术的部署。

高速串行(HSS)技术的强大动力、其抗噪声差分信令及抗抖动嵌入式时钟、外加眼图闭合均衡功能，在以前想象不到的印刷电路板(PCB)长度上实现了 25+ Gb/s 的速率。把多条并行的 HSS 链路结合在一起，简化了把 100G 信号传输到光接口收发机的过程，可以简便地连接到光纤骨干上。其结果，许多数据通信技术和电信技术正在使用 100 Gb 以太网(100 GbE)传输信号，包括 SAS、Infiniband、乃至光纤通道，其甚至正在替代古老的 SONET/SDH。

业内正在争相部署 100G 技术，但在 25+ Gb/s 速率下整个行业的经验不足，因此更需要了解波形与数字信号误码率(BER)的关系。比如，25 Gb/s 下的位周期是 40 ps，抖动预算几乎消失，<3 ps 的随机抖动使眼图闭合，新兴标准允许的 RJ 一般低于 700 fs。

本应用指南涵盖了装配 100G 系统必需的发射机和接收机测试。由于每种 25+ Gb/s HSS 技术都有共同的主题，因此我们将考察 100 GbE 一致性测试要求，同时指出其它高速系统(如光纤通道的 32GFEC)之间的差异。在 100 GbE 规范存在空白时，如在 25-28 Gb/s 电接口信令中，我们将采用光学互通论坛公共电接口实现协议(OIF-CEI)。

在执行测试时，我们将遇到抖动、噪声和串扰相互影响等常见问题。在介绍一致性测试后，我们将提供测试建议，以帮助诊断不满足标准的元器件和系统，测量性能余量。

标准	几何形状	距离	数据速率	BER	
100 GbE	100GBASE-LR4	4条单模光纤	10 km	4x25.78125 Gb/s	$\leq 10^{-12}$
	100GBASE-ER4	4条单模光纤	40 km	4x25.78125 Gb/s	$\leq 10^{-12}$
	100GBASE-SR4*	4条多模光纤	≤ 10 m	4x25.78125 Gb/s	$\leq 10^{-12}$
	100GBASE-CR4* 100GBASE-KR4*	4条电缆 背板	*	*	$\leq 10^{-12}$
OIF-CEI	OIF-28G-SR	PCB上N条	30 cm	19.90-28.05 Gb/s	$\leq 10^{-15}$
	OIF-28G-VSR*	轨迹	15* cm	19.90-28.05 Gb/s	$\leq 10^{-15}$
光纤通道	32GFC	N通道光接口和电接口	TBA*	28.05* Gb/s	$\leq 10^{-12}$ *

表1. 新兴标准汇总(带有*的标准还没有发表，数值是推测值)。

2. 新兴的 100 Gb/s 和相关标准

许多标准建议执行测试，以保证元器件的互操作能力。在本节中，我们将概括这些技术规范，参见表 1。一定要记住，大多数标准还没有出版，我们引用的数字应视为预计的典型值，但在进行一致性测试时，应检查实际标准中的具体数值！

技术规范一般是以类似于法律的工程术语编写的，因此我们编写了这一指南，作为辅助资料，阐明测试本身、测试的作用以及怎样执行测试。

在电气方面，这些技术一般拥有以下特点：均衡性、单向、100 欧姆、差分信令并采用嵌入式时钟、低压摆幅、非归零(NRZ)信号、多条通道。

由于同一术语在不同规范之间有不同叫法，因此我们首先要明确可能产生的误解。在本文中，我们要区分数据速率和净荷速率：数据速率是指原始数据传播的速率；净荷数据不包括纠错和编码开销，因此净荷速率 \leq 数据速率。由于我们只讨论 NRZ 信令，因此我们使用 Gb/s 而不是 Gbaud，并把“符号”和“位”(或码)视为相同的术语。

2.1. 100 GbE – IEEE Std 802.3ba

我们考察两个已经确定的 100 GbE 光传输规范，参见表一。IEEE Std 802.3ba 标准包括这两个规范：远距离光传输规范 100GBASE-LR4，扩展距离光传输规范 100GBASE-ER4。这两种规范之间的区别主要在接收端。与 LR4 接收机相比，ER4 接收机的灵敏度更高，必须能够通过更难的压力容限测试。

在本应用指南编写时，短距离传输规范 100GBASE-SR4、4 \times 25 Gb/s 低成本多模(MM)标准及通过电缆和背板传输的电接口标准 100GBASE-CR4 和 100GBASE-KR4 都正在开发之中。在这些规范完成时，100GBASE 规范将提供一套完整的光学互连系统。

图 1. 2000 年与 2015 年光传输收入比较(图片版权：2012 年 Heavy Reading 版权所有)。

The Shifting Trends in Optical Spend

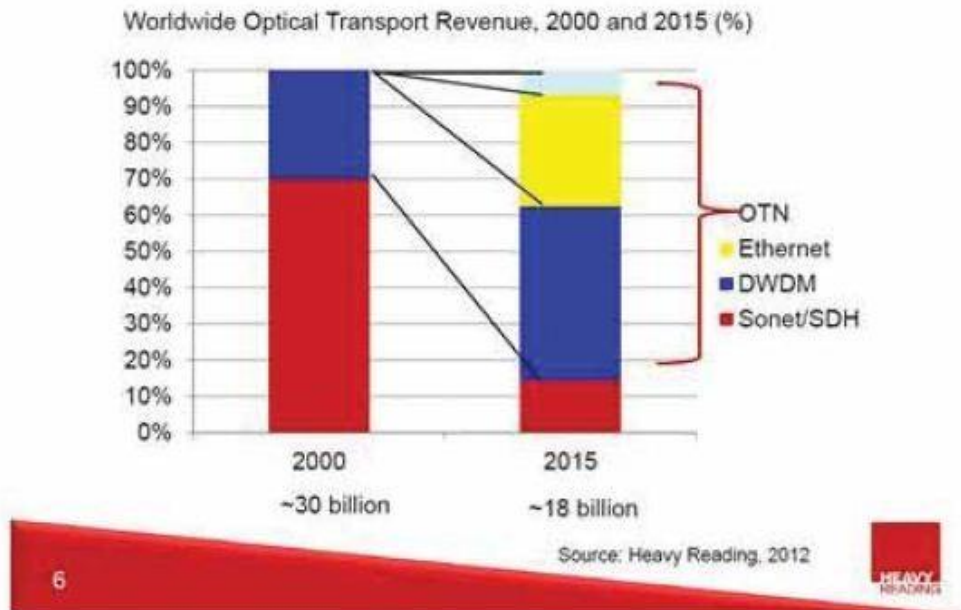


Figure 1. Comparison of optical transport revenue from 2000 and 2015 (graphic Copyright 2012, Heavy Reading).

[图示内容：]

The Shifting Trends in Optical Spend: 光学开支转移趋势

Worldwide Optical Transport Revenue, 2000 and 2015 (%): 全球光学传输收入，2000年和2015年(%)

OTN Ethernet: OTN 以太网

30 billion: 300 亿

18 billion: 180 亿

Source: Heavy Reading, 2012: 资料来源: Heavy Reading, 2012 年

SONET/SDH

在过去十年中，以太网已经成为所有网络的首选技术，包括数据通信网络和电信网络。图 1 预测到 2015 年，SONET/SDH 在光学传输收入中的占比将从 70% 下跌到不到 15%。

2.2. 100 OIF CEI

OIF-CEI 实现协议(IAs)没有像 IEEE 的 802.3ba 100 GbE 或光纤通道规范那样规定一致性测试。相反,其重点放在了信息性测试和标准化测试上,试图保证元器件在不同标准之间的互操作能力。从某种意义上来说,“标准化”测试与一致性测试类似,委员会规定标准化测试的目是保证互操作能力;而“信息化”测试则是推荐性的,以更深入地了解性能和余量。在本指南中,我们摘录了两个 OIF-CEI IA, 参见表 1。

短距离 IA、OIF-28G-SR 在 300 mm 的 PCB 上由 19.90-28.05 Gb/s 差分对的多条通路组成,最多有一条连接在 BER < 10⁻¹⁵ 下工作。

超短距离 IA、OIF-28G-VSR 还没有出版,但我们摘取了初步版本中的指引信息。它由 19.60-28.05 Gb/s 的多条电通路组成,用来在 Serdes (在 IA 中叫作主机)和收发机(在 IA 中叫作模块)之间传送信号。Serdes 和收发机可以相距大约 100 mm 的 PCB 到连接器距离,外加 50 mm 左右的传导轨迹;系统的工作 BER 必须 < 10⁻¹⁵。

2.3. 光纤通道 32GFC

高速率光纤通道标准 32GFC 的数据速率为 28.05 Gb/s。32GFC 实现了 28.05 Gb/s 技术,之所以出现这种名称上的混淆,是因为每一代技术的名称都希望表示净荷速率(而不是数据速率)比上一代技术翻了一番。这一混淆始于从 8GFC 转向 16GFC 时开销大幅度下降,数据速率从 8.5 Gb/s 提高到 14.025 Gb/s,但净荷速率从 6.4 Gb/s 翻番到 12.8 Gb/s。32GFC 的净荷速率是 25.6 Gb/s,是 16GFC 的两倍;而数据速率是 28.05 Gb/s,远远低于 32GFC 缩写暗示的速率。

在本指南编写时,32GFC 还没有出版,初步版本的参考值很少。

图 2. 图 a) 4×25 Gb/s 100G Serdes-收发机 WDM 光学系统,图(b) 4×25 Gb/s 100G Serdes-收发机光学系统,图(c) 4×25 Gb/s 100G Serdes 到 Serdes 电接口系统。图中没有显示对称返回路径。

