

基于触发分离波形的百兆以太网物理层测试方法

崔玉龙, 吴学超, 刘汉

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111)

摘要: 为解决目前工业应用领域的百兆以太网物理层测试方法缺乏针对性、不够简易和高效的问题, 提出了一种新的测试方法, 其关键在于一种将 3 电平眼图分解成两个两电平眼图的方法和一种用两个眼图的物理层测试的技术指标去等效评价百兆以太网物理层质量的方法; 该方法从物理层采集随机的电信号将其绘制成 3 电平眼图, 再将难以测量评价的 3 电平眼图分解成两个两电平眼图, 使得能通过更简单的方法测量眼图的眼高、眼宽、上升时间、下降时间和抖动; 在得到眼图的眼高、眼宽、上升时间、下降时间和抖动五项指标的值后, 基于工业生产环境及需求分别对五项指标单独设置判断阈值并进行评分, 基于五个指标评价的结果, 最终对物理层进行总体评价, 具有针对性且简易高效。

关键词: 百兆以太网; 以太网; 物理层; 测试

One 100M Ethernet Physical Layer Test Method Based on Trigger to Separate Waveforms

Cui Yulong, Wu Xuechao, Liu Han

(Crrc Qingdao Sidang Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

Abstract: In order to solve the problem that the physical layer test method of fast Ethernet in the field of industrial application lacks pertinence, simplicity and efficiency, a new test method is proposed, the key of which is to decompose the 3-level eye patterns into two two-level eye patterns and to use the technical indicators of the physical layer test of the two eye patterns to evaluate the quality of the physical layer of fast Ethernet. The method collects random electrical signals from the physical layer and draws them into a 3-level eye patterns, then decomposes the 3-level eye patterns which is difficult to measure and evaluate into two-level eye patterns. So that eye height, eye width, rise time, fall time, and jitter of the eye patterns can be measured in an easier way. After obtaining the five indexes of eye height, eye width, rising time, falling time and jitter in the eye patterns, the judgment thresholds of the five indexes were set separately and scored based on the industrial production environment and demand. Based on the evaluation results of the five indexes, the final overall evaluation of the physical layer is targeted and simple and efficient.

Keyword: fast Ethernet; Ethernet; physical layer; test

0 引言

以太网是世界上最普遍、应用最广泛的一种计算机网络。随着科学技术的快速发展, 民用以以太网大规模使用百兆以太网已经有十几年了, 但是在一些工业环境, 例如汽车、地铁、高铁中的以太网应用仍然处于方兴未艾的阶段。工业环境下的智能化、互联化需求已经日趋紧迫, 然而工业领域相对滞后的以太网发展成为了掣肘。缺乏满足多功能、复杂环境需求的工业用以以太网, 更缺乏有针对性、方便高效的工业用以以太网测试方法, 是现在工业用以以太网所面临的主要问题。工业以太网的测试则更需要关注物理层的情况, 其为设备之间的数据通信提供传输媒体及互联设备, 为数据传输提供可靠的环境。基于工业需求的考量, 为了识别一些潜在的故障, 最大限度保障安全, 需要一种

对百兆以太网物理层的测试方法, 评价其物理层质量。本文则主要关注百兆以太网的物理层测试方法。

1 百兆以太网物理层相关分析

以太网的物理层包括协调子层 (reconciliation sublayer, RS), 介质无关接口 (medium independent interface, MII), 物理编码子层 (physical coding sublayer, PCS), 物理介质连接子层 (physical medium attachment sublayer, PMA), 物理介质相关子层 (physical medium dependent sublayer, PMD) 和介质相关接口 (medium dependent interface, MDI)。其中物理编码子层 (PCS)、物理介质连接子层 (PMA)、物理介质相关子层 (PMD) 统称为物理层实体 (PHY) (transceiver)^[1]。

1995 年 5 月, IEEE 通过了 IEEE 802.3u 规范, 这个快速以太网规范对物理层规范进行了重新定义, 其物理层包括 100BASE-TX、100BASE-FX、100BASE-T4 三种传输介质标准^[2-3]。

