

高速信号眼图测试中夹具影响的校准

孙建伟,张胜利,王幼林,谢 亮,祝宁华

(中国科学院半导体研究所,北京 100083)

摘 要: 为了在器件的高速信号眼图测试中去除夹具的影响,本文首次提出了一种利用时域和频域测量相结合,通过快速傅立叶变换和反变换,对眼图测试校准的方法,并进行了实验验证.实验发现校准后眼图的张开高度、Q因子、上升时间、下降时间、峰峰抖动等参数改变明显,并且校准后的眼图与直接测试结果符合得很好.

关键词: 眼图;夹具;快速傅立叶变换;传输函数

中图分类号: TN707 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 09-1563-03

Correction of the Fixture Effect on the High Speed Eye Diagram Measurement

SUN Jian-wei, ZHANG Sheng-li, WANG You-lin, XIE Liang, ZHU Ning-hua

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: To correct the fixture effect on the device used in high speed eye diagram measurement at high bit rates above Gb/s, a correction method based on time domain measurement, frequency domain measurement and fast Fourier transforms has been proposed. Under the guidance of the proposed method, experiments were designed and performed. It is found that the corrected eye diagram fits the directly measured eye diagram very well and the corrected parameters, such as eye height, Q factor, rise time, fall time and peak-to-peak jitter, are very different from the uncorrected parameters.

Key words: eye diagram; fixture; fast Fourier transforms; transfer function

1 引言

随着光纤通信和宽带光网络的发展,对传输速率的需求越来越高,高速光通信收发模块的速率已达 10Gb/s 并向 40Gb/s 发展^[1],其工作频率已经到达微波或毫米波阶段.这给电子和光电子器件及其测试带来很大的挑战.眼图是高速光通信中常用的测试手段.它既可以用于模块和系统,也可以用来评估测试器件,如:激光器、探测器、电路芯片、微带电路及匹配电路等.眼图的测试一般是通过高速示波器将很多个伪随机码序列波形互相重叠在一起显示而形成的.眼图测试可以反映被测器件的很多特性,如:上升时间、下降时间、抖动、振铃、消光比和 Q 系数等.

一般测试仪器的输入输出接口多为同轴接头,而被测器件的输入输出接口可能是其他形式,测试时需要加入端口连接器;同时器件测试时往往需要加入辅助器件(如偏置网络、耦合网络),所以很多情况下不可能把测试仪器与器件直接连接进行测量,必须借助测试夹具.测试夹具的引入及测试仪器的系统误差都会给测试结果带来影响.在工作频率较低的情况下,这些影响不太显著;然而当工作频率或比特率较高时(如大于 1Gb/s),这些影响必须予以重视.只有校准这些影响带来的误差,才能得到器件的准确特性.器件的测试可分为小信号测试和大信号测试.高速器件的小信号特性可用矢量网络分析仪进行测试,矢量网络分析仪及测试夹具的校准问题已有深入和完善的方法^[2].一般来说,眼图测试属于时域大信号测试.但到目前为止,还没有对器件的大信号特性进行直接

测量并对系统和夹具误差进行校准的有效方法. Komp^[3]提出一种同时利用小信号网络分析仪和采样示波器对器件的时域大信号波形进行测量并对系统和夹具的误差校准的方法.虽然用此方法可以得到器件的准确的大信号时域波形,但由于测试系统很复杂,不适合日常测试使用.因此如何能够找到一种简单而有效的方法,在眼图测试中校准夹具的影响,得到待测器件准确的眼图是一个亟待解决的问题.

一般来说,眼图测试系统所用的码形发生器和采样示波器在出厂前已校准到输入输出端口,在测试中由于源失配和负载失配给测试结果带来的误差可以忽略;在日常测试中,可能遇到各种各样的夹具,夹具的引入给测试结果带来的误差是主要的误差来源,这种误差在器件的工作频率或比特率较高时更为显著.为此,本文提出了一种利用时域和频域测量相结合,通过快速傅立叶变换(FFT)和反变换(IFFT),对眼图测试中夹具影响校准的简单而实用的方法.

2 校准原理

图 1(a)是对器件进行眼图测试的原理图.其中 Z_S 是码形发生器的内阻, Y_L 是示波器的导纳.对于常用的 50 系统, $Z_S = 1/Y_L = 50$.由于实际的测试必须借助测试夹具才能进行,所以图 1(a)所示的测试系统连接在实际测试时往往不能实现.假设实际测试系统连接如图 1(b)所示,此时示波器观察到的眼图实际上是夹具与待测器件的整体响应.为了得到器件的真实眼图,必须排除夹具的影响.