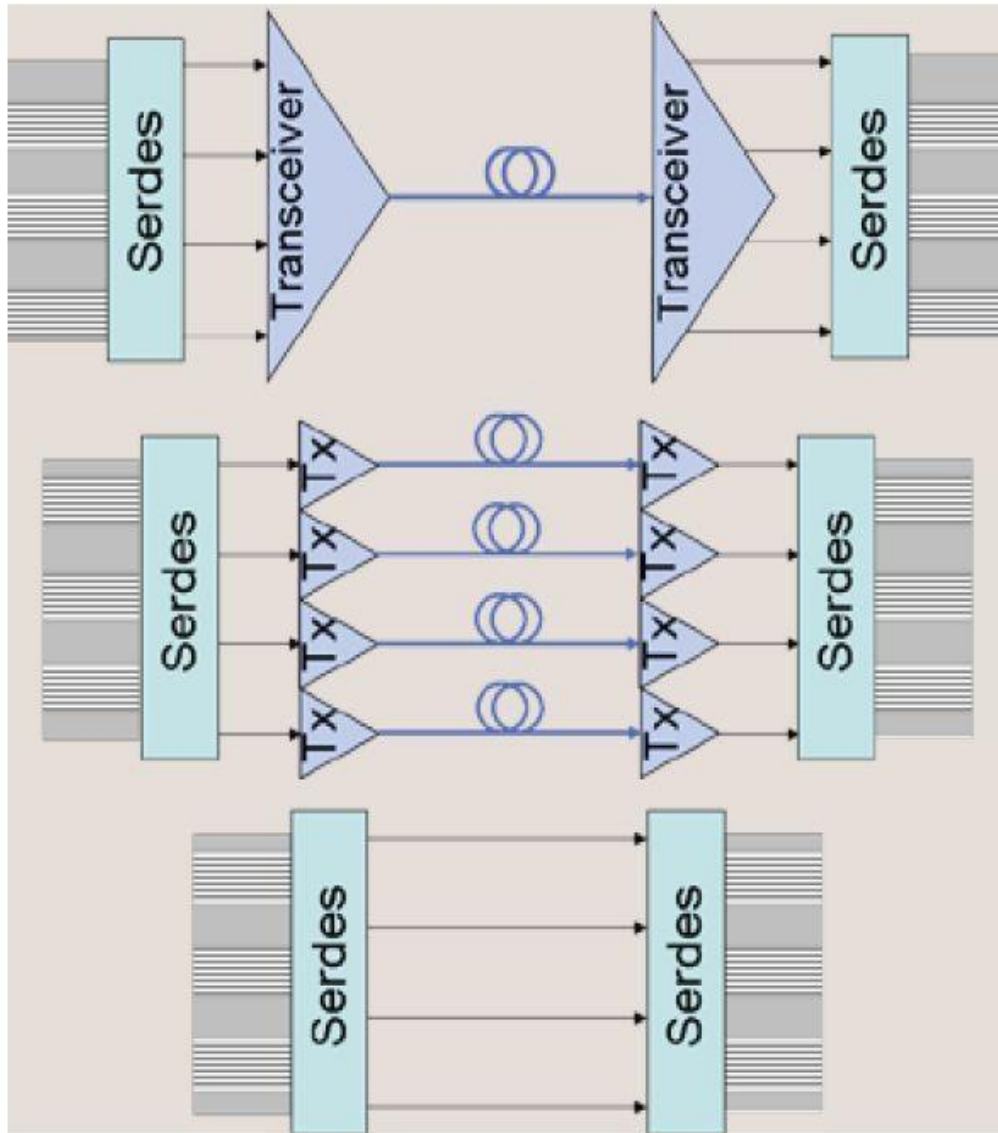


Figure 2. Diagram of (a) 4x25 Gb/s 100G Serdes-Transceiver WDM optical system, (b) 4x25 Gb/s 100G Serdes-Transceiver optical system, and (c) a 4x25 Gb/s 100G Serdes to Serdes electrical system. The figure does not show the symmetric return paths.

[图示内容：]

Transceiver: 收发机

3. 100G 系统测试

图 2 是典型的 100G 系统的构成部分图。Serdes 串行化信号，传送四个 25+ Gb/s 差分对。可以集成 Serdes，也可以每个输出包括多个不同组件。25+ Gb/s 电信号从 Serdes 传送到光接口收发机。收发机对信号再定时，在单模(SM)或多模(MM)光纤上传送光学版本信号。第二台收发机接收光信号，把信号转换成电信号，然后传送到另一个 Serdes 进行解串行化。纯电信号采用相同的方式，而没有收发机驱动的中间光学信号。

表2.测试码型。

测试码	
0x00ff方波	8位低, 8位高
PRBS9	511位
PRBS15	32,767位
PRBS31	2.1 Gbits
Scrambled idle(加扰空闲)	
OIF CID抖动容限码型	(72 CID位 + ≥10328来自PRBS31 + 种子) + 补数



不管是发射机测试还是接收机测试，不管是光接口还是电接口，我们都使用测试码型，把元器件的每个方面和系统的每个组件投入测试。伪随机二进制序列 (PRBS_n)是标准化的码型，拥有 n 位的每个置换。OIF CID 抖动容限码型旨在拥有 PRBS31 最激进的元素，外加连续相同(CID)位的 72 位序列，但采用的是可管理的长度。

泰克 BERTScope 误码率测试仪提供了 100G 通信使用的所有测试码型，包括 PRBS31、加扰空闲或相关的每个常用测试码型及用户设计的任何码型，长度最长 128 Mb。

图 3. 受到(a)同步串扰和(b)异步串扰影响的眼图

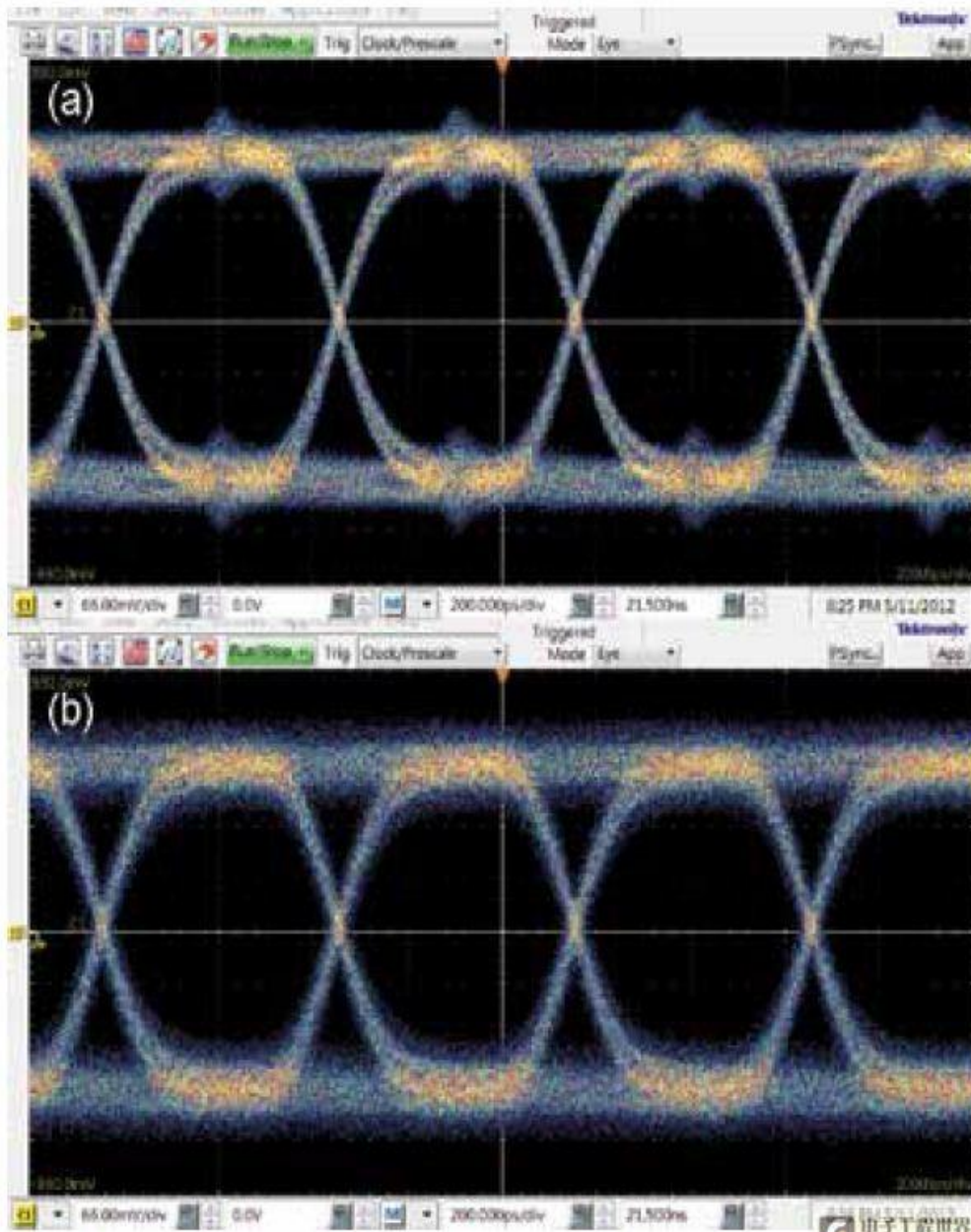


Figure 3. Victim eye diagrams for (a) synchronous and (b) asynchronous crosstalk.

所有发射机测试，包括电接口发射机和光接口发射机，都应在每条系统通道双向活动的情况下进行，以包括所有合理的串扰干扰源。为防止不切实际的数据相关干扰，串扰通道上的码型测试应不同于测试信号码型。如果每个汇总器不可能传送唯一的码型，至少应在码型之间引入足够的延迟，以便这些码型不会被同步。

基于多种原因，串扰通道还应该采用同步定时运行：首先，除特殊情况外，每条通道都有一个时钟，这个时钟从输入数据中独立恢复。在每个时钟以相同的标称速率运行时，它们既没有锁频，也没有锁相，也就是说，它们没有同步。第二，如图 3 所示，同步串扰的属性不同于同步串扰。每次在汇总器进行逻辑跳变

时，都会在测试信号眼图的相同区域发生同步串扰劣化。另一方面，同步串扰会导致随机定时劣化。

如果 Serdes 集成在拥有多个串行化输出的一块芯片上，您必须注意芯片间串扰。如果多个输出使用一个公共时钟定时，那么这些输出应该活动，与测试通道同步，每条通道应发送一个唯一的信号。

由于 PCB 的频响会损害高频成分，几厘米的 PCB 中多块 Serdes 芯片之间或 Serdes 和收发机之间的电信号要求进行信号调节：在发射机上预加重，在接收机上均衡。

加压的接收机容限测试旨在保证每台满足标准的接收机即使在最坏情况标准输入信号下，仍能在指定 BER 下工作。对 100 GbE IEEE 802.3ba 和光纤通道 32GFC，指定 BER 是 10⁻¹²；对 OIF-CEI，指定 BER 是 10⁻¹⁵

100 GbE光接口发射机建议摘要		
	100GBASE-LR4	100GBASE-ER4
平均发射功率	-4.3到4.5 dBm	-2.9到2.9 dBm
光调制幅度	-1.3到4.5 dBm	0.1到4.5 dBm
消光比	4 dB	8 dB

