

# 消除 BER 与眼图之间的 空白—BER 轮廓教程

应用指南

## 摘要

本文介绍了 BER 轮廓测量 – 什么是 BER 轮廓、怎样构建 BER 轮廓、其对观察千兆位速率的性能有什么重要意义。它还提供了使用 BERTScope 误码率分析仪获得的 BER 轮廓操作实例 i。

Bits	56,718,374,656
Errors	14,134

图 1. 简单的 BER。

### BER 和眼图：为什么都不全面

大多数通信链路最终都要判断误码率 (BER) 性能 – 到达信宿时有多少个误码。与学校中的测试一样，BER 测试仪 (BERT) 将告诉您链路测试得分，不管是 10 分中的 9 分，还是 10 分中的 1 分。遗憾的是，这不会告诉您量化信息，如为什么得到这个分值或怎样获得更好的分值。对此，人们传统上一直使用采样示波器显示眼图。

眼图为观察参数性能提供了一种直观方式。如果正确操作，眼图应显示叠加在一起的每个可能的码型组合，一个码型叠加在另一个码型上面。通过把所有组合放在一个地方，可以方便地查看上升时间什么时候太慢，什么时候存在过冲，什么时候眼图由于抖动关闭。因此，为什么不使用眼图作为衡量链路性能的主要指标呢？

大的问题来自对通信链路的预期，人们预期每 1,000,000,000 位中可以正确传送 999,999,999 位 (BER 等于  $1 \times 10^{-9}$ ) 或更好的分值，而不是预期每 10 个位正确传送 9 个位或每 100 个位正确传送 99 个位 (某些无线连接就是这种情况)。经常要求  $1 \times 10^{-12}$ ，许多系统厂商则要求元器件供应商证明自己的元器件能够达到  $1 \times 10^{-15}$  或更好的性能。

为构建眼图，采样示波器测量电压样点。在许多重要方面，这些电压快照都不同于测得的 BER 点。



图 2. 眼图。

1. 第一，它们一次获取任何信号的一小部分，且只以每秒几十万位的速率获取这一小部分。相比之下，实际数据位以每秒 100 亿位 (对 10 Gb/s 链路) 飞过。对实际流动的数据来说，这种采样非常稀疏，因此采样示波器在 1,000,000,000 位中捕获要到的一个错误的可能性非常低。
2. 采样示波器和 BERT 通过不同的方式采集数据 – 前者拥有非常宽的带宽，但是稀疏采样 – 后者测量每一个位，但输入频响有限，更符合其仿真的网络设备。这些差异意味着不同类别的仪器得到的结果存在着重大差异。

如果一种链路性能观察方法直观、而又包含判断实际链路性能所需的全部信息，那么这种方法会非常方便。正因如此，工程师们日益采用 BER 轮廓作为有力的指标。为了了解怎样构建 BERT 轮廓，最好了解 BERT 怎样收集信息。

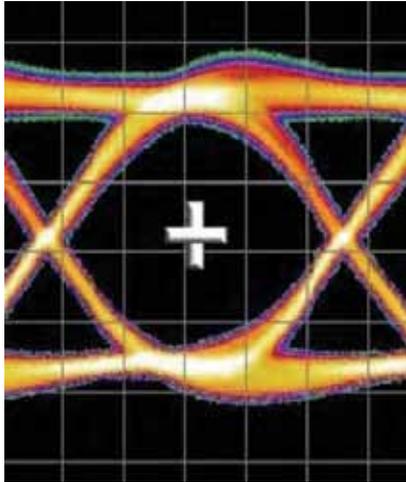


图 3. 眼图中心的 BERT 判定点。

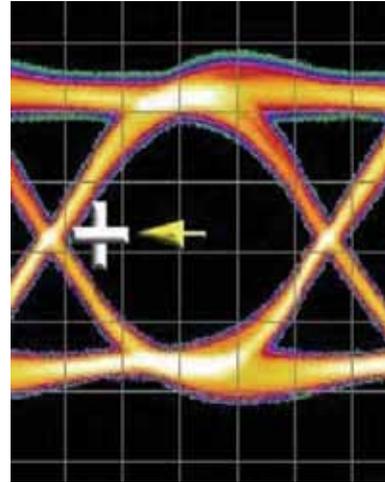


图 4. 在时间上移动判定点。

### BER 轮廓简介

BERT 误码检测器前端的行为方式在很大程度上与任何高速通信链路中的数字接收机类似 – 其目的是做出正确决策，确定输入信号是 1 还是 0。为此，它在每一个时点获得一个快照。在这个时点上，输入信号与电压门限进行对比，信号恰好位于门限的哪一侧决定着它判为 1 还是 0。它在每一个输入位上进行这一操作，使用与数据同步的时钟触发。与许多数据接收机不同，BERT 误码检测器能够把判定点非常准确地放在电压和时间中。

