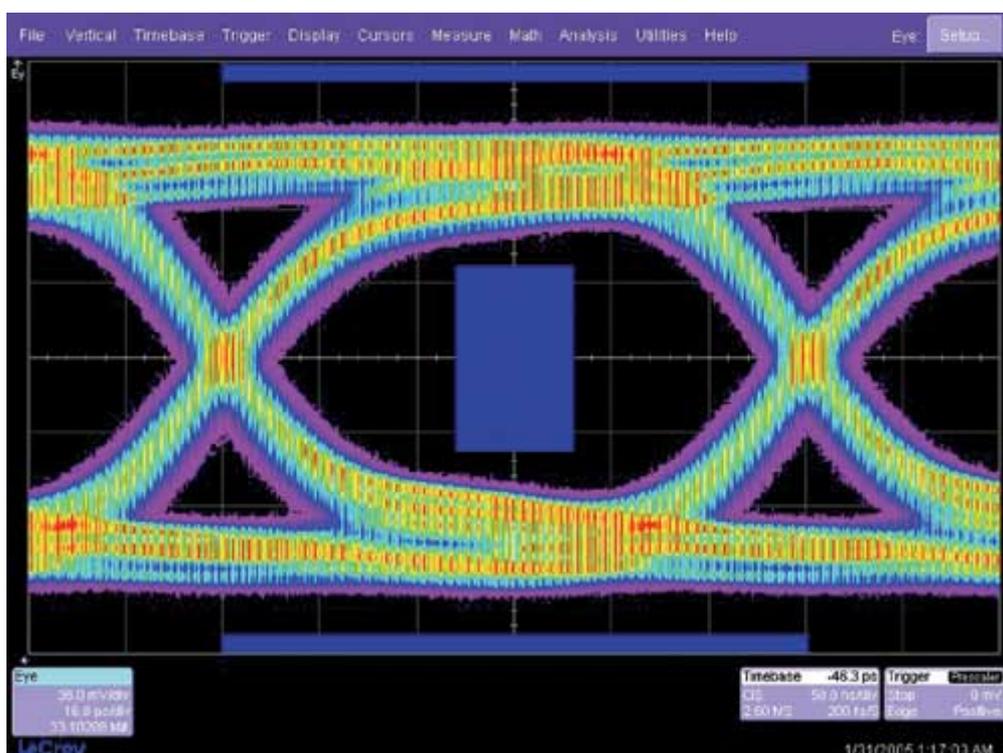


## 眼图测试及其疑难问题探讨

关键词:DWDM, 眼图, 城域网,MAN

摘要:目前,在长途干线和城域网中,密集波分复用(DWDM)系统的应用越来越多,对 DWDM 系统的光接口测试要求也越来越高,其中包括光发送信号的眼图测试。在实际进行眼图测试时,经常遇到不符合标准模板的情况,在不断实践中发现,其中大部分是因为测试方法不完善造成的误判断,只有小部分真正不符合 ITU-T 规范。文章介绍正确测试眼图的要点。



### 1、码间串扰的形成

#### 1.1 光纤线路码

在光纤数字传输中,一般不直接传输由电端机传送来的数字信号,而是经过码型变换,变换成适合在光纤数字传输系统中传输的光纤线路码(简称线路码)。

有多种线路码型,最常用的有 mBnB 分组码、插入比特码和简单扰码。在选择线路码时,不仅要考虑光纤的传输特性,还要考虑光电器件的特性。一般来说,由于光电器件都有一定的非线性,因此采用脉冲的“有”、“无”来表示“1”和“0”的二进制码要方便得多。但是简单的二进制信号有三个实际问题需要解决,否则无法取得良好效果。a) 不能有长连“0”或长连“1”出现。因为长连“0”和长连“1”会使定时信息消失,给再生中继器和终端接收机的定时提取带来困难。b) 简单的二进制码中含有直流成分,“0”、“1”码出现个数的随机变化会使直流成分的大小也随机变化。目前,在光接收机中普遍采用交流耦合,直流成分的变化会引起信号基线浮动,给判决再生带来困难。c) 简单的二进制信号在业务状态下无法监测线路误码率。为此,在光纤传输之前,需将简单二进制信号变换成适合光纤传输系统的光纤线

路码型。CCITT 最终采用简单扰码方式（如 RZ、NRZ 码），目前又有基于 RZ 码新的编码方式，如 CS-RZ、DCS-RZ、CRZ、D-RZ、DPSK-RZ 码等。