表3. 发射机建议摘要。



3.1. 光接口发射机测试

表 3 汇总了发射机建议。

图 4a 和图 4b 显示了 100GBASE-SR4 和 100GBASEER4 4×25 Gb/s 形状的 100 GbE 的光接口眼图。眼图模板中使用的归一化逻辑电平 0 和 1 使用眼图中央 0.2 UI 的下半部分和上半部分确定。

可以在 DSA8300 低噪声等效时间采样示波器或 BERTScope 上执行眼图模板测试。不管使用哪种设备，宽带宽光电接收机和时钟恢复单元都必不可少。时钟恢复-3 dB 带宽在不同技术规范之间是不同的，一般为 $f_{data}/1667$ ，CR286A 满足了这一要求。CR286A 是一种完全基于数字的二阶锁相环(PLL)模块，支持用户指定拐角频率，能够追踪直到 24 MHz 的抖动。

光电接收机应该使用四阶 Bessel-Thompson 滤波器，参考频率是数据速率的四分之三，即 $3/4 f_{data}$ 。其中没有包括滤波器，以提供标准光接口接收机的近似响应；但是，规范要求使用滤波器，以便不同的测试平台能够在统一的测量条件下运行。

图 4a. 低通 Bessel-Thompson 滤波器对加压眼图校准的影响。滚降频率成分超过 20 GHz。图片摘自 IEEE802.3ba 标准。

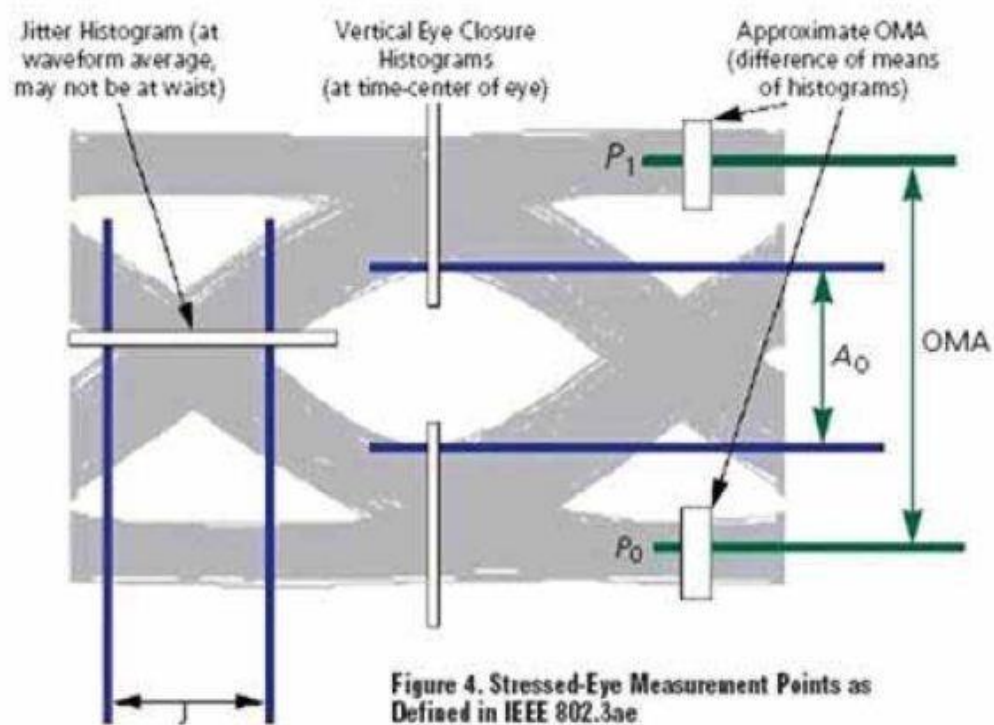


Figure 4a. Effect of low pass Bessel-Thompson filter on stressed eye calibration. Rolls off frequency content in excess of 20 GHz. Image courtesy of IEEE802.3ba standard.

[图示内容：]

Jitter Histogram (at waveform average, may not be at waist): 抖动直方图(在波形平均值处，可能不在腰部)

Vertical Eye Closure Histograms (at time-center of eye): 垂直眼图闭合直方图(在眼图的时间中心)

Approximate OMA (difference of means of histograms): 近似的 OMA (直方图平均值之差)

图 4b. BERTScope 上的 100GbE 眼图模板。

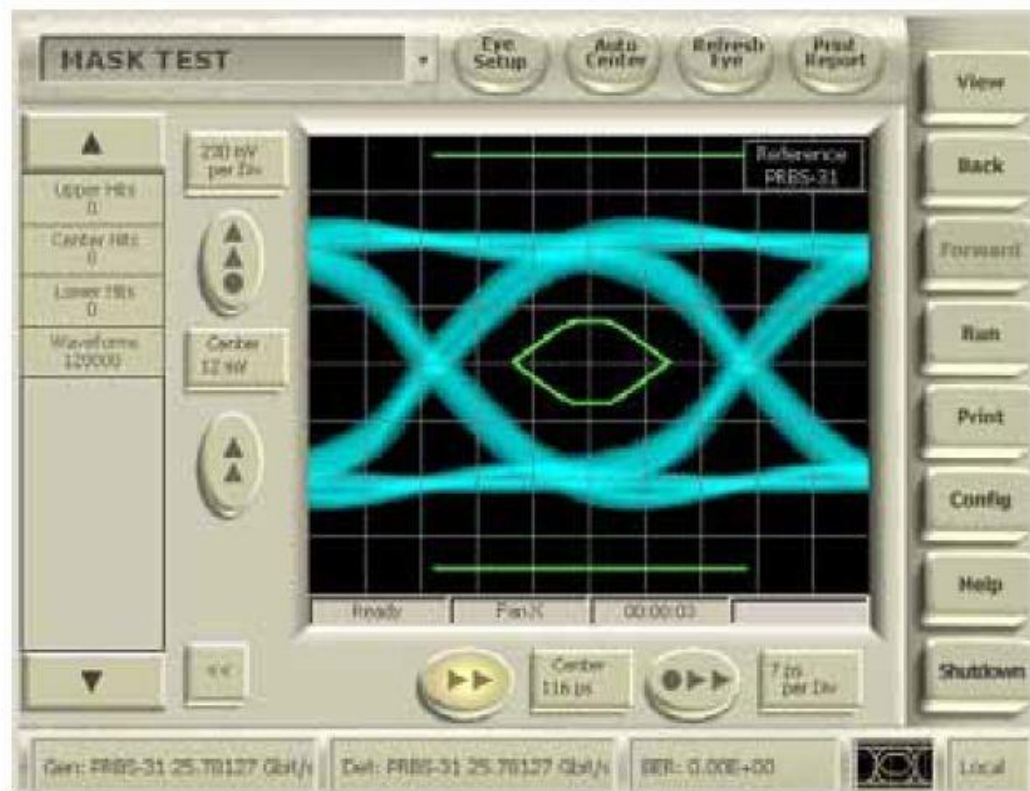
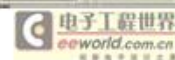


Figure 4b. 100GbE Eye Mask on a BERTScope.



通过要求最低“命中率”(hit ratio)，可以满足模板测试的随机特点。命中率定义为模板违规数量与每单位间隔采集的样点总数之比。由于这是一个统计指标，因此要注意，命中数越高，精度越高。

如果发射机的命中率低于 5×10^{-5} ，那么这台发射机是满足规范的。

也可以在 BERTScope 或配有 80SJNB 抖动和噪声分析软件的 DSA8300 上更简便地测量 BER 轮廓，而且在统计上更可靠。只要 $BER=10^{-6}$ 轮廓位于模板外面，那么图 5a 中的发射机会通过 5×10^{-5} 命中率眼图测试。BER 轮廓技术还可以更简便地查看发射机通过测试时的余量。如图 5b 所示，BERTScope 使用 BER 轮廓，评估信号的 J9 性能，并增加了余量性能(30 Gb/sec)。

图 5a. 使用 BER 轮廓进行眼图模板测试。 $BER=10^{-6}$ 轮廓，也就是外部黄色-橙色轮廓，对应 5×10^{-5} 命中率。

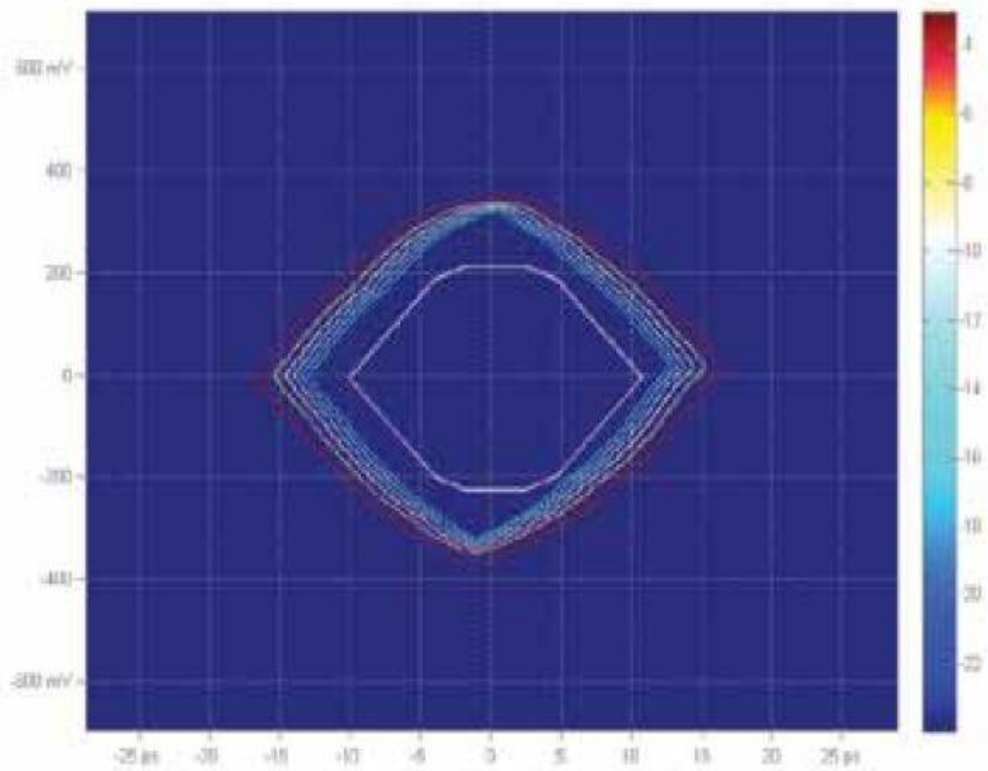


Figure 5a. Eye mask testing with BER contours. The BER= 10^{-6} contour, the outer yellow-orange contour, corresponds to a 5×10^{-5} hit ratio.