在正常条件下，判定点放在眼图中间，大约是位周期的一半，以及底部电压轨道和顶部电压轨道的一半位置。这为检测器在每个位上做出正确判定提供了最好的机会。

当判定点偏离这个理想位置时，情况变得很有意思。想象一下两条轨道之间一半的电压的判定点位于眼图中心。移动时钟通道和数据通道之间的延迟设置，将

把判定点保持在相同的电压电平，但时间上会移动。这看上去就像是判定点在眼图内部左右移动。

在这一实例中，小的移动没有影响 – 判定点是一个畅通无阻的区域，做出的每个判定都是正确的。当判定点进一步移动时，这会变得更有意思。当它接近眼图交点时，在大多数时间，它仍能得到所需信息。但是，最终它将遇到最后的到达边沿 – 这个边沿位于实例中右面最远端。这个边沿可能已经与绝大部分边沿分开，时间上比较晚，因为它源自特定码型组合，这条特定的被测电路最难处理，如带宽有限的系统中的欠幅脉冲 ‘1’。这一个边沿意味着判定点看到的电压电平高于其预计看到的电压电平，并把它登记为错误。这不是传统接收机的正常运行情况，而是我们创建的人为情况，允许我们探测及剖析眼图的这个部分。

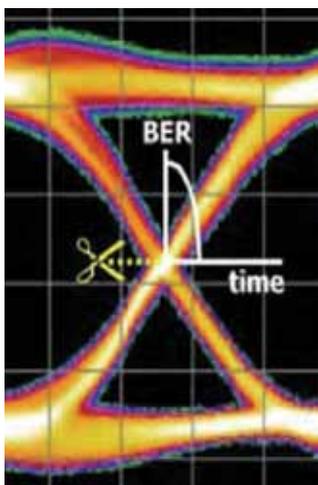


图 5. 创建穿过眼图交点的水平片断，剖析抖动。

进一步向左移动判定点，遇到的边沿越晚，登记的误码越多。在到达交点中间时，已经多次做出不正确的判断。在一个轴上绘制时间，在另一个轴上绘制遇到的误码数量，创建一条信息非常丰富的曲线。例如，如果频繁观察到遇到的第一个边沿，并紧密捆绑所有其它边沿，那么我们将获得一个健康的眼图，没有什么隐患影响我们的正常操作。在正常接收机中，在这条链路最后的眼图中心放置一个判定点，得分将好于每 1,000,000,000 个位中正确理解 999,999,999 个位。设计人员更担心的情况是，其偶尔会引发一个边沿出现得非常晚，而且是足够晚，也就是说，即使判定点在眼图中间，仍会做出错误判断。这种偶发事件直接决定着是客户不满意、退货、取消定单、还是链路正常运行。这些事件偶发性非常强，因此稀疏采样的测量系统，如采样示波器，不可能捕获这些事件。

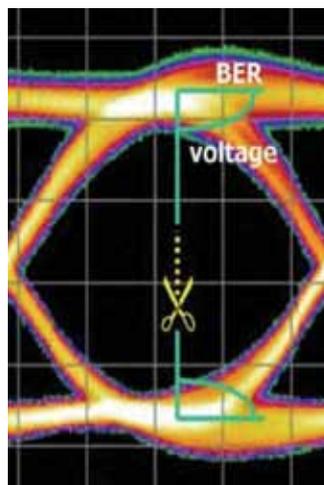


图 6. 移动判定点电压，获得穿过眼图的垂直片断。

我们之前讨论的一直是在时间上移动判定点。这非常适合探测链路的抖动性能，MJSQii 之类的标准中称为浴缸抖动或 BERTScan 的测试要求这类扫描。

我们可以对垂直（电压）方向运用类似的理念。把判定点放在眼图中心，保持延迟设置不变，移动门限电压。想象一下，我们向上移动电压门限。最终，它将到达一个点，遇到电平最低的位。这个位可能永远不会完全达到全部高度，然后就会在下一个位周期中被迫回到零，它的出现源于建立电路的半导体中的电荷效应。我们再进一步向上扫描，会导致遇到更多的“低 1”，直到大多数逻辑值 1 落到门限电平以下，计为零。我们可以针对门限电压绘制检测的误码曲线，得到另一个穿过眼图的片断，告诉我们系统的健康状况。