对于图 1(a)所示的系统,假设示波器所观察到的信号

$f_{out}(t)$, 在频域可以表示为:

$$f_{out}(f) = H_d(f) \cdot f_{in}(f) \quad (1)$$

其中 $f_{in}(f)$ 为码形发生器产生的频域信号; $H_d(f)$ 为包括码形发生器和示波器在内的系统传输函数. 若能得到 $H_d(f)$ 和 $f_{in}(f)$, 则可求得 $f_{out}(f)$, 进而通过反

傅立叶变换可得到待测器件的眼图.

为了得到 $f_{in}(f)$, 可以利用图 1(d) 所示的系统, 即码形发生器与示波器直接连接, 测得时域信号 $f_{out}(t)$, 通过 FFT 变换到频域 $f_{out}(f)$, 则:

$$f_{in}(f) = [f_{out}(f) / H_d(f)] \quad (2)$$

$H_d(f)$ 为码形发生器与示波器的整体传输函数. 它可以通过系统的 ABCD 矩阵得到^[4],

$$\begin{bmatrix} A_d & B_d \\ C_d & D_d \end{bmatrix} = M_s \cdot M_L = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_L & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 M_s 和 M_L 分别为码形发生器与示波器的 ABCD 矩阵. 则:

$$H_d(f) = 1/A_d = 1/(1 + Z_s Y_L) \quad (4)$$

对于确定的测试仪器, Z_s 和 Y_L 为已知量, 则可求得 $H_d(f)$. 同样, 图 1(a) 所示系统的 ABCD 矩阵可以表示为:

$$\begin{bmatrix} A_a & B_a \\ C_a & D_a \end{bmatrix} = M_s \cdot M_D \cdot M_L = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_L & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, M_D 为被测器件的 ABCD 矩阵, 为未知量. 由上式可求得图 1(a) 系统的传输函数为:

$$H_a(f) = \frac{1}{A_a} = \frac{1}{a + z_s c + (b + z_s d) Y_L} = \frac{1}{X + Y} \quad (6)$$

其中, $X = a + b Y_L$, $Y = c Z_s + d Z_s Y_L$. 由于被测器件可能为非线性器件, 其 ABCD 矩阵不能由它的小信号 S 参数得到, 因此欲求 $H_a(f)$, 必须通过图 1(b) 所示系统. 图 1(b) 系统的 ABCD 矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A_b & B_b \\ C_b & D_b \end{bmatrix} = M_s \cdot M_F \cdot M_D \cdot M_L = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_F & b_F \\ c_F & d_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_L & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 M_F 为夹具的 ABCD 矩阵. 考虑到 $Z_s = 1/Y_L$, 则传输

$$H_b(f) = \frac{1}{A_b} = \frac{1}{X(a_F + Z_s c_F) + Y(b_F Y_L + d_F Z_s Y_L)} \quad (8)$$

夹具一般为线性器件, 故夹具的 ABCD 矩阵可以由它的小信号 S 矩阵变换得到. 图 1(b) 所示系统的整体传输函数 $H_b(f)$ 可由冲激法得到^[6], 即由码形发生器产生的脉冲及其通过系统后的响应变换到频域并相除得到. 此时, 式(8)为关于 X、Y 的方程. 欲求得 X、Y, 则需要关于 X、Y 的另一独立方程. 这一方程可以换另一不同夹具 (称为辅助夹具) 重复上述

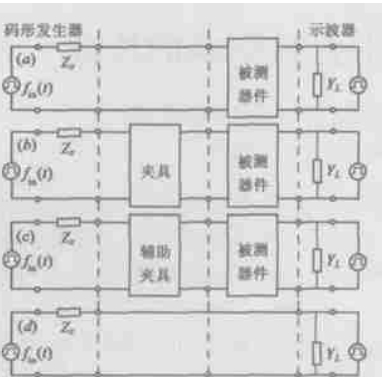


图 1 眼图测试系统示意图

步骤得到, 其系统测试连接如图 1(c) 所示. 解方程得到 X、Y, 可求得 $H_a(f)$.

3 实验验证

为了在实验上验证上述校准原理, 设计如图 2 所示夹具、辅助夹具及被测器件.