图 5b. BERTScope 使用 30 Gb/sec 信号获得的 J9 的 BER 轮廓。

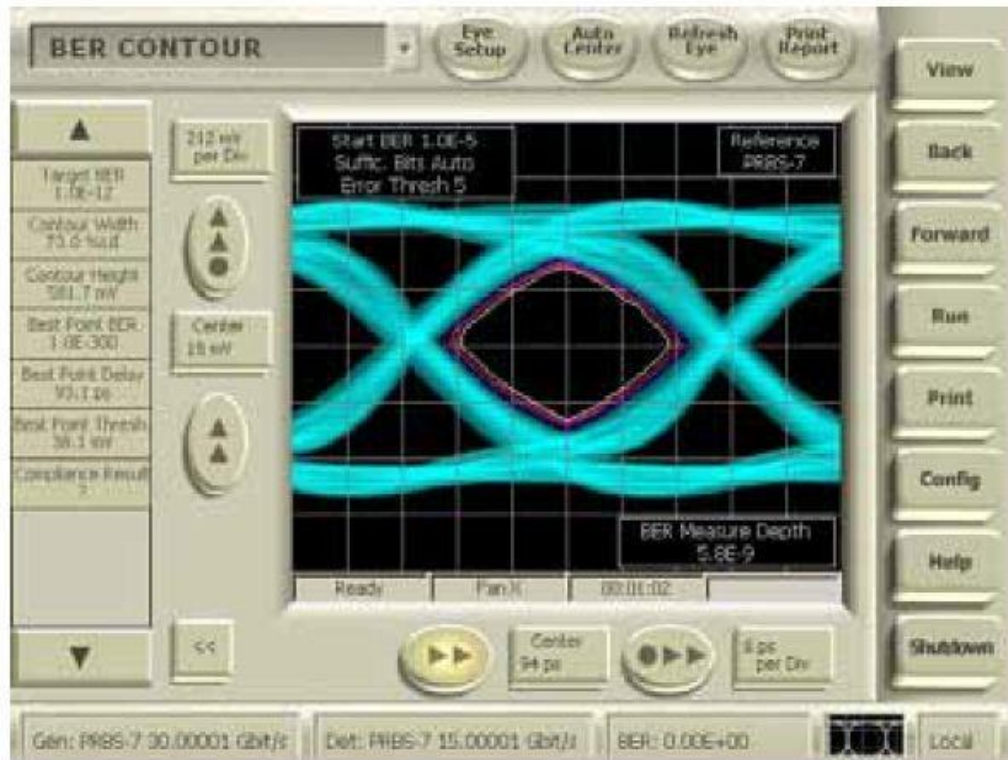


Figure 5b. BER Contour for J9 with BERTScope using a 30 Gb/sec signal. 

表 4. 100 GbE 加压接收机灵敏度测试条件汇总。所有压力装置的影响总和必须满足垂直眼图闭合及 J2 和 J9 抖动规范。

典型的100GbE加压光接口接收机容限测试条件 ^①			
	100GBASE-LR4 ^②	100GBASE-ER4 ^③	频率 ^④
平均接收功率 ^⑤	4.5到-10.6 dBm ^⑥	4.5到-20.9 dBm ^⑦	
正弦曲线抖动(SJ) ^⑧	超过滚降频率0.05, 参见图5 ^⑨		
正弦曲线干扰 ^⑩	加到J2和J9 ^⑪		0.1-2 GHz ^⑫
RJ ^⑬			
J2抖动 ^⑭	0.3 UI ^⑮		
J9抖动 ^⑯	0.47 UI ^⑰		

3.2. 光接口接收机测试

远距离和扩展距离 4×25 Gb/s 拓扑(100GBASE-LR4 和 100GBASE-ER4)的光接口接收机压力测试类似，但 ER4 要求更高的灵敏度和强健性，参见表 4。图 6 说明了怎样把校准后的压力水平施加到测试信号中，表 4 汇总了各种压力。在这些数据速率下，生成满足标准的压力水平非常棘手。通过选项 STR，BERTScope 可以使用内部损伤系统，生成满足标准的加压信号，把基于可调谐激光器的信号驱动到被测光接口接收机设备中(参见图 6)。

首先，配置 BERTScope 驱动 Mach-Zehnder (MZ)光调制器，然后调谐 MZ 偏置，优化 1/0 对称度，但不要超过表 4 中给出的光调制幅度(OMA)。

根据图 1 中的模板把正弦曲线抖动(SJ)应用到码型发生器时钟，保证接收机能够追踪低频抖动。

图 6. 直接来自 BERTScope 的正弦曲线干扰源驱动激光器进行光接口接收机测试。

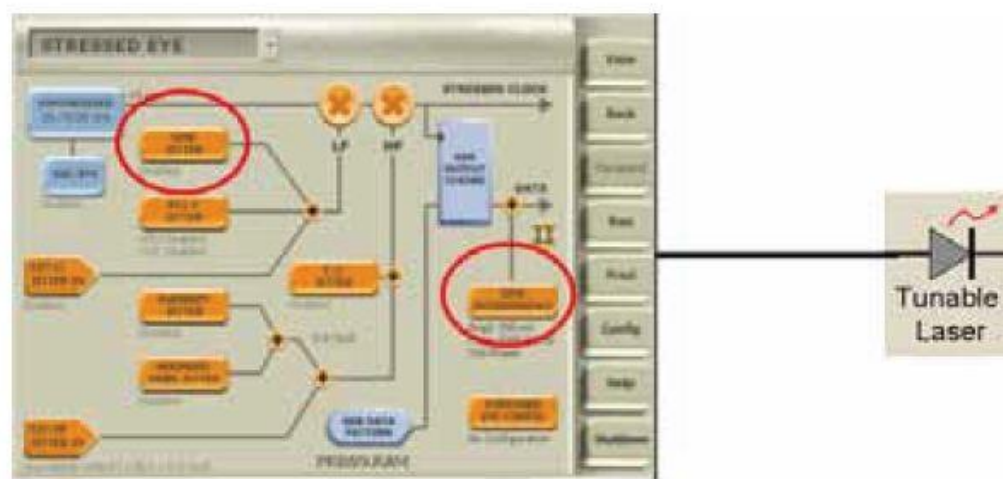


Figure 6. Sinusoidal Interferers directly from the BERTScope driving a laser for Optical Receiver Testing.

图 7. 正弦曲线抖动压力模板。

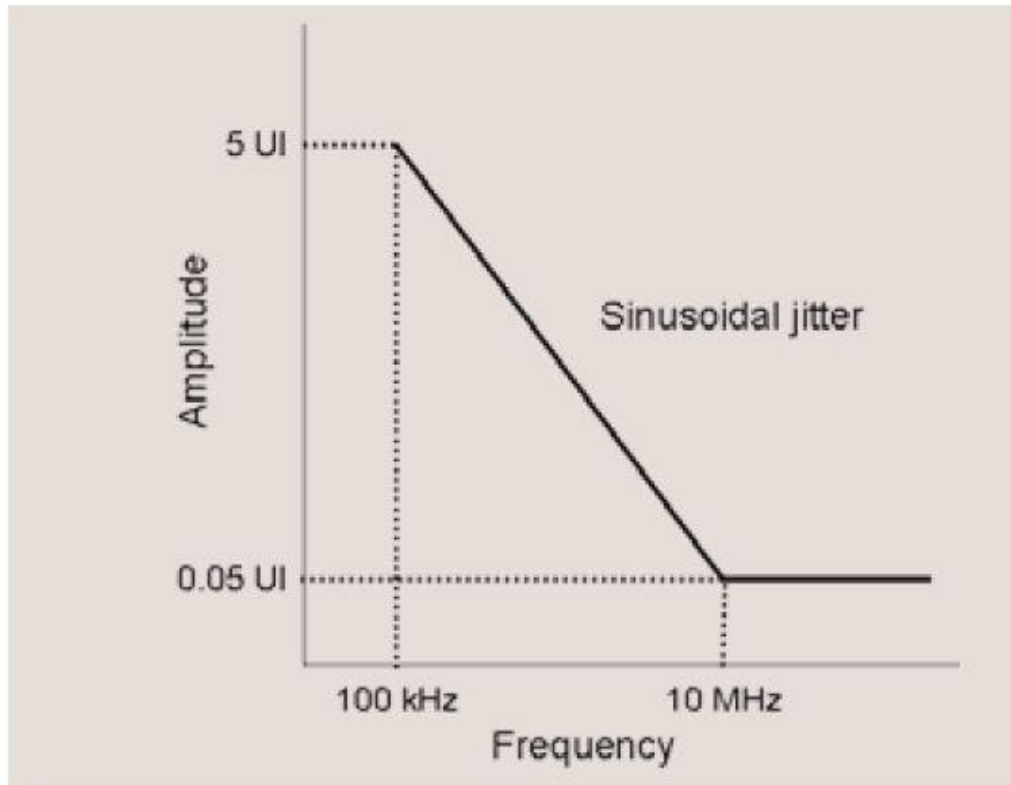


Figure 7. Sinusoidal Jitter stress template.