## 1.2 线性网络的无失真传输条件

密集波分复用（DWDM）的工作原理是：发送端将不同波长的光信号通过光合波器合成一束光，送入光纤中进行传输；在接收端由光分波器将这些不同波长的光信号区分开来，再经过光电转换送入线路终端设备。这个过程既包括光通道也包括电通道。

对于光通道来说，主要是光纤的色散和非线性效应引起传输的光脉冲展宽，导致“0”、“1”判决出错，增加了传输误码率。通过运用色散补偿光纤、色散斜率补偿技术等色散管理来降低光纤的色散。对于光纤非线性效应，一般可通过降低入纤功率，采用新型大孔径光纤、喇曼放大、奇偶信道偏振复用等方法加以抑制。采用特殊的码型调制技术也可有效提高光脉冲抵抗非线性效应的能力，增加非线性受限传输距离，从而达到光通道的无失真传输这种理想化的状态。

对于电通道来说，实际传输中无法满足无失真传输条件，特别是由于信道频率特性不理想，使矩形脉冲在经过传输后有明显的上升时间和下降时间，会使波形有明显展宽。每个符号（码元）在时间上前后展宽会对其前后符号（码元）造成干扰，通常把这类干扰称为符号（或码元）间干扰，它会引起传输系统的误码率恶化。

## 1.3 时域均衡

系统线性失真引起的符号间干扰是影响传输质量的主要因素。线性失真的主要原因是发送滤波器、接收滤波器及信道共同组成的波形形成系统的传递函数偏离理想状态。在不考虑噪声影响时，大多数高、中速数字数据传输设备的判决可靠性都建立在消除取样点的符号间干扰的基础上，按此要求建立的线性失真补偿系统称为时域均衡器，其原理是利用接收波形本身进行补偿，消除取样点的符号间干扰，提高判决的可靠性。

时域均衡系统结构如图 1 所示。

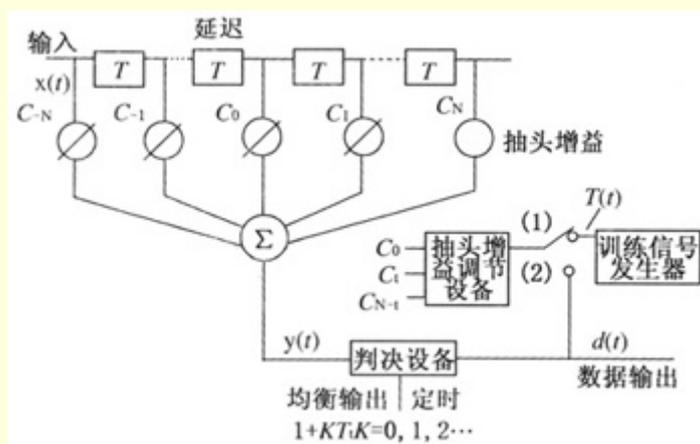


图 1 时域均衡系统结构

时域均衡系统的主体是横截滤波器，它由多级抽头延迟线、可变衰减器（或可变增益放大器）和求和器组成的线性系统。输入信号  $x(t)$  经过  $2N$  节全通延迟线，每节的群时延  $T = (2fH)^{-1}$  ( $fH$  为传输系统的奈氏频率)。在每节延迟线的输出端都引出相应的信号  $x(t-nT)$  (或简写成  $x_n$ )，分别经过增益系数为  $C_k$  ( $k=-N, \dots, N$ ) 的乘法器加权后在求和器中相加 (代数和)，形成输出信号  $y(t)$ 。其中加权系数  $C_k$  是可调的，可正可负。所有系数值都对中心抽头系数  $C_0$  归一化。

设符合奈氏第一准则要求的理想传输系统的脉冲响应是  $h(t)$ ，实际系统的脉冲响应是  $x(t)$ 。由于信道等缺陷，数字数据信号通过实际传输系统后会产生线性失真，使  $x(t)$

在各奈氏取样点 ( $t=k/2fH, k=\pm 1, \pm 2, \dots$ ) 的取样值不再为 0，其符号间干扰为  $\sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} x_k$  (这里的求和符号表示求和时不包括  $k=0$  的一次)。接入由横截滤波器组成的均衡器后，输出响应为：

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)q(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