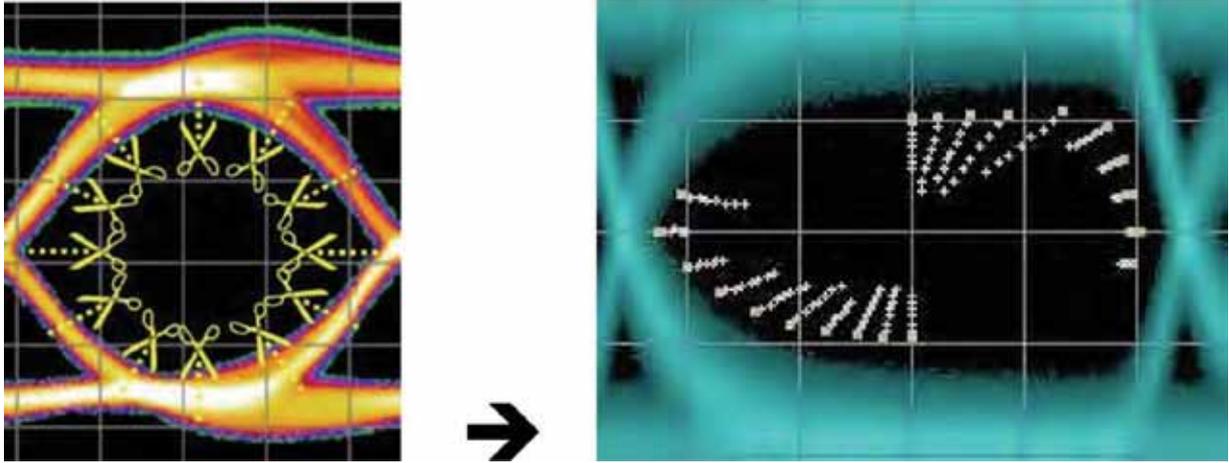


图 7(a) 和图 7(b). 从不同角度获得穿过眼图的多片断, 构建更完整的剖析视图。7(b) 显示了正在进行的实际 BER 轮廓测量。

然后我们把这一理念扩展到从不同于前面选取的两个正交角度的其它角度获得的片断。这些片断构成了更加完整的眼图画面, 用 BER 表示。例如, 我们获得每条曲线, 找到  $1 \times 10^{-6}$  BER 点, 并把这个点与其它曲线获得的其它  $1 \times 10^{-6}$  点连接起来, 可以创建“相同 BER”的轮廓。比较简单地说, 它创建了某种类似眼图地形图的东西, 其中山脉表示 BER 差, 山谷表示 BER 好。

这个视图揭示的信息远远超过前面讨论的两个单独的简单片断。我们现在可以看到眼图任何点上是否有隐藏的问题, 可以看到我们能把判定点放在哪里 (如有), 以实现无差错操作。注意, BER 轮廓落在图 8 中看得到的眼图表示的内部。换句话说, 传统眼图中有看不见的偶发事件, 这些事件实际存在, 会限制系统性能。