[图示内容:]

Amplitude: 幅度

Sinusoidal jitter: 正弦曲线抖动

Frequency: 频率

使用四阶 Bessel-Thompson 滤波器，生成符号间干扰(ISI)。根据 IEEE802.3ba 压力调节模块规定，这种 19 GHz 低通滤波器特点从测试发生器输出中去掉了高阶谐波，以便在测量垂直眼图闭合代价和数据相关抖动(DDJ)中实现更加统一的测量方式。

使用精确高斯噪声发生器，应用随机抖动(RJ)。通过增加噪声，然后把信号传送给限制放大器，可以在信号上施加高斯 RJ。对这些数据速率下要求的精度，限制器 AM 到 PM 转换是应用 RJ 的理想方式。

尽管已经发布的标准中还没有要求，但随着我们在 25+ Gb/s 中获得更多的经验，预计规范中将要求观察随机噪声(RN)。通过在信号中增加精确的高斯噪声，还可以引入 RN，当然没有限制器。

把垂直眼图闭合代价(VECP)设置成表4给出的水平需要多个步骤。光学VEC的计算公式如下：

$$VECP = 10 \log \frac{OMA}{EH(2.5 \times 10^{-3})}$$

其中眼高 $EH(2.5 \times 10^{-3})$ 是在某个 BER 下规定的垂直眼图张开水平。尽管概念上有些麻烦，但 $EH(BER)$ 定义的精确度要高于平均峰峰值电压摆幅。它相当于 2.5×10^{-3} 的多个 BER 轮廓之间眼图中心的垂直距离，在 BERTScope 或装有 80SJNB 软件的 DSA8300 上可以简便地测量这一指标。

在设置 VECP 后调谐 J2 和 J9 抖动电平。J2 和 J9 指明了抖动分布的特点。高概率抖动、99% 的分布包含在 J2 中，因此 J2 等于在 $BER = 2.5 \times 10^{-3}$ 时规定的总抖动(TJ)。另一方面，J9 表明抖动分布尾部以低概率 RJ 为主，外部的十亿分之一；因此 J9 等于 $BER = 2.5 \times 10^{-10}$ 时的 TJ。

在信号中增加正弦曲线干扰(幅度调制)，直到达到 J2 要求，参见图 8。

图 8. 在装有 80SJNB 的 DSA 8300 软件上测量 J2 的实例。

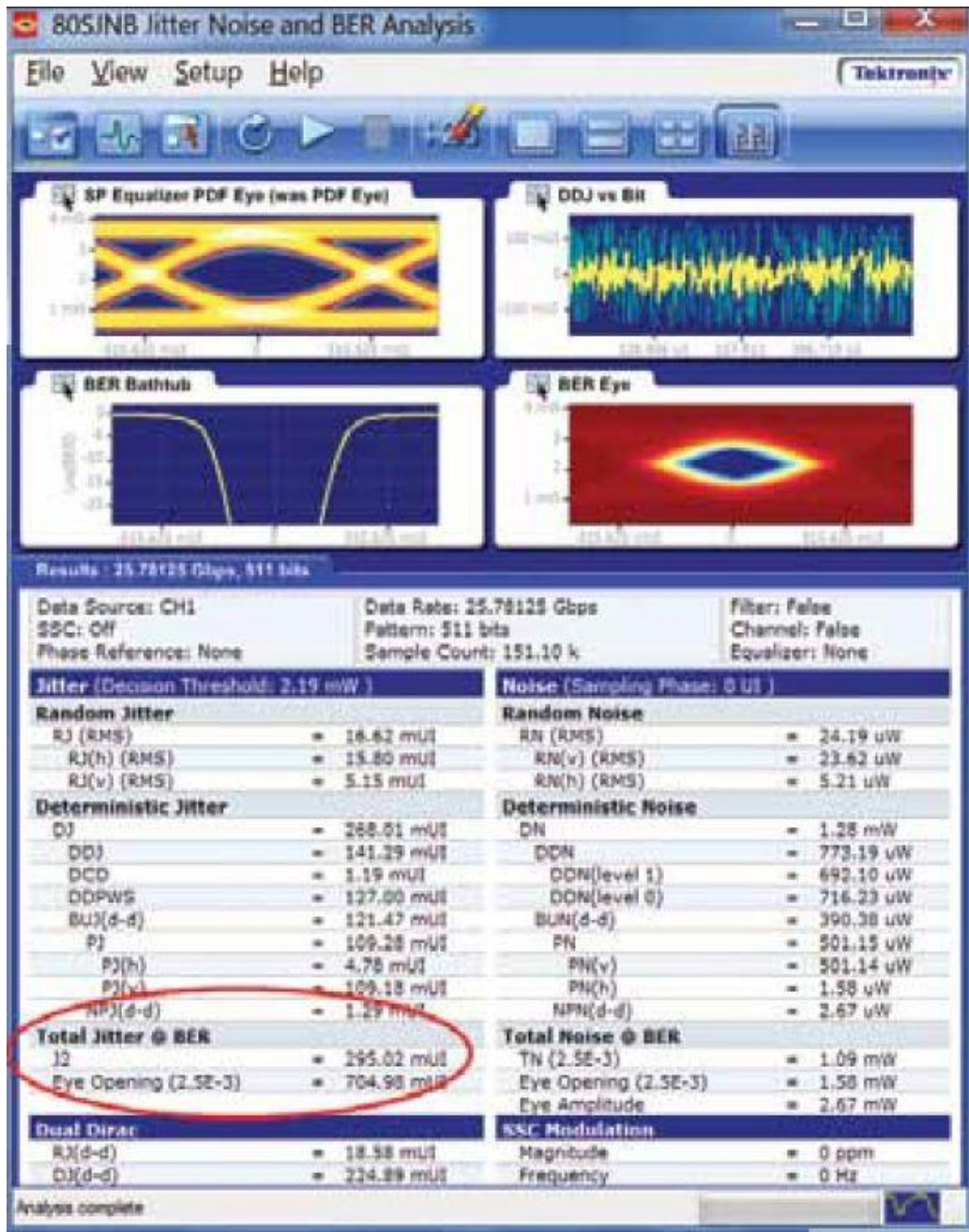


Figure 8. Example measurement of J2 on the DSA 8300 with 80SJNB.

图9. 在测试 J2 后, J9 电平为 0.35 UI, 为满足 J9 规范, 增加 <335 fs rms RJ.

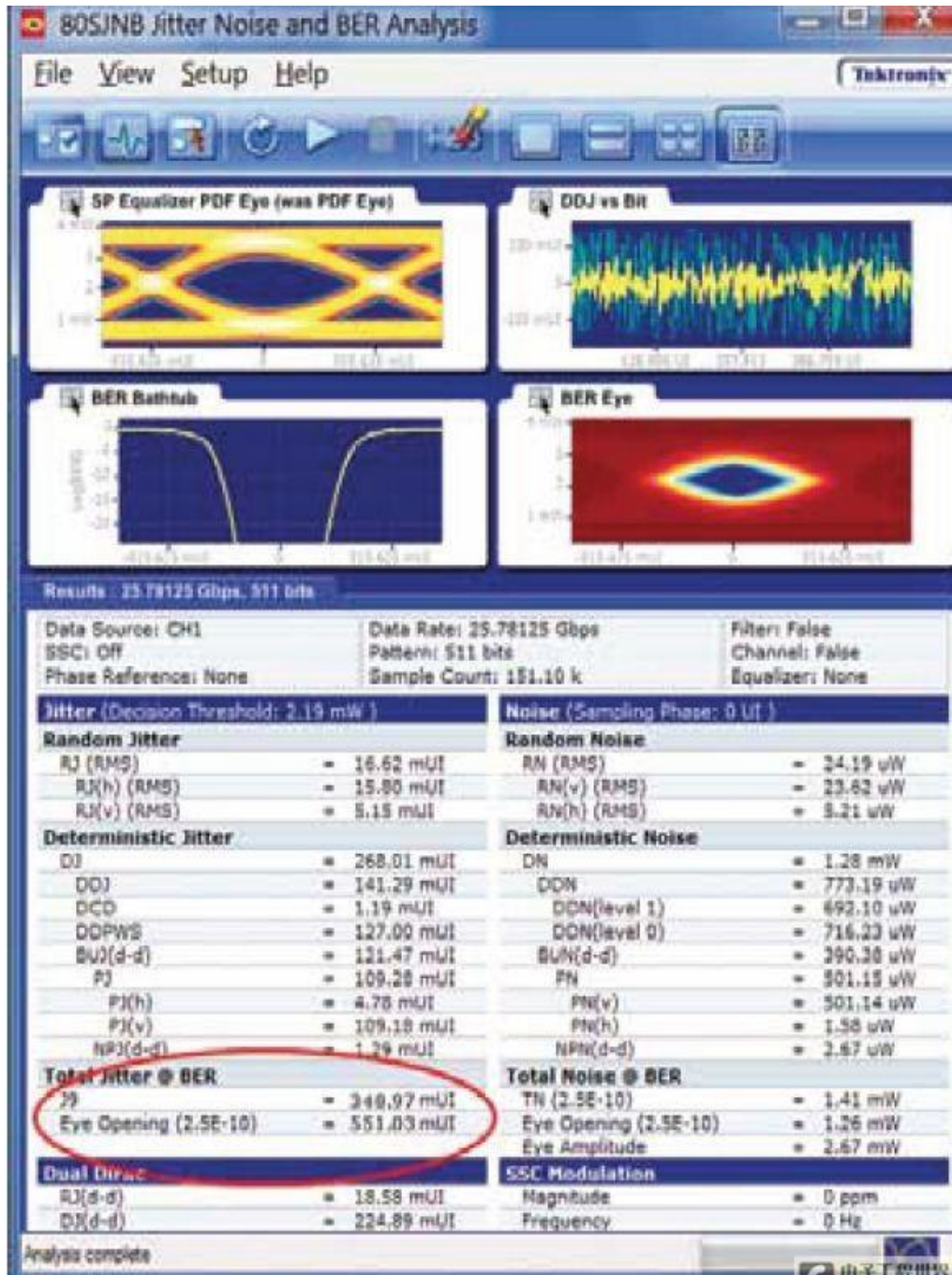


Figure 9. After setting J2, the J9 level is 0.35 UI, to meet the J9 spec, add less than **

由于 J2 和 J9 之间 BER 不一致性很宽，即使少量的 rms RJ，就会把 J9 提高到要求的电平，而对 J2 的影响则非常小。例如，在图 9 中，如果在设置 J2 后 J9 电平是 0.35 UI，那么为满足 0.47 UI J9 规范，要增加 0.12 UI 的 RJ，即 <335 fs 的 rms RJ。必需特别注意，保证信号源固有的 Rj 低于 332 fs，否则就会不可能实现图 9 所示的同时侦听 J2 和 J9。为了增加超过仪器噪底的非常少量的 Rj，我们使用精密 rj 噪声源，把飞秒级的 RJ 增加到信号路径中。为了侦听 J9 抖动电平，

