

# 深入剖析眼图及高速串行设计中的眼图测试

泰克科技(中国)有限公司

## 0 引言

本文介绍了什么是眼图,眼图是如何构建的,以及生成眼图的常用触发方式。然后描述了使用不同的方式切割眼图,可以获得更多深入的信息。同时还讨论了一些发射机、传输链路和接收机测试的基本方法。本文的目的是为了工程师掌握眼图这个新领域的基本概念。

## 1 眼图测量基础知识

眼图是一种快速、直观地评估一个数字信号质量非常成功的方法。一个正确构建的眼图应该包含从简单的101和010到对连续的长0序列后单独的1和其它问题序列的每一个可能的位序列,所以眼图往往可以看出系统设计中的问题。图1是一个位序列叠加形成的眼图。

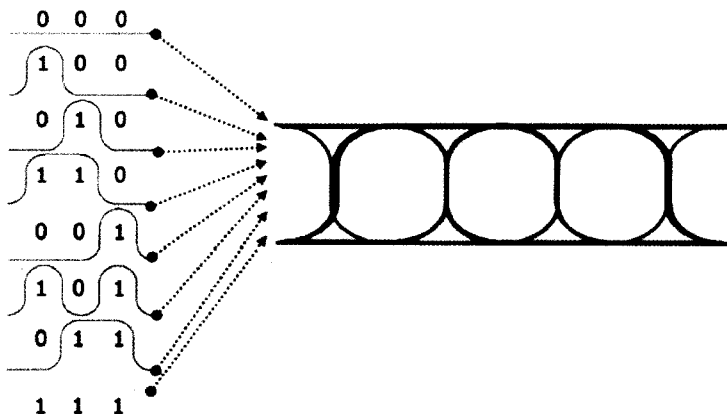


图1 位序列叠加形成的眼图

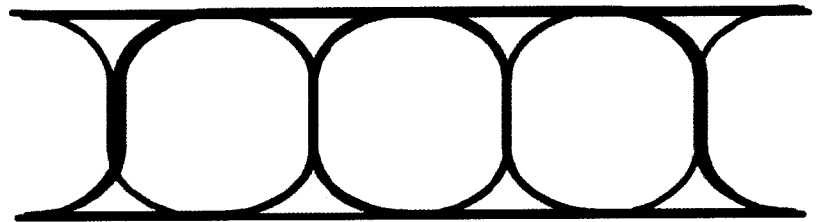


图2 使用一个全速率时钟触发形成的眼图

### 1.1 眼图能告诉我们什么

眼图显示信号的参数信息,如系统带宽等物理层所产生的影响,这并不显示协议层或逻辑层的问题,如果一个逻辑1在眼图上是好的话,这并不表明该系统发送一个0事实。但是,如果该物理系统的逻辑1在眼图上失真的话,当逻辑1通过系统传送到远端的接收机就会错误的当作一个0,这还应该是一个良好的眼图。

表征一个眼图常见的方法是测量的上升时间、下降时间、在眼图中间

交叉点的抖动、过冲,和许多描述眼图行为其它数值。仪器通常提供自动测量,简化和加快眼图测量的任务。

### 1.2 不同触发对眼图的影响

在测试设备上构建的许多眼图使用重复的测试码型,例如利用BERT(误码率分析仪)生成PRBS码型。这种仪器设备通常可以产生触发信号的类型有:

- 1) 同一速率的时钟触发,并与数据信号同步;
- 2) 时钟分频触发,分频比是数据速率是2的幂,如 $\div 4$ 、 $\div 16$ 等;
- 3) 码型触发—码型重复一次就提供一个触发信号;
- 4) 数据本身可以作为一个触发;
- 5) 最后一个方法是通过从数据信号中进行时钟恢复来获取触发信号,见图2。