在讨论某些实际 BER 轮廓例子前, 我们先讨论眼图轮廓测量的部分实际考虑因素。

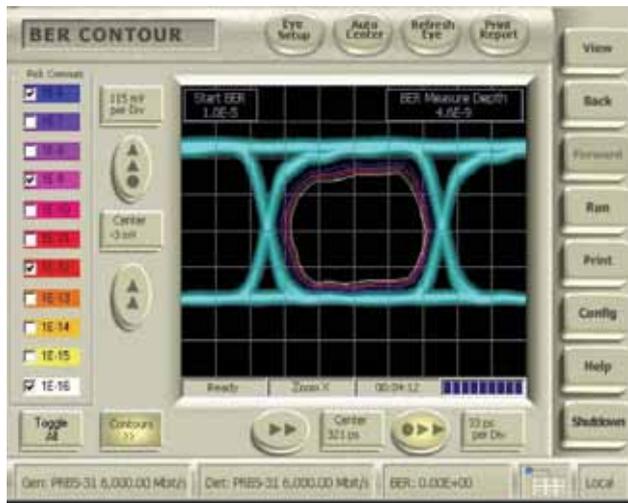


图 8. BER 轮廓画面，显示恒定 BER 行。

### 考虑因素

#### 判定点的准确性和设置

以准确的 BER 轮廓必需的精确性和可重复性移动 BERT 判定点，会对精度提出要求。事实证明，精确地设置电压门限相对容易。比较难的任务是设置精度延迟。大多数高性能电子延迟线机制混合采用固定段和可变段，并在必要时切入和切出，实现要求的结果。

它们一般控制起来非常复杂，是非线性的，亦即线性电压变化不会导致延迟发生线性变化。另外还可能会有间隙、粘滞，与温度和频率关系发生变化。在商用仪器中，通过校准延迟功能，可以减少这些问题。通过校准，可以可靠地、可重复地实现 100-fs 阶跃（不要与声称的 100 fs 典型分辨率混为一谈，后者没有提供与延迟设置精度有关的任何信息）。为获得准确的 BER 轮廓结果，在获得测量数据前立即对这些小阶跃执行校准至关重要。

#### 检测器输入性能

BERTs 通常依据码型发生器输出波形的质量进行判断。这些指标一般非常好，市场上大多数 BERTs 的波形质量远远超过其预计仿真的器件性能。对现代 BERT 现在可以实现的许多高级测量来说，误码检测器输入性能要更加重要。这是仪器质量输入，因此应拥有足够的带宽，在其测量被测器件时，不会明显改变测量结果。类似的，输入电路应拥有控制良好的频响及高回波损耗，真实地表示被测信号，而不会改变被测信号。可以创建和封装精心设计的定制集成电路和模块，提供完美的单端和差分性能，真实地表示检测器判定电路。

### 速度

1. 第三个考虑因素是仪器的速度。传统上，BER 轮廓测量起来一直非常慢。原因有两个：延迟 / 电压门限的控制一直很慢，因为采用外部延迟线和外部计算机控制，另外因为 BERT 响应慢。
2. 被测点的最高准确度来自准确测量低 BER 水平。BER 水平，如  $1 \times 10^{-12}$ ，需要很长的测量时间，因为每次测量都要求几十亿个位，并要求进行多次此类测量。

现代仪器知道必需迅速重新确定判定点在电压和时间上的位置，测量短段误码率，从而可以非常好地解决延迟控制问题，而不是“马后炮”。例如，可以在几微秒内重新确定判定点位置。这种功能与全面整合的用户界面相结合，提供了非常快的响应，其中用户界面自动确定采样点，以便于观察的表示方式叠加在眼图上，表示测量结果。

第二点比较复杂，而且要视要求的准确度而定。解决 BER 轮廓问题的更加明智的方法是先获得测量比较快的点，在运行测量时逐渐填充需要更长时间的点。其获得的第一个点用来推断较低 BER 轮廓的外形，然后随着获得更多数据，逐渐增强这些预测。通常可以在不到两分钟内，提供实用信息。通过这种方式，在绝对需要时，对最深的点获得所需的较长测量，同时立即提供中间结果，进行观察。

### 模型

MJSQ 是一项描述了双德塔或 Dual-Dirac 模型应用的标准。这提供了一种方式，预测眼图中不同点上的抖动特点，提供了通常复杂的情况的简单性，其实现方法是区分确定性成分（每次发生时行为方式类似的成分，即有界）和随机性成分（在任意时点不可预测的成份，如噪声，假设其呈高斯统计特点 - 称为‘无界’）。通过分开建立两种成分的模型，然后把这些特点加在一起，可以以合理的准确度预测 BER/ 时间曲线的特点。这最初是为抖动领域开发的，但在 BERTScope 中已经扩展和调整，也能用于使用的所有片段中。正如 MJSQ 附录 H (1 月草案) 所示，通过忽略曲线上方较高的点，以支持较低 BER 测得的点 (测量时间更长)，可以实现更高的准确度。Dual-Dirac 模型是一种近似值，希望使用自己的建模工具的用户可以自由导出底层数据，进行自己的计算。