需要增加的 R_j 增量一般非常小。这一步至关重要，因为在校准工作中要作为一个系统使用 BERTScope 发生器和 DSA8300 采样示波器。

把加压的信号发送到复制的系统中，如图 11 所示，另外还要一起传送其它三个串扰信号。

图 10. 在 BERTScope 上测量的抖动峰值及 J_9 。

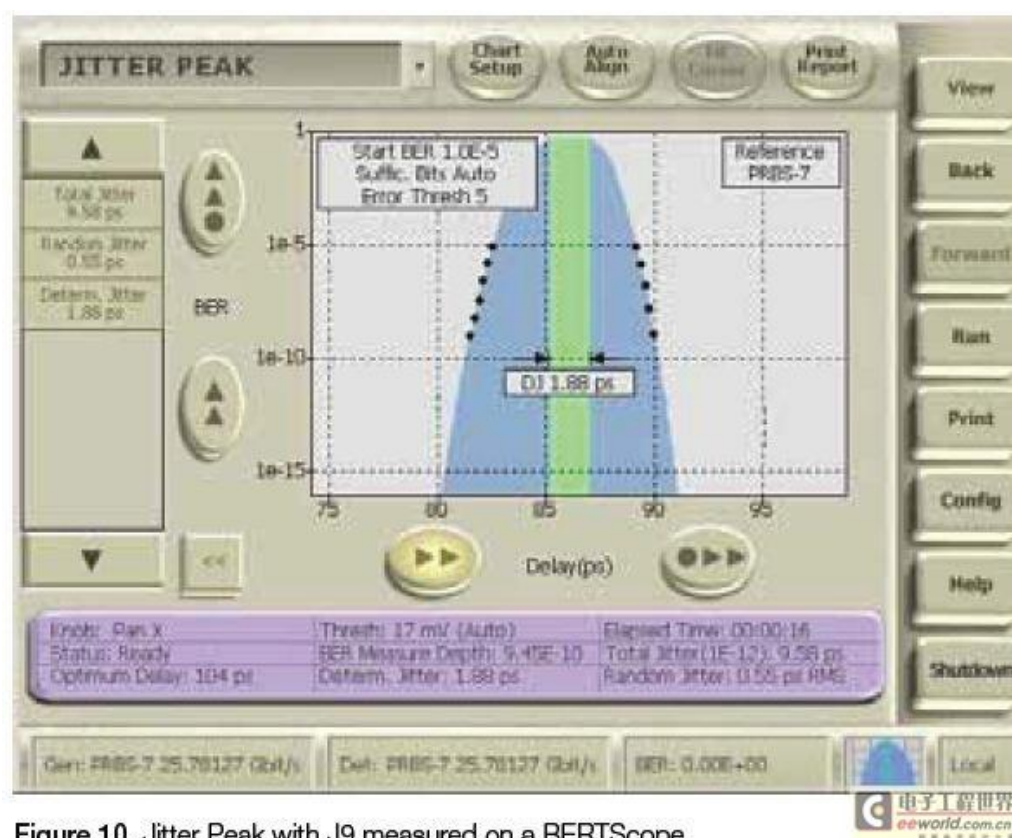


Figure 10. Jitter Peak with J_9 measured on a BERTScope.

图 11. 加压的光接口接收机测试.

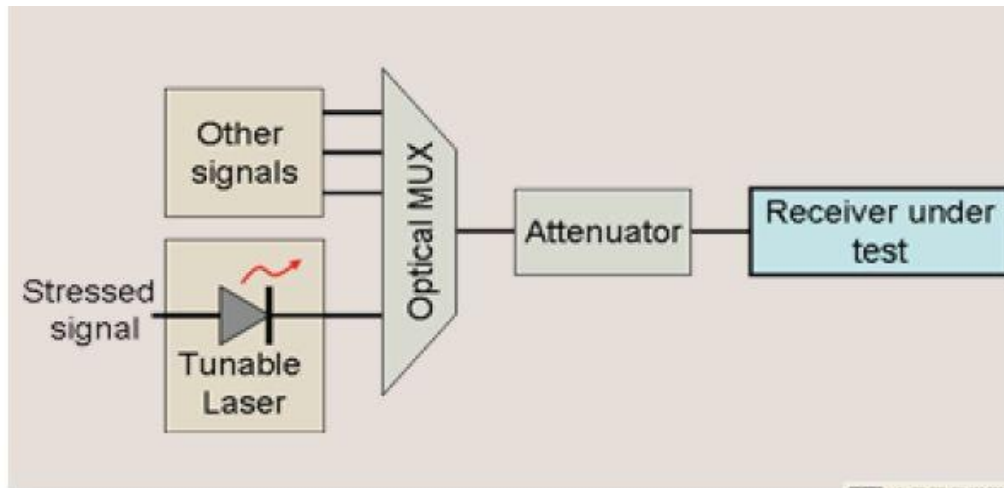


Figure 11. Optical stressed receiver test.

[图示内容：]

Stressed Signal: 加压的信号

Other signals: 其它信号

Tunable Laser: 可调谐激光器

Optical MUX: 光复用器

Attenuator: 衰减器

Receiver under test: 被测接收机

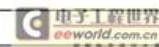
如果接收机能够计数自己的 BER，那么可以完成测试。否则，把接收机输出连接到 BERTScope。如果接收机没有提供时钟输出，那么应使用时钟恢复单元，为误码检测器提供定时。如果没有时钟恢复单元，那么可能可以使用 BERTScope 时钟输出，因为接收机的输出已经被重新定时，应该是原始干净的。

把加压的信号施加到接收机，首先在图 7 模板中滚降频率以上施加低幅度 SJ。如果接收机在 $BER \leq 10^{-12}$ 下工作，那么施加所有其它压力，在图 7 中 SJ 频率幅度模板上继续执行测试。BERTScope 的抖动转函测量功能会自动完成这一操作。

如果接收机对所有测试在 $BER \leq 10^{-12}$ 下运行，那么它满足标准。

表 5. 典型的电接口发射机要求汇总表。

典型的电接口发射机要求	
数据速率(c.f., 波特率)	19.90-28.05 Gb/s
采用一个连接器的标准FR-4 PCB上的等效距离	10-30 cm
内奎斯特频率上一致性测试电路板插入损耗	-1.75到-1.25 dB
预加重	≥ 3阶
脉冲响应优化	≥ 8 UI
峰峰值差分电压	800-1200 mV
上升/下降时间(20/80%)	≥ 8-10 ps
垂直眼图闭合(VEC)	≤ 3-9 dB
占空比失真(DCD)	≤ 0.035 UI
不相关确定性抖动(如SJ + DCD)	≤ 0.15 UI
随机抖动(RJ @ BER=10 ⁻¹⁵)	≤ 0.15 UI
眼图宽度@BER = 10 ⁻¹⁵ , EW	≥ 0.46-0.72 UI
总抖动@BER = 10 ⁻¹⁵ , TJ	≤ 0.28-0.54 UI
眼图高度@BER = 10 ⁻¹⁵ , EH	≥ 100-300 mV



3.3. 电接口发射机测试

表 5 列出了典型的电接口发射机要求。表 5 的要求范围很广，演示了图 2 所示的三种不同电接口信令子系统的差异：Serdes→Serdes，Serdes→收发机，收发机→Serdes。图 2 底部的 Serdes→Serdes 形状的距离最长，要求最严格。Serdes→收发机的要求最松，收发机→Serdes 的要求中等。

可以在 DSA8300 或 BERTScope 上测量发射机特点。不管是哪种情况，都要求黄金标准 PLL 的参考接收机，如时钟恢复单元 CR286A。

发送信号幅度指标用相对于 BER, EH(BER)确定的眼图高度给出。眼图宽度也使用 BER, EW(BER)确定，用户可能会更熟悉这个指标，因为它与 TJ 有关，TJ 也是相对于是 BER 确定的。在 TJ 是眼图闭合时，EW 则是眼图张开

图 12. 典型一致性测试电路板的差分频响。

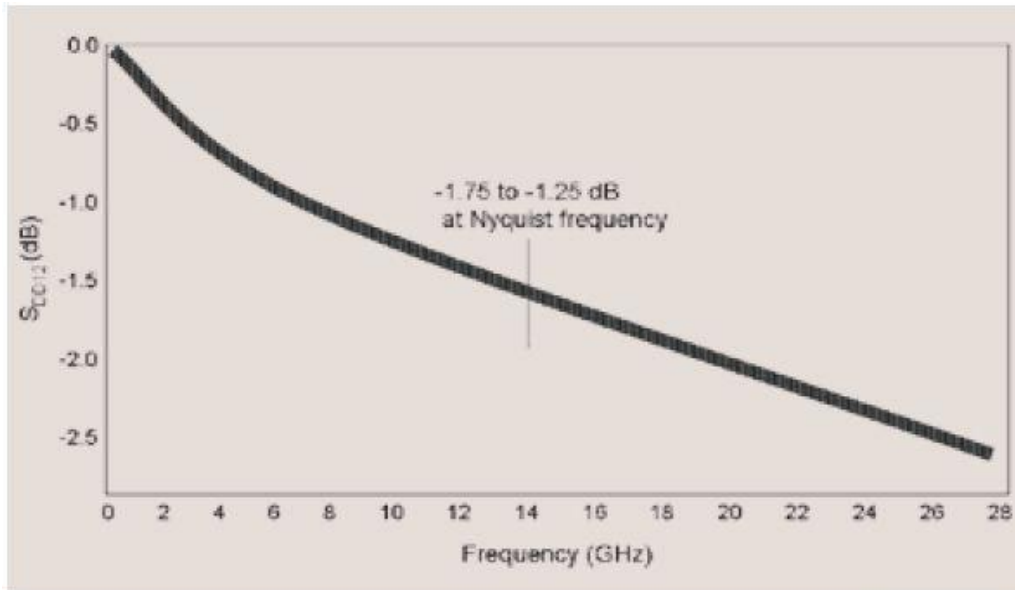



Figure 12. Differential frequency response of typical compliance test board 

[图示内容：]

-1.75 to -1.25 dB at Nyquist frequency: 内奎斯特频率处-1.75 到-1.25 dB

由于这些速率下的电接口发射机应用信号预加重，以部分校正通道响应，而不是随意地测试发送的信号，因此一致性测试电路板被插到发射机输出和测试设备之间。表 5 给出了一致性测试电路板典型的内奎斯特速率($f_{data}/2$)损耗值，图 12 显示了典型的差分响应。

就像每种规范在不同应用和 PCB 传输长度推动下有不同要求以外，还要求一致性测试电路板有不同的损耗和频响特点。泰克可以提供各种校准后的轨迹长度。在某些情况下，还可以自动实现一致性测试电路板的角色。

至少要求三阶预加重。三阶表示要修改构成跳变的比特电压电平以及之前和之后的电压电平，以补偿通道频响。阶值 C-1、C0、C1 从至少 8 UI 的通道脉冲响应中导出。可以把通道引入的 ISI 看作折叠通道频响对每个发送的比特的配置文件的影响。得到的每个比特的波形可以扩展到多个 UI 上。典型的 25+ Gb/s 规范要求至少在 8 UI 上进行优化。