当用来构造波形时,每种方法将会提供了不同的结果。

### 时钟触发

时钟触发提供了一个经典的眼

图，在眼图中包含了所有可能的位跳变。

### 分频时钟触发

分频时钟触发也可以产生眼图，当用来测量眼图的仪器的触发输入带宽比被测信号的数据速率窄时，这可能是非常有用。只有当该码型的长度分割和分频比是一个整数，这种方法能产生很好的眼图，例如一个128位的码型使用一个 $\div 4$ 时钟观测。利用分频时钟触发构建眼图，触发信号将与码型的每个时间的同位同步，而始终会丢失其它部分码型—导致一个不完整的眼图，见图3。

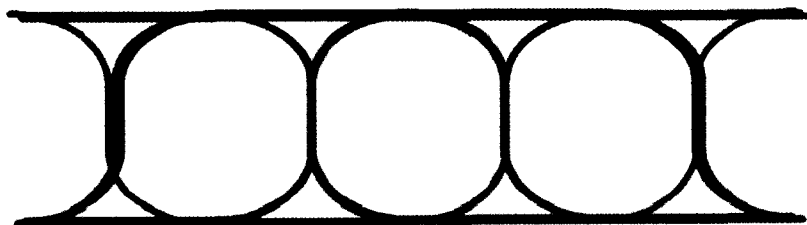


图3 使用一个分频时钟触发形成的眼图

### 码型触发

码型触发用于显示码型中的各个位。要查看完整的码型，用户必须是通过改变示波器的时基或改变码型触发位置。由于时基电路的某些弱点，通过改变示波器时基的方法会导致增加明显的抖动；增强的码型触发，无论是在BERT还是在一些更复杂的示波器内都可以很好的避免这个问题，见图4。