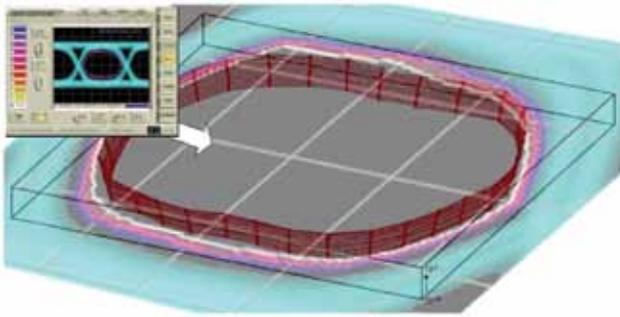


图 9. 把 BER 轮廓转换成三维“眼图碗”。

### BER 轮廓可以为您带来哪些信息

#### 三维视图，查看眼图闭合 - “眼图碗”

以三维方式观察 BER 轮廓，可以帮助您了解显示哪些信息。图 9 显示了一个转换成三维的 BER 轮廓，提供了相应的概念。三维表示像是一个“眼图碗”。通过导出 BER 轮廓数据，然后导入到基于 PC 的数学程序中，可以创建图 9 和图 10 中的眼图碗图。在图 9 中，BER 轮廓数据已经绘制成三维图，单元格构成顶部维度，深度表示 BER，顶面表示大约  $10^{-2}$ ，底面表示  $10^{-16}$ 。BER 轮廓（浅蓝）已经叠加在一起，帮助了解已经发生的变换。