其中， $q(t)$  是横截均衡器的冲激响应。按图 1 结构，将

$$q(t) = \sum_{k=-N}^N C_k \delta(t-kT) \text{ 代入 (1) 式得:}$$

$$\begin{aligned} y(t) &= \int_0^t x(t-\tau) \sum_{k=-N}^N C_k \delta(\tau-kT) d\tau = \sum_{k=-N}^N C_k x(t-kT) \\ &= \sum_{k=-N}^N C_k x_{n-k} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式说明，接入横截均衡器后，系统输出波形  $y(t)$  为  $2N+1$  个经过不同时延的  $x(t)$  的加权和。对于一个  $x(t)$ ，只要适当选择横截均衡器的抽头增益系数  $C_k$  ( $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N$ )，就可能使  $y(t)$  在除  $k=0$  外的各奈氏取样点的取样值趋于 0，

即  $\sum_{\substack{k=-N \\ k \neq 0}}^N y_k \rightarrow 0$ 。

虽然均衡的范围只在  $k=\pm N$  之内，但  $y(t)$  通常总是随  $T$  的增加迅速衰减的，因此，只要抽头数 ( $2N+1$ ) 足够，就能保证在  $k=\pm N$  之外的所有  $y_k$  所形成的符号间干扰足够小，不会影响符号判决的可靠性。

根据以上分析，横截均衡器要能消除控制长度内的符号间干扰 (共包括  $2N$  个取样点)，关键在于选择最佳各个抽头增益系数  $C_k$ 。对取样点  $n$  来说，它前后  $N$  个符号 ( $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N$ ) 在  $n$  取样时对第  $n$  个符号造成的符号间干扰应为零 (共有  $2N$  个方程)，加上在  $n$  点， $y_n$  本身应为 1 (归一化值)，共可建立起长度为  $2N$  的横截均衡器的 ( $2N+1$ ) 个独立线性方程组：

$$\begin{cases} y_{n-N} = \sum_{k=-N}^N C_k x_{n-N-k} = 0 \\ y_{n-(N-1)} = \sum_{k=-N}^N C_k x_{n-(N-1)-k} = 0 \\ \vdots \\ y_n = \sum_{k=-N}^N C_k x_{n-k} = 1 \\ \vdots \\ y_{n+N} = \sum_{k=-N}^N C_k x_{n+N-k} = 0 \end{cases}$$

这个联立方程的解就是使符号间干扰极小的最佳横截均衡器抽头增益系数集合  $C_k$  ( $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N$ )。由于建立最佳抽头增益系数的方法不同, 可把横截均衡器分为手动均衡器、自动预置式均衡器和自适应均衡器三大类。

## 2、眼图测试方法

### 2.1 眼图基本概念

眼图 (eye pattern) 是一种直观而实用的分析符号间干扰的手段。

在用余辉示波器观察传输的数据信号时, 使用被测系统的定时信号, 通过示波器外触发或外同步对示波器的扫描进行控制, 由于扫描周期此时恰为被测信号周期的整数倍, 因此在示波器荧光屏上观察到的就是一个由多个随机符号波形共同形成的稳定图形。这种图形看起来象眼睛, 称为数字信号的眼图。二电平数据信号眼图如图 2 所示。

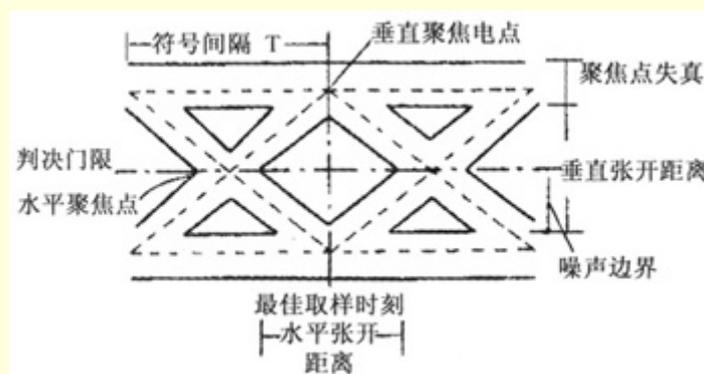


图 2 二电平数据信号眼图

二进制信号传输时的眼图只有一只“眼睛”, 当传输三元码时, 会显示两只“眼睛”。眼图是由各段码元波形叠加而成的, 眼图中央的垂直线表示最佳抽样时刻, 位于两峰值中间的水平线是判决门限电平。