### 数据触发

数据触发是构建眼图最差的方法，只应作为一种快速查看。数据触



图4 使用码型触发捕获一个位序列

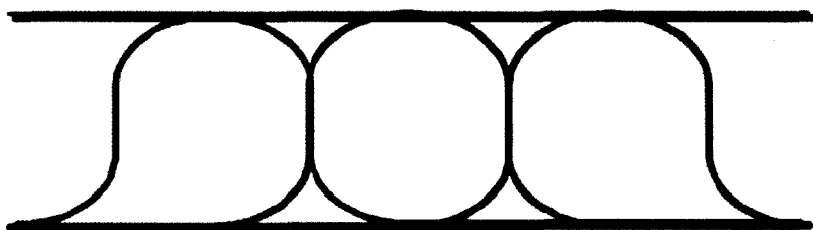


图5 由数据触发形成不完整的眼图

发是运行相同的字符，没有跳变来触发，所以一个完整的眼图几乎是不可能实现的，见图5。

离光纤通讯，在发送端的时钟和接收端的数据的关系在传输路径中可能被快时变效应损坏；

● 最后的情况，接收机使用了时钟恢复，需要查看接收端的眼图也需要时钟恢复（这可能需要一些标准，特别是对抖动测试）。

时钟恢复的电路通常有一个环路带宽，或者具有过滤功能，消除从数据信号带来的时钟抖动。根据不同的测量，需要深入理解，有时是有用或有时有害的。

窄的环路带宽时钟恢复往往恢复出一个稳定的时钟触发信号作为参考，任何抖动、或与时间边沿的变化都会在数据眼图中显示。这是一个有用的绝对测量抖动，但可能无法正确

### 利用恢复时钟触发

利用恢复时钟触发在日益复杂系统中，这种方法有一些优点：

- 在某些情况下，没有时钟信号可用，所以必须通过其它的设备来恢复时钟；
- 在一些其它情况，尤其是长距

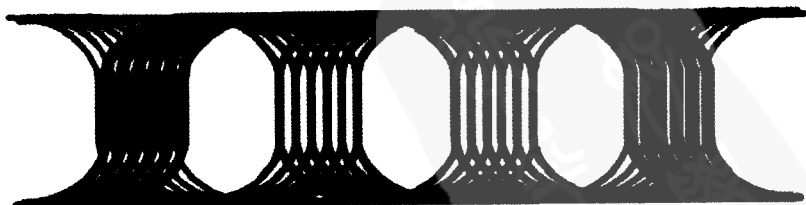


图6 采用窄的环路带宽时钟恢复单元从数据恢复时钟信号触发形成的眼图

反映一个真实的系统（如果使用了时钟恢复的接收机会跟踪一些抖动），见图6。

### 宽频带时钟恢复

宽频带时钟恢复通过时钟往往让一些抖动存在数据中。这就意味着，向一个方向和另一个移动边缘就产生数据抖动；恢复的时钟可以跟踪这个抖动，由此产生的眼图只有很少抖动。这种跟踪功能是许多系统接收机的工作方式，以减少通过该系统上的抖动，见图7。

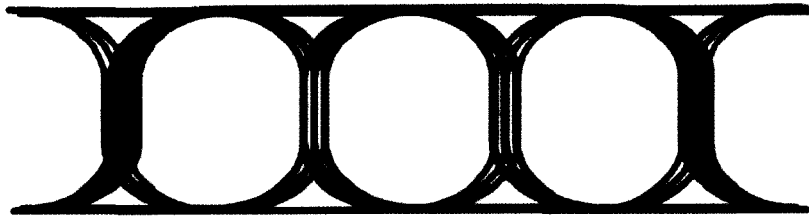


图7 采用宽的环路带宽时钟恢复单元从数据恢复时钟信号触发形成的眼图

条件也可以产生相反的效果—数据信号和触发信号之间延迟就是这样，当数据边沿正在朝着一个方向的最远的程度移动，用作触发的恢复时钟信号从相反方向最远的范围移动恢复出来的，以及由此产生的数据眼图显示为抖动的两倍，见图8。

而最后的情况是很少可取的，前面的两种情况，所有的抖动都会在眼图上显示出来，其中大多数抖动会被

跟踪，使用时钟恢复的哪些功能取决于测量要求。幸运的是，大多数标准规定了测量要求触发机制。

### 2 眼图和BER

虽然眼图提供了系统性能一个方便和直观表现，但是位是否正确，有没有错误，还最终需要系统自己的能力来判断。BER误码仪，可以测量所收到的错误位和所有位的比例。误码分析仪为判断系统的性能的好坏提供了一个良好的验证方法，但误码分析仪不能告诉我们系统的性能为什么可

能会低于预期。应该指出的是，BER是测试逻辑性的问题和参数的（无论是否在正确的位首先发送）。

那么，为什么不把眼图和误码分析仪联系在一起呢？一个完美的眼图会显示所有可能的位序列的所有参数，不论是偶尔出现一些问题。换言之，眼图含有很高的信息深度。通常情况下，眼图是由电压/时间采样数据组成的。对于取样示波器，每秒只

获取105个样本。这意味着大多数眼图是由很少测试样本组成，不容易发现一些罕见偶发的事件。

当问题偶尔出现的话，这将成为一个问题。这些问题可能是码型相关的、噪声相关或从串扰和其它形式的干扰所产生的影响。这些可能无法在示波器的眼图看得见，但防止影响到所需的性能水平。例如，系统往往要求误码率好于百万分之一， $1 \times 10^{-12}$ 误码率，而眼图只能显示小于 $1 \times 10^{-5}$ 的发生概率事件。

这信息鸿沟可以通过多种方式解决。首先利用更高采样效率测量的电压/时间样本构建眼图，这个系统，如BERTScope，允许快速、简单的观测眼图，并比采用示波器眼图测试样本多三个数量级。

第二个解决方案是使用误码仪的样本数据，能更好地看到将影响系统性能的罕见事件。

典型的接收机设计都是在瞬间信号是否高于或低于某一特定阈值电压作出判断，见图9。

由此决定输入信号是一个数据1还是数据0。聪明的系统设计人员尽可能把判决点放在上升沿、下降沿、高电平、低电平地方，换句话说眼图最不容易闭合的地方通常是中心。BERT仪器可以移动到这一决定的最佳判决位置点之外的时间或电压位置。通过移动判断点，有可能探讨的眼图其它部分，并通过测量遇到的错误，侧面剖析眼图。