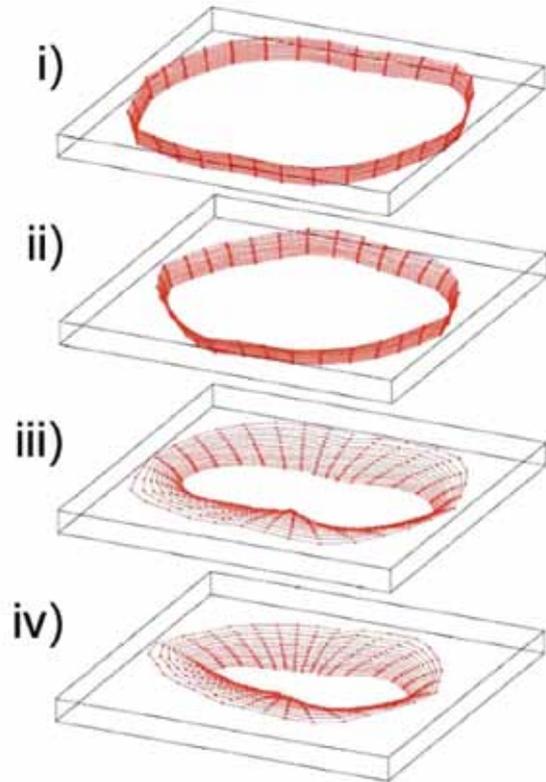


图 10. 眼图碗显示链路性能越来越差，BER 轮廓闭合程度日益提高。

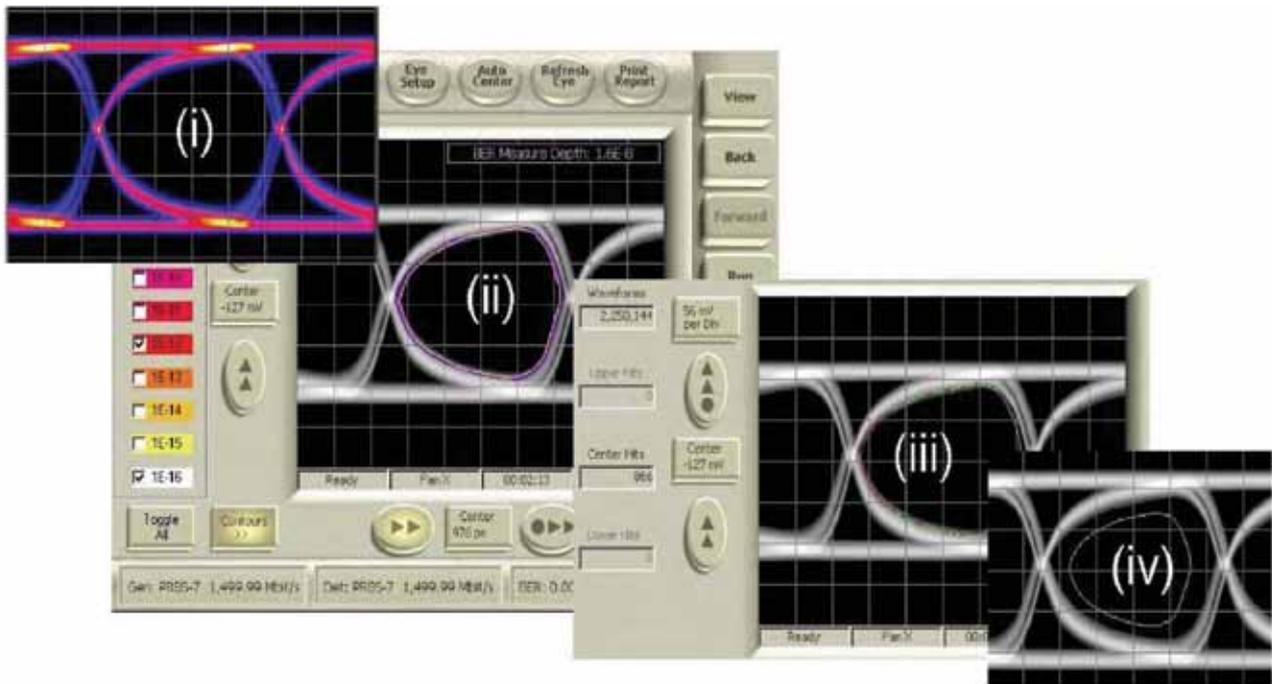


图 11. 使用黄金器件的 BER 轮廓执行基准模板测试。(i) 显示了眼图；(ii) 显示了 BER 轮廓。然后推断 10–16 轮廓，并作为模板使用。运行模板测试，记录失败 (iii)。还可以扩充模板 – (iv) 显示时间和电压余量增加了 25%。

在变换之后，可以方便地查看眼图闭合的影响。图 10 中的一系列示图显示了系统性能稳步变差，大部分项目使用采样率低的眼图是检测不到的（但 BERTScope 以独特的方式配备眼图功能，获取的样点数量可以提高几个量级，从而可以检测更多的低概率事件）。

BER 轮廓一个有趣的脚注是，BER 相同的轮廓本身可以作为基准，甚至用于快速制造测试应用中。通过

选取一条轮廓线，作为模板文件导出，它可以变成订制的“黄金性能”基准，用来在后续器件上执行眼图模板测试，监测工艺控制、质量、等等。这里保留了 BER 轮廓形状，但测量像传统模板测试一样变成快速电压采样（几秒钟），而不是基于 BER 的低速测量。为导出选取哪条轮廓线决定着测试的严格程度，低 BER（小）轮廓在电压域中要比高误码率（较大）轮廓容易。图 11 显示了顺序。