值得注意的是, 100BASE-TX PMD 中使用的是 MLT

收稿日期: 2020-04-26; 修回日期: 2020-08-11。

作者简介: 崔玉龙(1983-), 男, 山东日照人, 硕士研究生学历, 高级工程师, 主要从事轨道交通列车网络控制系统专业方向的研究。

—3 编码方式。MLT—3 即 Multi—Level Transmit—3, 多电平传输码, 其编码规则为:

- 1) 如果下一输入为“0”, 则电平保持不变;
- 2) 如果下一输入为“1”, 则产生跳变, 此时又分两种情况。
 - (1) 如果前一输出是“+1”或“—1”, 则下一输出为“0”;
 - (2) 如果前一输出非“0”, 其信号极性和最近一个非“0”相反。

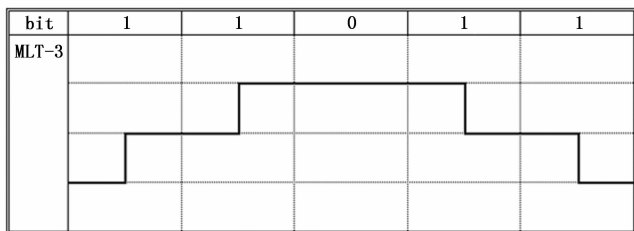


图 1 MLT—3 编码规则解析图

MLT—3 编码方式有如下的优点:

- 1) 在通信系统中, 单位时间能通过链路的数据量(即带宽)是体现该通信系统质量的标准之一, MLT—3 编码和 4B/5B 编码的特性使得其编码效率高至 80%, 节省了通信占用的带宽^[4];
- 2) MLT—3 编码方式包含冗余, 可用于纠错。对于 MLT—3 编码方式传输而言, 并不存在从—1 到 1 和 1 到—1 的跳变, 所以对于可能发生的过冲现象不敏感。

2 MLT—3 编码的分析难点

MLT—3 的优势明显, 但其“—1、0、1”3 电平的特性也给分析测试带来了不小的困难, 目前并没有通用的分析工具来分析 MLT—3 编码信号。

开发新的分析工具则会遇到如下几点问题:

- 1) 目前缺乏一种领域内公认的指标对 MLT—3 编码信号的物理波形进行评估分析, 现行的评估指标和方法, 一般仅适用于 NRZ 编码方式编码的信号^[5-6], 并不能简单的应用于 MLT—3 编码的信号;
- 2) MLT—3 编码信号的物理波形难以通过数字锁相环(DPLL)锁定, 因此难以捕获准确的信号频率和信号相位, 不利于物理波形的分析;
- 3) MLT—3 编码信号的物理波形, 其可能发生的过冲现象会对直接通过电平判断的测试方法造成不良影响。统计意义上的信号质量分析和流处理上的解码无法同时进行, 因此过冲现象所导致的电平错判和信号质量评估错误没有办法利用 MLT—3 编码的规律解码并同步直接修正。

针对以上的问题, 本文提出了如下的解决方案(即测试方法)。

3 测试方法的技术要点

3.1 通过统计生成眼图

利用采集到的大量随机电信号, 统计并构建绘制成眼

图^[7]。通过对眼图的观察和计算, 得到眼高、眼宽、上升时间、下降时间、抖动一共 5 个技术指标, 对指标的具体定义如图 2 所示。指标的测定主要依靠水平直方图和垂直直方图, 水平直方图的纵轴为电平, 横轴为该采样电平出现次数, 其含义是体现不同(采样)电平在所有采集到的离散电平信号中出现的比例; 垂直直方图的纵轴为目标电平出现次数, 横轴为时间, 其含义是在所构建的整个眼图时间段内被选取为目标的电平所出现的次数。