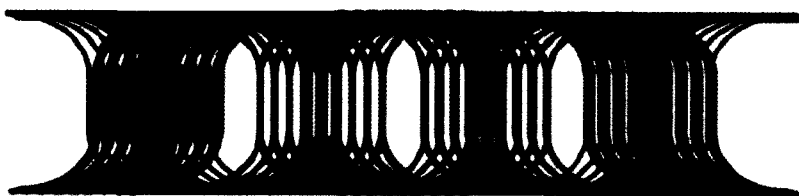


图8 含有抖动的时钟和含有抖动的数据之间延迟形成的眼图

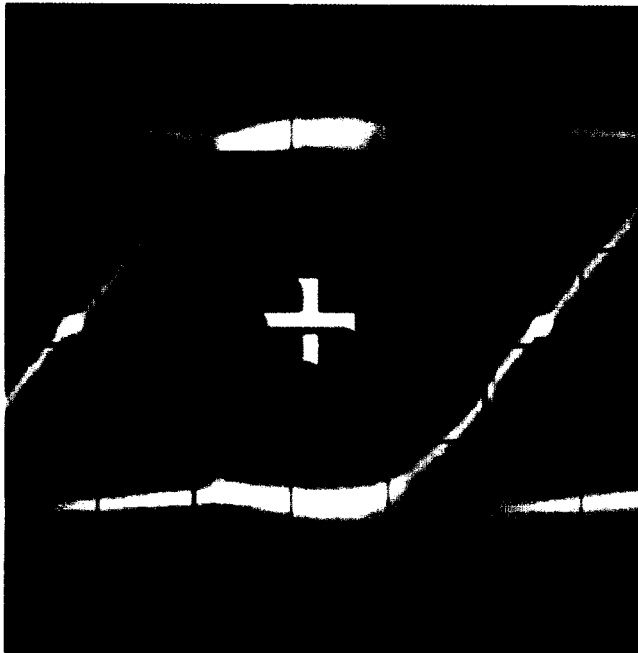


图9 一个接收端的判决点在眼图中间

### 3 各种测量

#### 抖动测量

抖动测量是伴随误码率测试一起的常见测量，通过探测眼图交叉点进行分析出来的结果。这种测量方法有BERTScan、浴盆抖动、抖动、抖动峰值等各种名称。更充分详细的说明见MJSQ。由BERT测量抖动的优点是BERT误码分析仪可以看到每一个比特位，所以是最有可能捕获罕见的抖动事件，见图10。

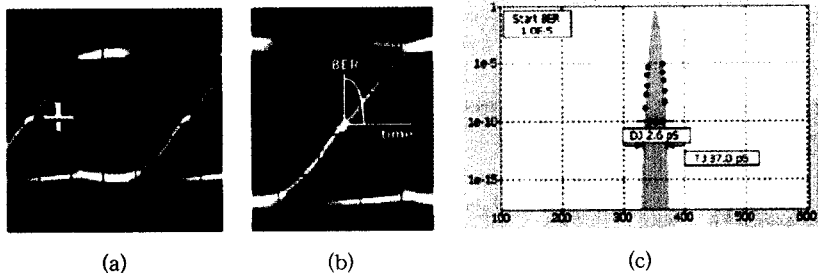


图10 从时间方向移动BERT判决点描绘出交叉点BER轮廓图

#### 信噪比测量

信噪比测量第二个常见的眼图测试就是Q-因子测量。Q-因子测量特别对性能受噪声影响系统非常有用。描绘眼图中的1和0垂直电平BER轮廓。测量沿眼图中间的误码率滚降方式来显示系统噪声的大小，以及它将如何影响系统，见图11。