眼图显示了数据波形可能取得的所有瞬间值。在完全随机输入情况下，各个波形叠加后会在眼图中形成若干眼孔。眼孔的开启状况能充分说明传输信号的质量。在有符号间干扰和噪声的情况下，眼图由许多有一定偏移的线条组成，看起来犹如构成眼图的线条变宽了。这等效于眼图聚焦点扩散，水平和垂直方向眼睛的张开程度都减小了。为了便于说明，常把二电平信号的眼图模式化。眼孔在水平轴上的交叉点称为水平聚焦点，两个聚焦点间的距离称为眼图的水平张开距离。眼孔的最大垂直距离称为眼图的垂直张开距离。

在无码间串扰和噪声的理想情况下，波形无失真，“眼”开启得最大。当有码间串扰时，波形失真，引起“眼”部分闭合。若再加上噪声的影响，则使眼图的线条变得模糊，“眼”开启得小了，因此，“眼”张开的大小表示了失真的程度。由此可知，眼图能直观地表明码间串扰和噪声的影响，可评价一个传输系统性能的优劣。另外也可以用眼图对接收滤波器的特性加以调整，以减小码间串扰，改善系统的传输性能。

ITU-T 以发送眼图模板的形式规定发送机的光脉冲形状特性，它包括上升、下降时间、脉冲及振荡。

## 2.2 测试框图

眼图测试框图如图 3 所示。

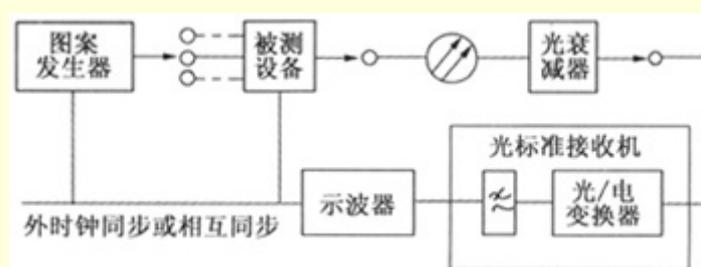


图 3 眼图测试框图

图案发生器是一个统称，接在被测设备的输入口。使用的仪表与被测设备的输入口等级有关。示波器也是一个统称，实际使用的仪表可以是通信信号分析仪。光标准接收机可以是通信信号分析仪的一个附件，也可以是一台独立的仪表。

## 2.3 测试步骤

a) 按图 3 接好电路。b) 按输入口的速率等级，图案发生器选择适当的二位式伪随机信号 (PRBS)，接入输入口。c) 调整光衰减器，使光/电转换器有合适的输入光功率。d) 调整示波器，调用相应模板，获得稳定的波形，并由人工调整或由仪器自动对准，使波形与模板之间位置最佳。

## 2.4 测试参数

光发送信号眼图模框如图 4 所示，参数见表 1。

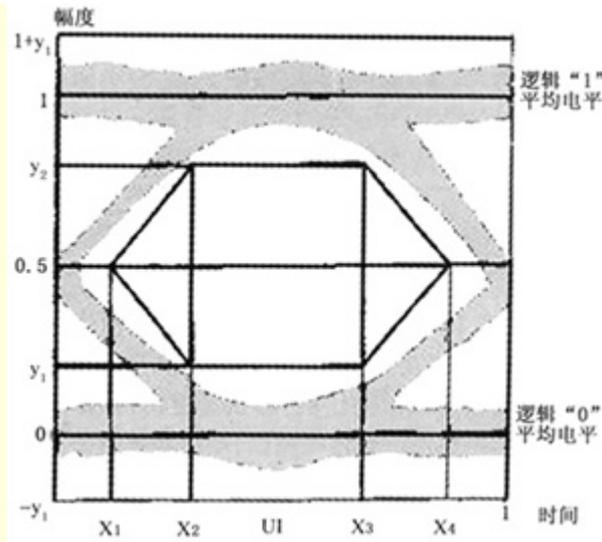


图 4 光发送信号眼图模框

表 1 光发送信号眼图模框参数

	STM-1	STM-4	STM-16
$X_1/X_4$	0.15/0.85	0.25/0.75	
$X_2/X_3$	0.35/0.65	0.40/0.60	
$Y_1/Y_2$	0.20/0.80	0.20/0.80	0.25/0.75
$X_3-X_2$			0.2