使用中间的一般预加重值测试发射机是合理的。引入一致性测试电路板，选择一条长度约等于最短规定长度的轨迹，优化发射机预加重方案。如果得到的预加重电平不到允许值的一半，那么使用略长一点的轨迹。如果得到的值远远大于允许值的一半，那么换一条略短的轨迹试试。

记住，这些数据速率下的眼图，即使只是在几厘米的 PCB 中传输后，即使采用预加重，在接收机上仍然可能会闭上。因此，某些规范还要求测试设备应用

连续时间线性均衡(CTLE)方案。通过这种方式，测试中会包括发射机预加重和最小接收机均衡之间的相互影响。CTLE 一般是单零双极滤波器，在内奎斯特速率 $f_{data}/2$ 处达到峰值。

不同的规范要求不同的测试码型。对发射机测试，PRBS9 码型通常足够了。当然，所有其它系统通道都应该活动，以便在测试中包括串扰。串扰汇总器应传送不同的码型，基于上面讨论的原因，汇总器应尽可能同步。

可以使从信号中恢复的时钟触发 DSA8300 或 BERTScope，执行测试。与这些数据速率对应的时钟恢复模块是 CR286A，应检查技术规范，确保应用正确的 3 dB 带宽，通常是 $f_{data}/1667$ 。

可以使用配有 80SJNB BER 分析软件中的 BER 眼图(参见图 13)或 BERTScope 中的 BER 轮廓，简便地测量相对于 BER 确定的眼图高度和眼图宽度 $EH(BER)$ 和 $EW(BER)$ 。

图 13. 使用 BER 眼图测量 $EH(10^{-15})$ 和 $EW(10^{-15})$ 。

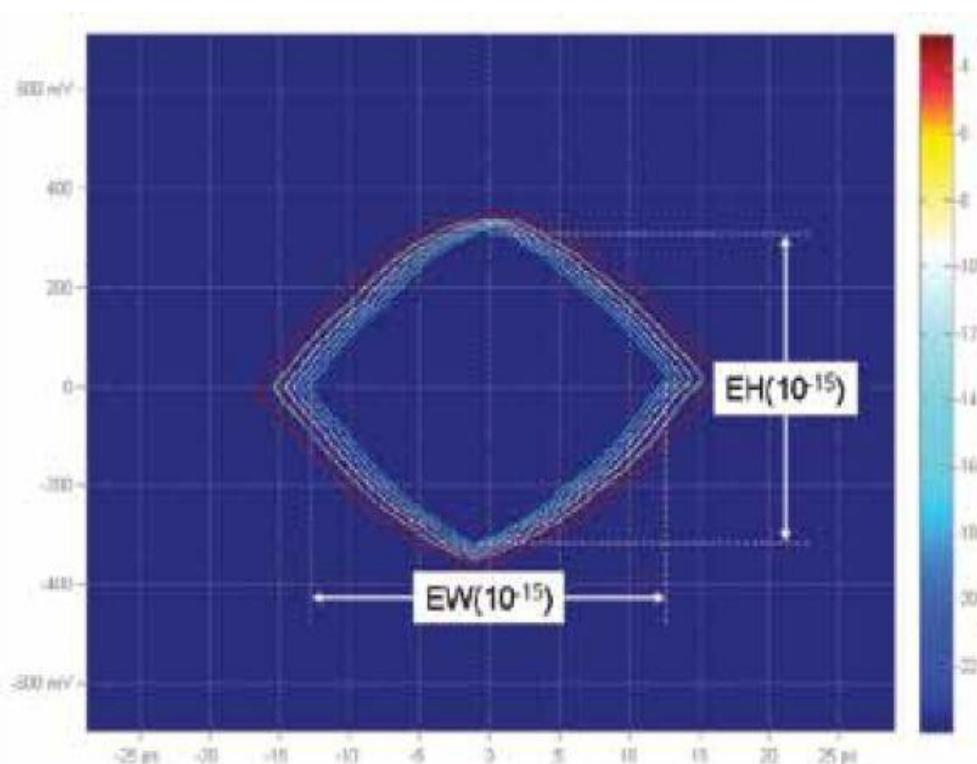


Figure 13. Measurements of $EH(10^{-15})$ and $EW(10^{-15})$ with a BER Eye diagram. 

在使用一致性测试电路板及优化预加重后，把 CTLE 增益配置成规范规定的值，一般为 1 - 3 dB，得到最大 $EH(BER)$ 。如果您正在使用 DSA8300，那么至少要采集 1200 万样点；如果您正在使用 BERTScope，那么至少要采集 200 万个比特。统计样点数量越大，效果越好。

EH(10-15)是眼图中心内部 BER=10-15 轮廓的垂直隔离度。类似的，EW(10-15)是眼图中心内部 BER=10-15 轮廓的水平隔离度。

垂直眼图闭合(VEC)是平均电压摆幅与眼图高度之比：

$$VEC = 20 \log \frac{V_{avg\ swing}}{EH(10^{-15})}$$

在BERTScope上，您可以在BER轮廓旁边读取平均电压摆幅。在DSA8300上，和前面一样，您必须采集至少1200万样点的眼图，才能得到可靠的平均逻辑高电平和逻辑低电平。其差异在平均电压摆幅上。

表6. Serdes和收发机电接口加压眼图规范摘要。

Serdes和收发机加压眼图接收机测试摘要	
码型	PRBS31
一致性测试电路板在内奎斯特频率下的插入损耗	-2.5到-1.5 dB
图7滚降频率以上频率的SJ	0.05 UI
通过低通滤波的DJ+BUJ串扰 +RJ得到TJ(10-15)	0.28 UI
摆幅电压	600 mV
正弦曲线干扰，以使EH(10-15)	240 mV
TJ(10-15)	0.43 UI
图7中任意SJ幅度和频率的BER	≤ 10 ⁻¹⁵



3.4. 电接口接收机测试

加压接收机容限测试是指对接收机应用最坏情况信号。如果接收机(包括内部均衡方案)在小于等于规定的 BER 下运行(对 100 GbE 和 32GFC, BER ≤10-12; 对 OIF-CEI, BER ≤10-15)，那么接收机满足标准。每种规范要求不同的压力水平和压力类型。某些规范只要求 SJ。在本节中，我们使用第二节介绍的标准中代表性的压力，典型值请参见表 6。一定要检查正在测试的技术规范，以保证测试满足标准。

图 14. 加压电接口接收机测试设置。

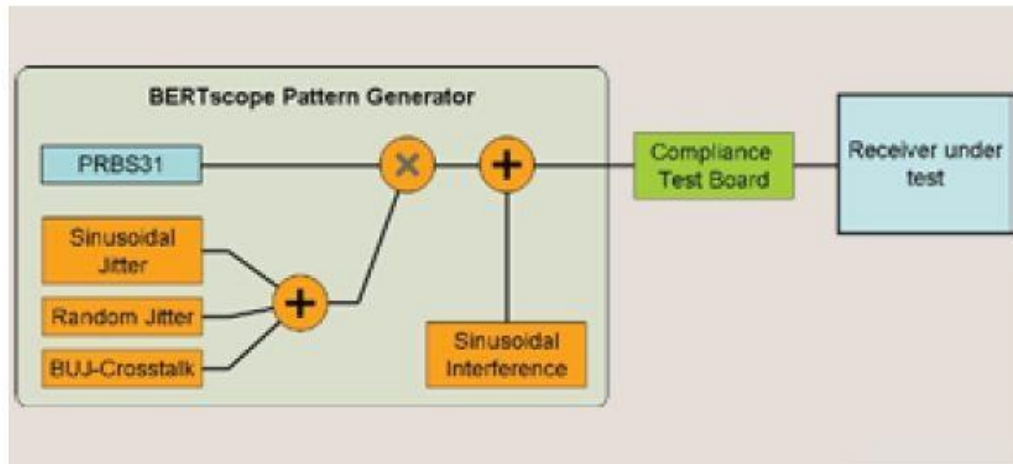


Figure 14. Electrical stressed receiver test setup.

[图示内容：]

BERTScope Pattern Generator: BERTScope 码型发生器

Sinusoidal Jitter: 正弦曲线抖动

Random Jitter: 随机抖动

BUJ-Crosstalk: BUJ 串扰

Sinusoidal Interference: 正弦曲线干扰

Compliance Test Board: 一致性测试电路板

Receiver Under Test: 被测接收机

为配置加压的信号，在 BERTScope 的码型发生器输出与误码检测器输入之间连接一致性测试电路板，如图 14 所示。生成一个 PRBS31 测试码型，一个长码型，包括 31 个符号的每个置换，生成每个想得到的比特轨道。