#### BER轮廓测量

BER轮廓测量是最后两个测量的扩展集，也是眼图和BER误码率之间的完美联系。这里的判决点在眼图内部周围按步进改变，围绕眼图周围的一系列角度切片就绘出了BER误码率轮廓图。这提供了系统参数可能有问题的更完整和清晰的图片。泰克BERTScope经过优化，使之成为能够快速测量BER轮廓，见图12。

### 4 其他测量问题

#### 4.1 测量速度的需求

以上这些测量的实际问题是，单光标误码仪测量速率10 Gb/s的数据，测量 $1 \times 10^{-12}$ 误码率需要几分钟。由于许多系统预期功能优于 $1 \times 10^{-15}$

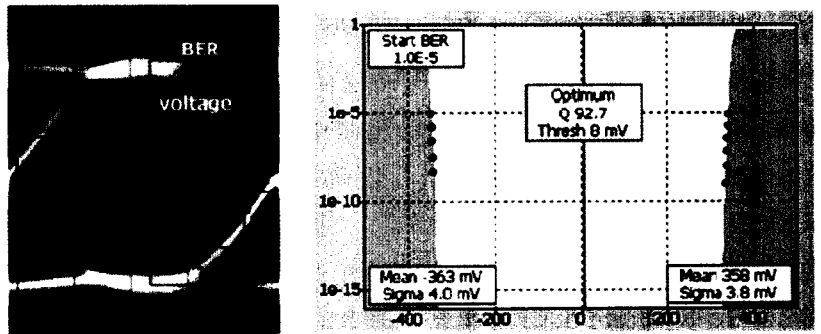


图11 从电压方向移动BERT判决点描绘出1和0电平的BER轮廓图

误码率，单光标误码仪可能需要几个月来测量。因此，能够更快地进行测量，然后利用测量的数据进行推算更深的误码是有价值的。测量BER误码率轮廓测量很快。

#### 4.2 测试发射机

测试发射机通常测眼图。由于测

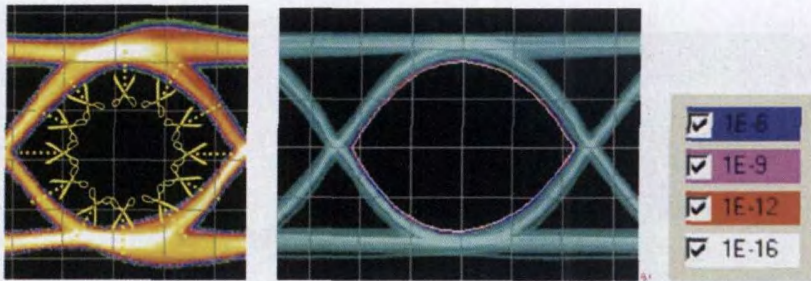


图12 沿多个轴的切片眼图，形成眼图轮廓

问题，它根本不具备在很短的时间来捕获罕见事件的数据深度，然而BERTScope在几秒钟比其它仪器采集更多的样本数据进行模板测试，见图14。

### 4.3 测试通道

通道可以作为一个独立的单元测试，或作为发射端和链路的组合来测

试设备输入端特点各有不同，国际标准(例如用于测试光发射机设备ITU国际电信联盟)设计了标准化的测试方法，称为参考接收机。输入滤波器也用在现在的一些电气标准，见图13。

测量系统的整体频率响能够很好的被设计：四阶Bessel-Thompson曲线在规定的容限窗口内，比特率的0.75在系统-3 dB点。从理论上讲，这意味着利用以不同的仪器进行的测量应该是兼容的。

模板测试是在制造业快速进行发射端简化的眼图测量。并不测量眼图的所有参数，模板测试定义了眼图的关键区域，这些区域称为“敏感区”，如果检测到任何信号落到这一区域，则设备失败(不合格)。模板测试是往往在几秒钟内完成。应该指出的是，模板测试仅仅检测发射端的总