对于 STM-16，直角眼图模板的 X2 和 X3 相对于 OUI 和 1UI 处纵轴不一定等距离，偏差范围有待进一步研究。考虑到 STM-16 系统的频率及相应的滤波器实现的困难性，用于 STM-16 的参数值需要根据经验稍做调整。

### 3、主要测试仪表及疑难问题

#### 3.1 主要测试仪表

光发送信号眼图的测试工具光示波器主要有安捷伦公司（Agilent）的 83480A、86100B 和泰克公司（Tektronix）的 CSA803A、CSA8000、CSA7154 等。据笔者对上述仪表的使用经验，它们各有优缺点。

##### 1) 仪表的组成结构不同

安捷伦公司的 83480A、86100B 和泰克公司的 CSA8000、CSA7154 只有一台主机，它们的光/电转换器集成在主机的测试模块中，仪表紧凑，相对体积较小。泰克公司的 CSA803A 包括一台主机和多个外接式光/电转换器，相对体积较大。

##### 2) 测试方案不同

安捷伦公司的 83480A、86100B 对被测光发送信号进行光/电转换，获得稳定的测试信号显示后，从仪表程序中调出标准模板，再进行人工调整，看被测试信号是否落入标准模

板之内。由于仪表响应速度慢，而操作人员手动调整过快，可能造成测试困难，特别是当被测信号不符合模板时，会使测试时间延长。但是采用这种方案不会对被测光发送信号的眼图是否符合眼图模板做出误判断。

泰克公司的光示波器对被测光发送信号进行光/电转换，获得稳定的测试信号显示后，从仪表程序中调出标准模板，仪表能自动对被测光信号进行调整，使其适应模板的比例，测试速度快，操作人员易于操作。但是由于是自动测试，对那些被测光信号的眼图位于标准模板临界位置时，可能会造成误判断，此时需要人工进行微调，看被测光信号的眼图是否超出标准模板。

### 3.2 测试疑难问题

#### 1) 被测光信号的强度对测试准确度的影响

光示波器的接收端配有一个光/电转换器，将被测光信号转换成电信号，此电信号又分成两路，一路作为触发信号对光示波器的扫描进行控制，另一路作为被测信号。由于扫描周期与被测信号的周期是相同的，因此，在示波器荧光屏上能观察到稳定的眼图。从光示波器的测试过程可见，光示波器接收端的光/电转换的准确与否对眼图的正确测试有很大影响。众所周知，光强度的强弱对光器件的正常工作有一定影响，光强度太强会使光接收机产生“饱和”，时间一长甚至会损坏光器件。光强度太弱，会使光接收机无法正常工作。所以光接收机有工作范围，在此范围内又有一段光/电转换最佳区域。经过笔者多次试验得出最佳区域为 $-6\text{dBm} \sim -10\text{dBm}$ 。测试人员也可以对自己的光示波器进行同样的试验，找出光/电转换的最佳输入光功率范围。

#### 2) 被测光信号眼图调整对测试准确度的影响

通过对多个电信运营商的 DWDM 干线设备、城域网设备的眼图测试，发现绝大多数接口板的光发送信号眼图垂直聚焦点失真，具体表现为眼图的上水平线变宽，甚至有分叉现象。在用泰克光示波器进行自动模板匹配测试时，眼图的上水平线太宽，不符合标准模板要求。出现这一问题的主要原因有：a) 二进制码中含有直流成分，“0”、“1”码出现个数的随机变化会使直流成分的大小也随机发生变化。直流成分的变化会使眼图的下水平线变宽，并使示波器的眼图触发电平不稳定，致使在进行自动模板匹配测试时信号基准线浮动，造成误判决。b) 被测设备接口板本身的线性失真补偿系统不合适。

对由于第一个原因造成的被测光信号无法通过眼图标准模板测试，可以通过垂直移动被测信号，看被测信号的垂直张开距离是否足够大。如果被测信号的垂直张开距离足够大，并且不影响标准模板的判决，仍然可以认为此光发送信号眼图符合 ITU-T 规范，这样可以避免绝大部分由光示波器自动测试造成的误判断。

对于由于第二个原因造成光发送信号眼图测试不符合标准模板的情况，只能通过更换被测设备的光接口板来解决。

作者：昌炯 来源：网络与通信