图 15. 加压的信号

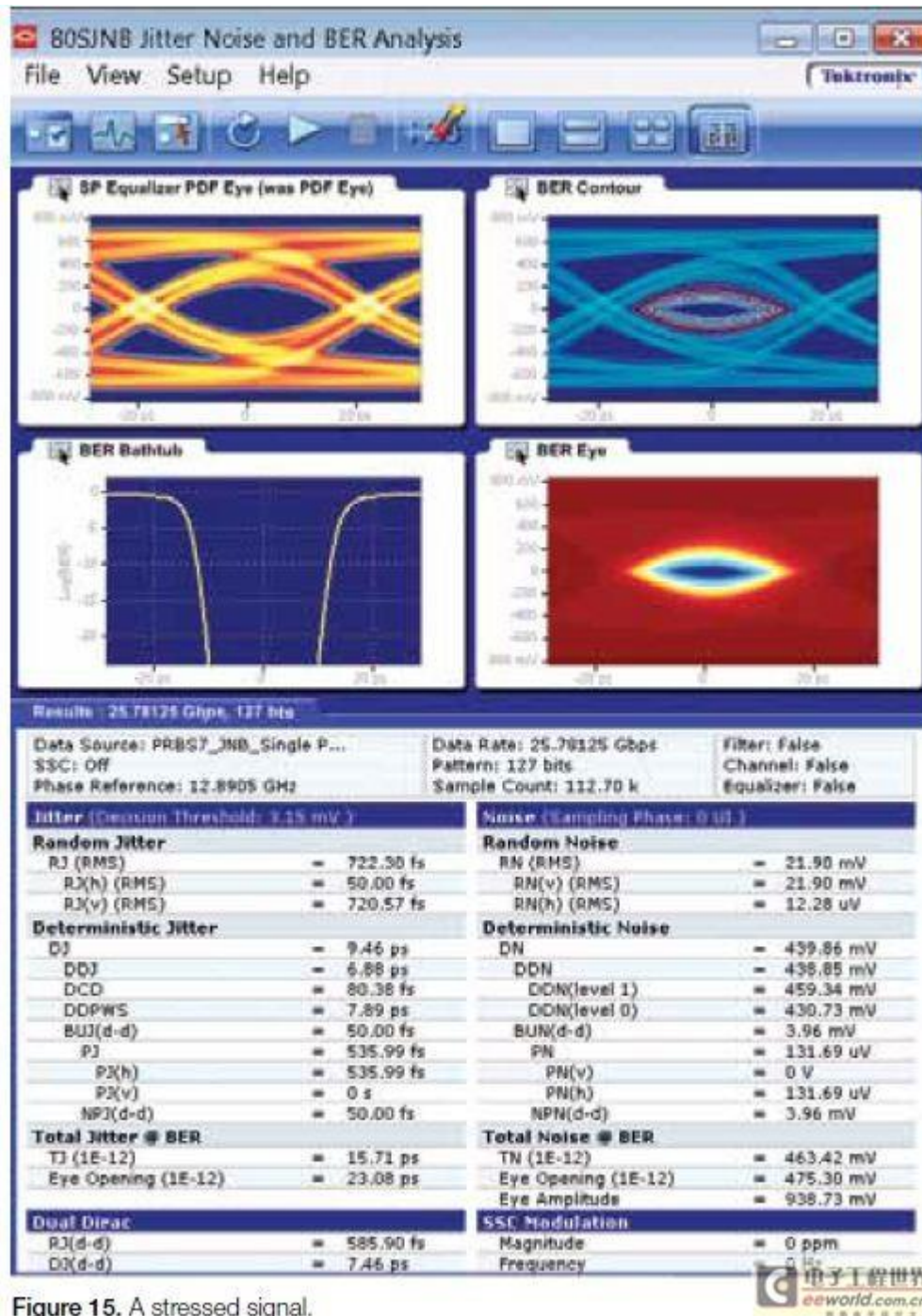


Figure 15. A stressed signal.

在刚刚高于图 7 滚降频率的频率上方增加一个低通滤波器和 0.05 UI 的 SJ，应用 DJ，外加一致性测试电路板的 DJ。

使用附录 – BUJ 串扰仿真中描述的 BUJ 串扰。

把信号幅度设置成指定水平，大约 600 mV。

在有抖动的信号中增加正弦曲线干扰，仿真超出一致性测试电路板损耗的 PCB 损耗，以便测试信号拥有要求的 EH(10-15)，大约 240 mV。

增加 RJ，直到 TJ(10-15)达到指定水平。

在图 15 中，可以看到压力对信号的影响。为执行测试，尽最大努力保证接收机看到您已经配置的信号。最好使用测试设置中使用的相同电缆，把接收机连接到一致性测试电路板上。

如果接收机能够计数自己的 BER，那么可以继续测试。否则，把接收机输出连接到 BERTScope 误码检测器上。如果接收机没有提供时钟输出，应使用时钟恢复单元为误码检测器提供定时。如果没有时钟恢复单元，您可能要使用 BERTScope 数据速率时钟，因为接收机的输出已经被重新定时。

先使用超过滚降频率的低幅度 SJ，把加压的信号应用到接收机，如图 7 所示。如果接收机在启动和优化均衡方案的情况下在等于或好于指定 BER 下运行，那么在图 7 中 SJ 频率幅度模板内继续执行测试，保证接收机能够追踪低频抖动，并应用所有其它压力。BERTScope 的抖动转函测量功能可以自动完成这些操作。

如果接收机在 SJ 频率范围内在等于或好于指定 BER 下运行，那么接收机满足标准。

图 16. BERTScope 上的抖动分解实例。

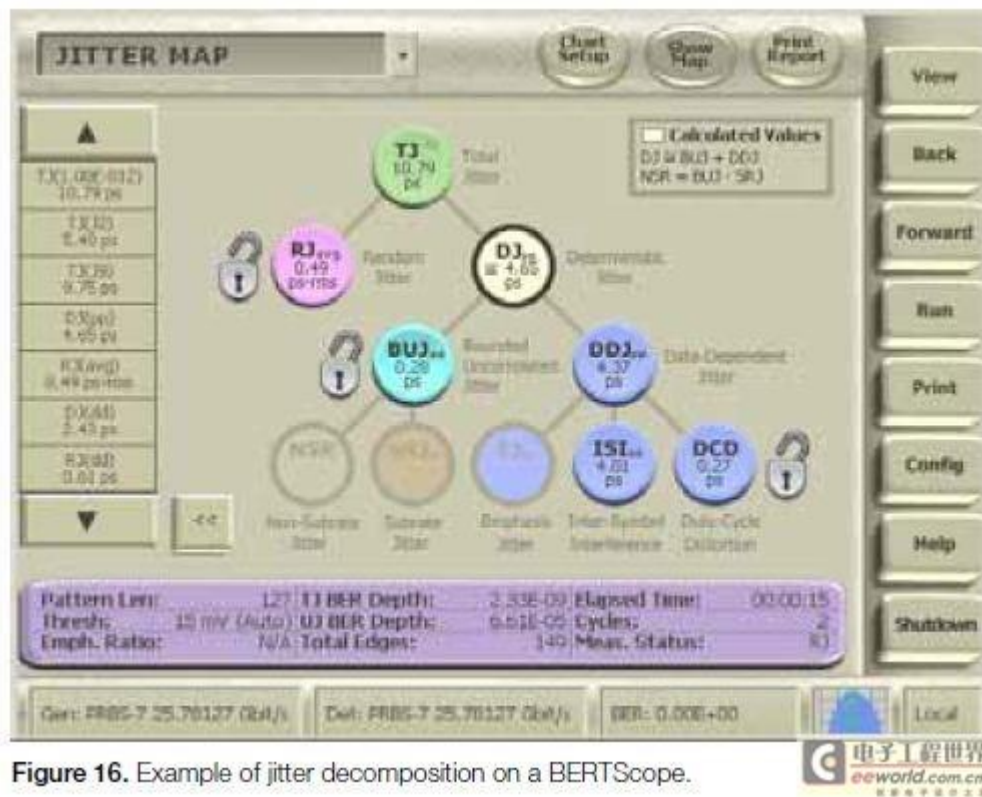


Figure 16. Example of jitter decomposition on a BERTScope.

4. 诊断测试

一致性测试和诊断测试之间的差异是复杂程度。一致性测试包括的单元一般非常多，容易理解。为了确定系统的哪些单元或组件可能导致问题，应战略性地规划诊断测试，找到特定弱点。它们应该内置复杂性和综合测试，以找到问题，确定余量。

4.1. 如果发射机测试失败怎么办

如果发射机测试失败，那么去掉任何一致性测试电路板，尽可能使用直接连接分析发射机输出，简化测试。然后执行抖动和噪声分析。在应用更复杂的码型时分析分类结果，引入更长的 PCB，应用预加重，打开串扰汇总器。对每套条件，分析眼图、BER 眼图、BER 轮廓以及抖动和噪声分类。参见图 16。

装有 80SJNB 软件的 DSA8300 及配有抖动位置选项的 BERTScope 可以自动区分不同类型的抖动，帮助隔离问题：

非周期 BUJ →串扰屏蔽不足。

DCD →发射机失真。

ISI →输出路径问题。

高 RJ →发射机时钟问题。

SJ 和周期抖动(PJ)、正弦曲线和周期噪声→附近元器件发出的电磁干扰，如可能的开关电源。通过研究抖动频率频谱，可以识别干扰来源。时钟恢复单元 CR286A 可以测量实时抖动频谱。任意频谱峰值的频率是否与其它组件的谐波对应？

4.2. 如果接收机测试失败怎么办

考察接收机对每个压力的响应。使用 BERTScope 的码型发生器功能。先从干净的码型入手，然后提高复杂程度。

应用低标记密度的测试码型，检查基线漂移。

使用拥有长串连续相同(CID)位和低跳变密度的码型，测试时钟恢复电路。码型的结构化越强，在应用到一致性测试电路板或滤波器时其生成的 ISI 越多。

扫描 SJ，经过接收机，在不同幅度下为时钟恢复频响。确定时钟恢复电路抖动追踪能力失效的点。

引入更长的一致性测试电路板，测试接收机的均衡器。通过结合使用不同复杂程度的码型和不同的轨迹长度，可以生成各种 ISI 电平，找到均衡器的余量。

逐渐提高 BUJ 串扰和 BJ，测试接收机容忍抖动和噪声的能力，即建立时间和保持时间。

引入正弦曲线干扰，检查电压灵敏度。

到接收机的灵敏方面，然后应用不同的压力组合。有的压力组合可能挑战性特别大，有的压力组合下接收机可能会特别强健。

小结

以 100 Gb/s 速率传输信号并不简单。您需要高性能测试设备，评估每个组件及整个系统的性能。在 DSA8300、BERTScope 和 CR286A 时钟恢复单元之间，泰克为光接口和电接口发射机和接收机一致性测试和诊断测试提供了一套完整的工具。

附录 – BUJ 串扰仿真

串扰是电接口接收机的一项重要压力，通过应用 PRBS 有界不相关抖动 (BUJ)，可以简便地仿真这种压力。在过去十年中，HSS 标准一直使用这种技术，在 BERTScope 上也可以简便地实现这种技术。仿真串扰及 BUJ 的另一种方案是至少再购买三台 25+ Gb/s 码型发生器。

PRBS 型可以应用到码型发生器的电压延迟上，以便位移跳变定时。这种 PRBS 定时噪声导致信号定时突然位移，这种位移与信号同步，但在位周期的整数倍时出现，像规范中要求的串扰一样。

为了校准N通道系统的PRBS BUJ串扰信号，把码型发生器连接到差分汇总器通道上，把差分受影响通道连接到示波器上。在示波器上测量rms串扰电压噪声 X_{rms} 。对其它汇总器通道重复测量，得到 $\{X_{rms}(1), X_{rms}(2), \dots, X_{rms}(N-1)\}$ 。每个汇总器的电压到定时噪声等效值为：

$$\approx \frac{5\sqrt{2} t_{rf} X_{rms}}{3 V_{Swing}}$$

一个汇总器的BUJ串扰

其中 t_{rf} 是干净的信号20-80%上升/下降时间， V_{Swing} 是平均逻辑高电压与逻辑低电压之差。N通道系统的BUJ串扰等效值为：

N-1汇总器的BUJ串扰

$$\approx \frac{5\sqrt{2} t_{rf}}{3 V_{Swing}} \sqrt{X_{rms}(1)^2 + X_{rms}(2)^2 + \dots + X_{rms}(N-1)^2}$$