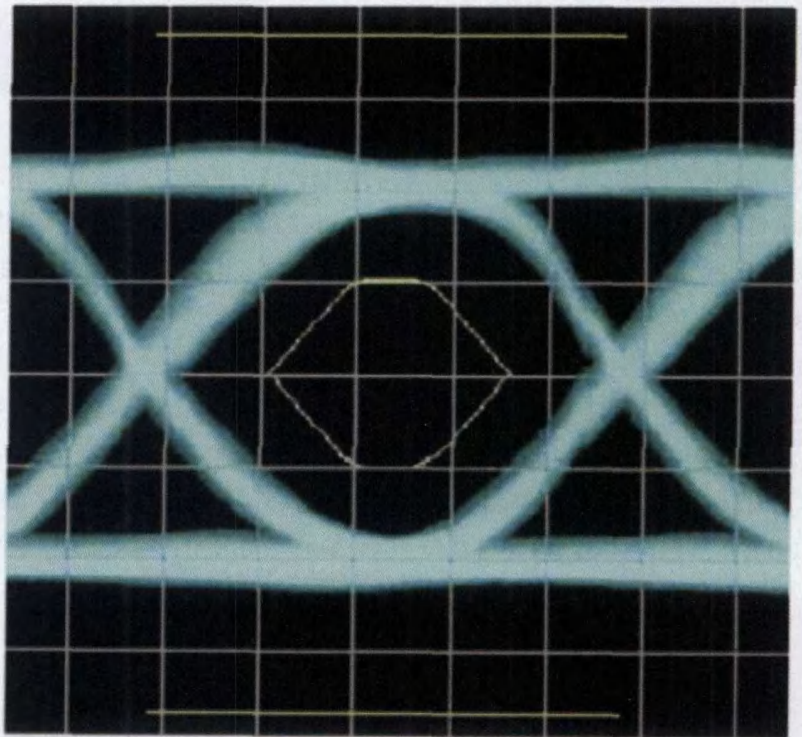


图14 眼图模板测试

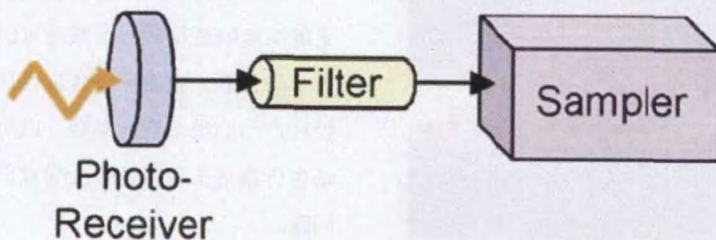
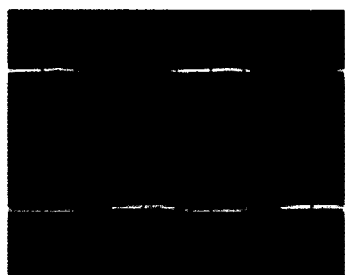


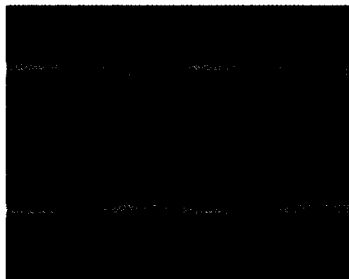
图13 参考接收机框图

试。作为一个独立的链路测试通常是进行如损耗、衰减、反射和色散参数测量。这适用于光链路和电气链路，但在短距离电传输如背板，S参数测量往往作为上述所有参数的准确地表征。作为一个独立的实体传输链路表征的挑战是如何转换成测量眼图和误