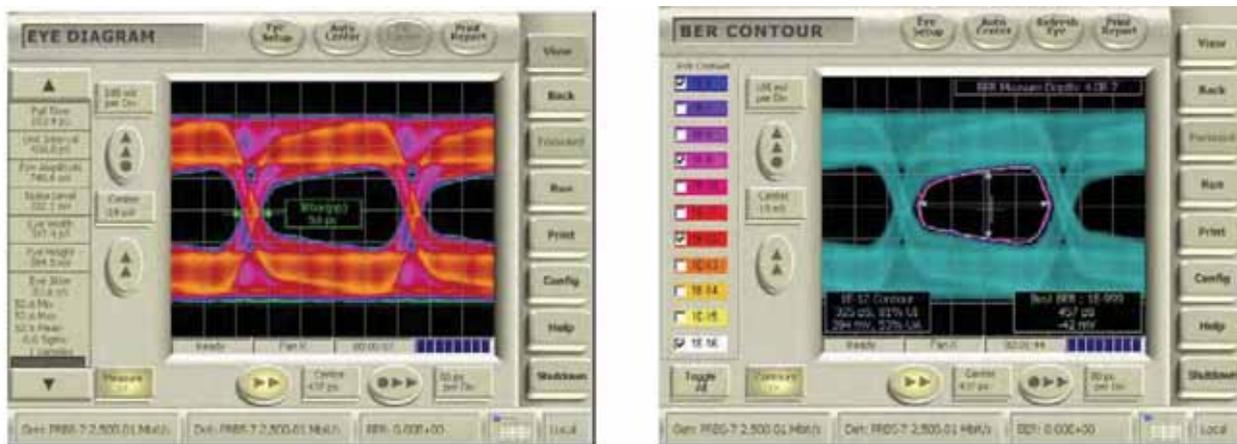


图 12. 拥有有界干扰的系统的眼图和 BER 轮廓。尽管这显示为眼图劣化，但 BER 轮廓显示系统将轻松实现无差错运行，拥有紧密分组的轮廓线。



图 13. 以无界干扰 (随机抖动 RJ) 为主的系统的眼图和 BER 轮廓。眼图似乎是一个优质系统，BER 轮廓揭示系统的健康程度要比表面看上去差，分布很宽的 BER 轮廓表明了这一点，必需认真放置接收机判定点，在可以实现时努力实现无差错操作。

### BER 轮廓实例

BER 轮廓为揭示系统的真实性能提供了完美的方式。例如，表现严重劣化的眼图可能拥有完全确定性的、发生概率很高的机制引起的不理想特点，更简单地讲，所见即所得，低概率下面没有隐藏任何导致系统问题的东西。还有一点，某些眼图睁开程度似乎和教科书

一模一样，但会有无界机制衍生的隐藏问题。图 12 和图 13 分别说明了这些情形。

建立“受压眼图”抖动容限测量也提供了某些很好的特定 BER 轮廓损伤实例。在下面的图中 (图 14 到图 17)，BERTScope 码型发生器以不同的方式受到损伤。

## 消除 BER 与眼图之间的空白—BER 轮廓教程

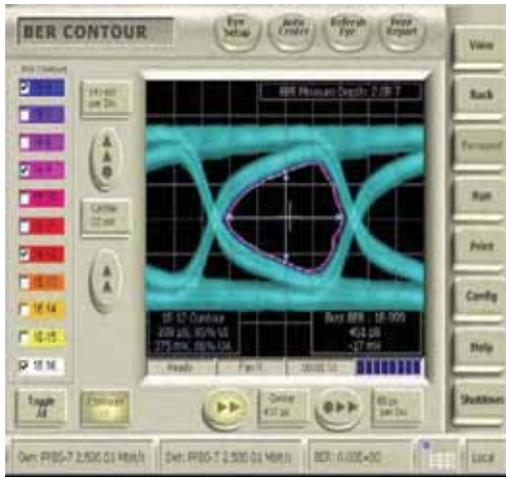


图 14. 带有 ISI 滤波器 (长电缆) 的 BER 轮廓, ISI 滤波器 (长电缆) 引入了码型相关效应。注意, 这些效应有界、可重复, 具有紧密成束的轮廓。

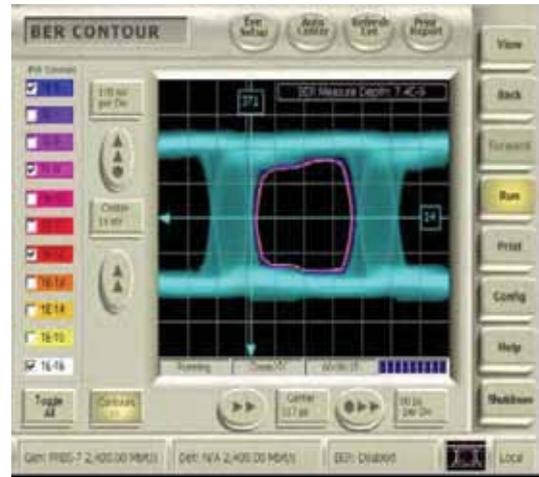


图 15. 优质信号增加正弦曲线抖动后的 BER 轮廓。SJ 完全有界、可预测, BER 轮廓紧密有界。

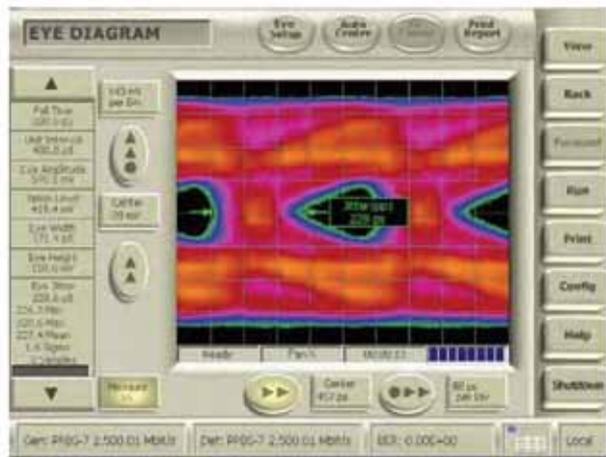


图 16. 全面成形的受压眼图的眼图 (左) 和 BER 轮廓 (右), 其中包含 ISI 滤波器 (长电缆)、正弦曲线抖动、随机性抖动和正弦曲线噪声 (提供垂直闭上)。这个实例表示一台典型接收机, 难度相当大。