夹具和辅助夹具为共面波导, 被测器件为一 51 左右电阻. 它们的接口都为同轴 3.5mm SMA 接头, 既可以单独直接测试它们的时域信号和小信号 S 参数, 也可以组

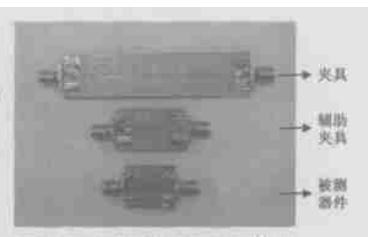


图 2 测试用夹具及被测器件

成图 1(b) 和 1(c) 所示系统进行测试, 以便校准结果和直接测试结果进行对比. 测试时域信号所用测试仪器为爱得万 (ADVANTEST) D3186 码形发生器 ($Z_s = 50$) 和泰克 (Tektronix) CSA8000 高速示波器 ($Y_L = 1/50$).

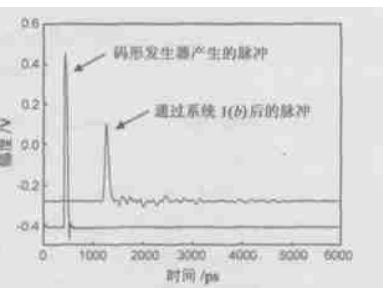


图 3 测量传输函数所用脉冲及响应

测量小信号 S 参数所用仪器为惠普 HP8720D 矢量网络分析仪.

图 3 为冲激法测传输函数 $H_b(f)$ 所用脉冲及其响应. 脉冲宽度约为 80ps.

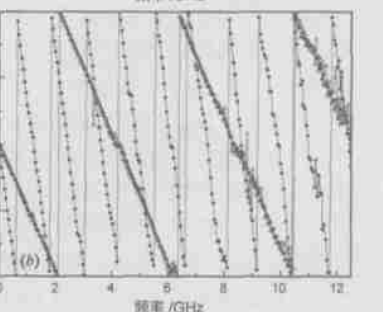
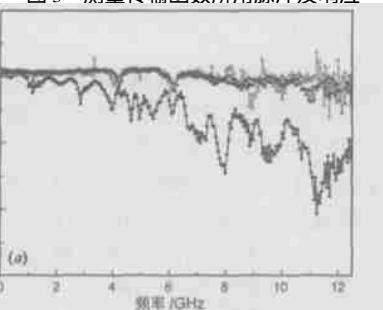


图 4 给出了校准前和校准后系统的传输函数. 其中图 4(a) 为幅频特性, 图 4(b) 为相频特性. 实心圆点曲线为未校准 (1(b) 所示系统) 的传输函数; 空心三角曲

图 4 传输函数的幅频和相频特性

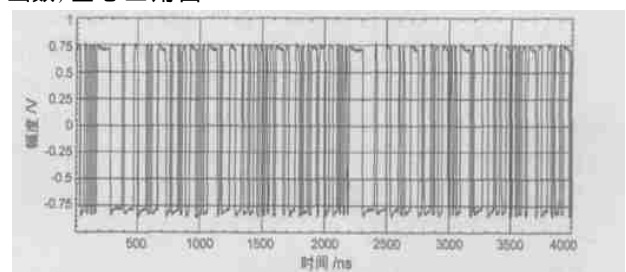


图 5 码形发生器的时域信号

线是校准后(1(a)所示系统)的传输函数;实心三角曲线是直接测得(1(a)所示系统)的传输函数.可以看出校准结果和直接测量结果符合的较好,证明原理可行.

在进行时域眼图测试时,所用信号为速率 2.5Gb/s、峰峰值 800mV、 2^7-1 模式的非归零伪随机码.图 5 是码形发生器与示波器直接连接时,测得的时域信号通过快速傅立叶变换到频域,代入式(2),再由反变换得到的码形发生器的时域信号,总位数为 250 位.图 6(a)