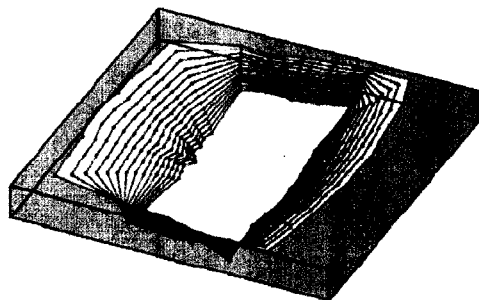




(a) 眼图



(b) BER Contour 误码率轮廓



(c) 眼图碗状图

图15 三维BER轮廓-眼图碗状图

码率相连起来。如StatEye建模程序将其参数表征转换成预测的BER轮廓。

另一种衡量方法是测量一个具有代表性的发射端和通道链路。这种测试方法的缺点是测试结果是发射端和通道链路共同作用的结果，优点是可以直接测量眼图特性和误码率性能。用来生成一个测量误码率轮廓，然后可以与用一个如StatEye建模软件的模拟结果进行比，这可能是有用的。

#### 4.4 三维BER轮廓-眼图碗状图

可以通过绘制三维BER轮廓，可以得到能包括偶发事件的影响、良好

的可视化的眼图，如图15。

#### 4.5 测试接收机

传统的接收机测试只是误码率测试，而不进行眼图相关测试。输入信号到接收机，慢慢减少输入信号的幅度大小，在然后看接收机在极限条件是否能正常工作。如果接收机是能够正常工作并无错误码，那么合格。

#### 4.6 测试接收机

传统的接收机测试只是误码率测试，而不进行眼图相关测试。输入信号到接收机，慢慢减少输入信号的幅度大小，在然后看接收机在极限条件

是否能正常工作。如果接收机是能够正常运行并无错误码，那么合格。

对接收机测试感兴趣的是测量抖动容限，或接收机对每个输入位能够正确接收的能力(甚至信号数据边沿有抖动)。如前所述，时钟恢复往往会消除这种抖动。在SONET/SDH传输系统，通过注入正弦抖动(根据模板，这个正弦信号的幅度和频率是变化的)对数据边沿按时间方向移动进行抖动容限测试。最近，又引入压力眼的概念，就是数据的边沿是用各种不同的方法变坏。这已经发展到不仅仅是一个抖动测试，例如加入了幅度方面的损伤。总的来说，压力眼被设置为最坏的情况下测试接收机的运行情况，如果是能够在这样一个信号下没有出现错误，则该设备合格，见图16。

### 5 总结

如果采集的样本数据正确，并有足够深度的数据，一个眼图可以包含大量的信息。眼图可以告诉设计者所设计产品的很多性能参数，以可以现场告诉制造工程师是否会导致以后的问题。

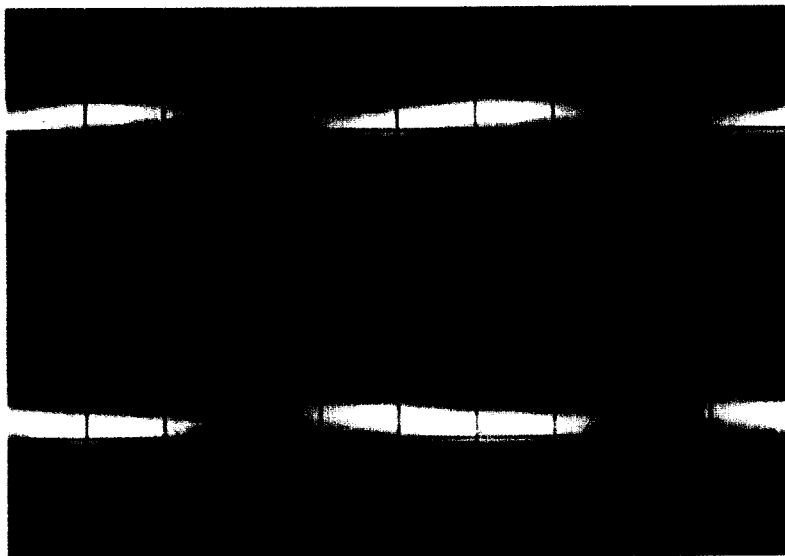


图16 带压力的眼图