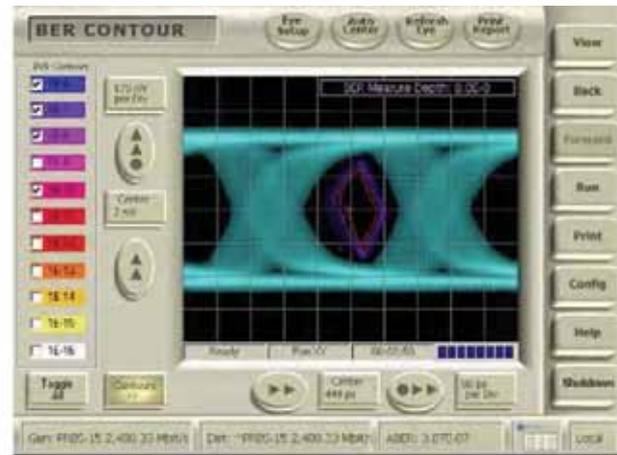
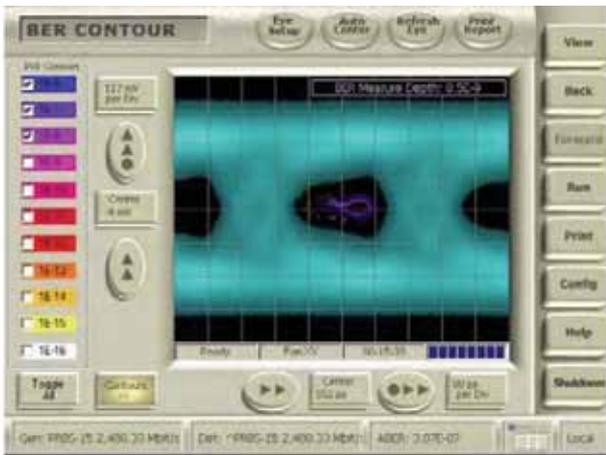


图 17. 不同电缆在两个线路卡之间构成了一条链路的两个 BER 轮廓, 增加了正弦抖动和噪声。左图显示了无源电缆, 眼图对 Dual-Dirac 模型闭上程度足够高, 已经破坏模型。右图显示了用有源“眼图睁开”电缆代替无源电缆后的轮廓。第二个实例可以明显改善性能。

## 应用指南

### 总结

BER 轮廓以视图方式直观全面地揭示了系统参数性能。由于仪器技术的最新进展，它现在也变得非常快、非常准确，使其成为开发、调试和验证环境中的可行选择。在制造业中，它还可以作为重要的黄金器件。

### 致谢

感谢思科公司开发者帮助进行图 10 中进行的测量。

- i BERTScope BSA125C: 12.5 Gb/s 误码率分析仪提供了 BER、拥有丰富数据的眼图、BER 轮廓、模板测试、Q 因数及大量的其它好处，可以快速分析及快捷地调试千兆位器件、板卡和系统。如需更多信息，请访问：[www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)。
- ii MJSQ 或光纤通道 – 抖动和信号质量测量方法规范是作为 INCITS 项目 T11.2 的一部分编写的文档。  
<http://www.t11.org/index.html>
- iii N.S. Bergano, F.W. Kerfoot 和 C.R. Davidson, "光放大器系统中的余量测量", IEEE 光子技术函件, 第 5 卷第 3 号第 304–306 页, 1993 年 3 月。

#### 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

#### 有关信息

泰克公司备有内容丰富的各种应用文章、技术简介和其他资料，并不断予以充实，可为从事前沿技术研究的工程师提供帮助。请访问泰克公司网站 [www.tektronix.com.cn](http://www.tektronix.com.cn)



©2013 年泰克公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利及外国专利的保护。本文中的信息代替以前出版的材料中的所有信息。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。本文中提到的所有商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。