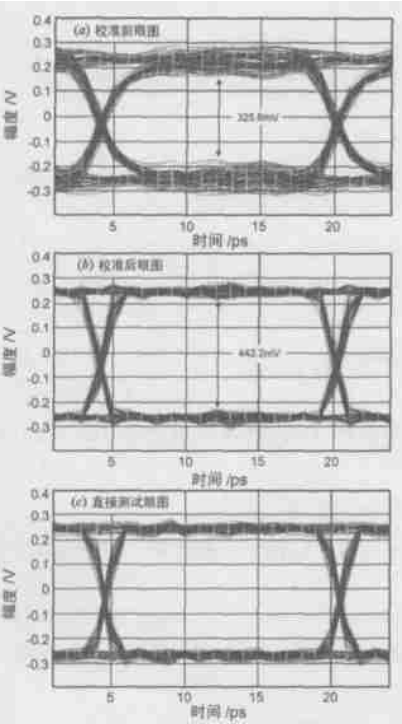


图 6 校准前、校准后及直接测试的眼图

为带夹具测得的眼图;图 6(b)为校准后的眼图.可以看出校准前后有明显不同.校准前后眼图的主要参数对比列于表 1.图 6(c)为直接测试的被器件的眼图,可以看出校准结果与实测结果符合得很好.最后,我们还对一个带 GPO 接口的 DFB 激光器与电吸收调制器集成的非线性光电器件进行了测试和校准.这种情况下,由于必须使用接口转换器和偏置网络,所以不可能对器件进行直接测量.图 7 给出了校准前后的眼图.校准前后眼图的主要参数对比列于表 2.可以看出校准后眼图的上升、下降时间和峰峰抖动减小.

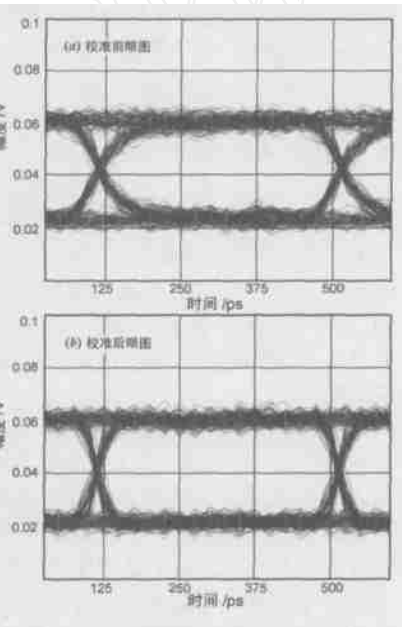


图 7 DFB 激光器与电吸收调制器集成器件的眼图

校准后眼图的上升、下降时间和峰峰抖动减小.

表 1 校准前和校准后眼图主要参数对比

参数名称	参数数值	
	校准前	校准后
张开高度	325.6mV	442.2mV
Q 因子	9.17	20.39
上升时间	112.8ps	37.2ps
下降时间	126.0ps	36.0ps
峰峰抖动	16.8ps	15.6ps

表 2 校准前和校准后眼图主要参数对比

参数名称	参数数值	
	校准前	校准后
张开高度	23.0mV	25.3mV
Q 因子	8.2	9.0
上升时间	93.0ps	34.2ps
下降时间	106.0ps	43.6ps
峰峰抖动	34.8ps	10.8ps

4 讨论与结论

为了在器件的高速眼图测试中去除夹具的影响,本文提出,用示波器得到码形发生器的时域信号,利用 FFT 使之变换到频域;用时域脉冲测量和 FFT 变换得到整个测试系统的传输函数;再利用矢量网络分析仪测量得到的夹具、辅助夹具的小信号 S 参数;解出扣除夹具后的传输函数;最后把扣除夹具后的频域信号通过 IFFT 变换到时域,得到待测器件的真实眼图.验证实验结果表明了此方法的可行性.这种方法可用于高速光电器件的眼图测试.如果把本文提出的方法加以推广,集成到测试仪器的软硬件中,则整个校准过程可以方便快捷地完成.

参考文献:

- [1] Ludwig R, et al. Enabling transmission at 160 Gbit/s [A]. OFC2002 [C]. California:OFC, 2002.
- [2] Silvonen K. New Algorithms for Network Analyzer, Test Fixture and Wafer Prober Calibration[M]. Finland: Finnish Academy of Technology, 1999.
- [3] Kompa G, Raay F V. Error-corrected large-signal waveform measurement system combining network analyzer and sampling oscilloscope capabilities[J]. IEEE MTT, 1990, 38:358 - 365.
- [4] Reinhold Ludwig, et al. RF Circuit Design Theory and Applications [M]. USA: Pearson Education, Inc., 2002.
- [5] Paul D, et al. Measuring the frequency response of gigabit chip photodiodes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(9): 1333 - 1339.

作者简介:



孙建伟 男, 1971 年生于山西河曲, 1995、1998 年先后获兰州大学电子材料与器件工程专业学士、硕士学位. 现为中科院半导体所博士, 研究方向为高速光电器件及收发模块的设计与测试.