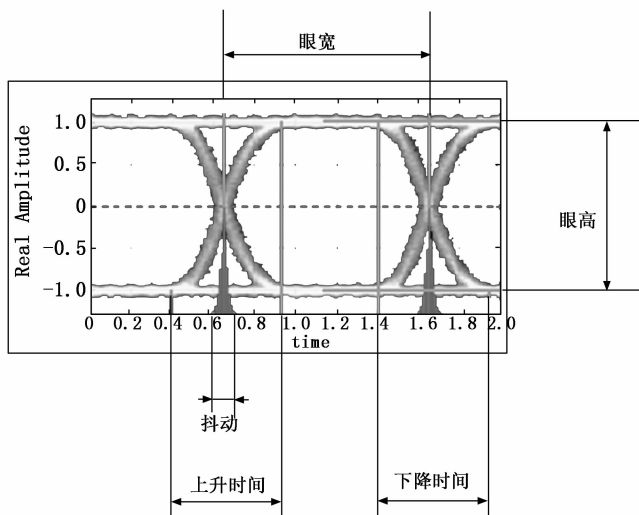


图 2 眼图中 5 个指标的具体定义解析图

具体来说, 眼宽指连续两个上升电平与下降电平交叉点在时间上的跨度, 其计算方法是以 0 电平为目标电平绘制垂直直方图, 直方图相邻的两个峰值时间(即出现 0 电平次数最多的两个相邻时间)的差即为眼图的眼宽。

眼高指高电平与低电平在电势上的跨度, 其计算方法是对两电平眼图绘制水平直方图, 直方图两个峰值电平(即出现次数最多的两个电平)的差即为眼图的眼高。

上升时间和下降时间分别指信号从低电平上升到高电平和从高电平下降到低电平在时间上的跨度。其中上升时间的计算方法是分别以低电平上升 20% 和高电平下降 20% 为目标电平绘制垂直直方图, (眼图以图 3 为例) 直方图中以 2 点处为目标电平的峰值时间与以 1 点处为目标电平的峰值时间的差即为上升时间; 下降时间的计算方法是分别以低电平上升 20% 和高电平下降 20% 为目标电平绘制垂直直方图, (眼图以图 3 为例) 直方图中以 4 点处为目标电平的峰值时间与以 3 点处为目标电平的峰值时间的差即为下降时间。

抖动指系统中的一种时序上的误差, 确定抖动可以通过目视估算或科学计算, 其具体计算方法是以 0 电平为目标电平绘制垂直直方图, 对所得直方图进行统计学标准差计算, 结果即为抖动^[8]。

这 5 项技术指标的数据均以相对稳定时的平均值来确定。

3.2 分解 3 电平眼图

事实上, 在实际测试过程中得到并不是两电平眼图而

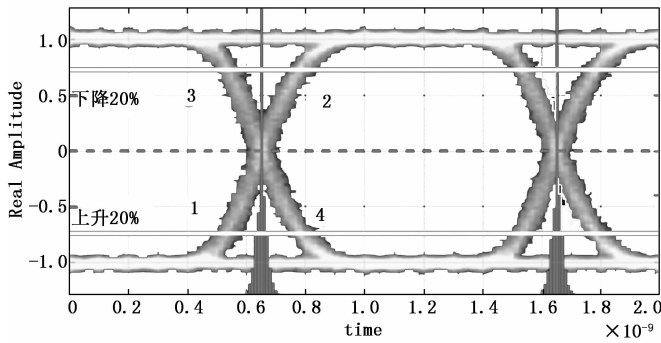


图 3 绘制垂直直方图的目标电平点

是 3 电平眼图, 如图 4 所示。3 电平眼图无法直接测量计算眼宽、眼高、上升时间、下降时间和抖动这 5 个技术指标, 而两电平眼图可以做到 (如图 5 所示), 为此需要一种能够将 3 电平眼图分解成 2 个两电平眼图的方法。一般对于眼图的生成, 使用硬件电路对采样数据进行实时的数字磷光波形图像处理, 减少了死区时间, 提高了采样效率^[9], 选择合适的触发则使磷光波形的图像更为锐利, 可以使用锁相环技术来跟踪波形^[10]。但是, 这些技术依赖于硬件电路, 也针对特定两电平波形, 而本文则将描述一种使用通用采集设备通过数字信号处理来评估波形的的方法。

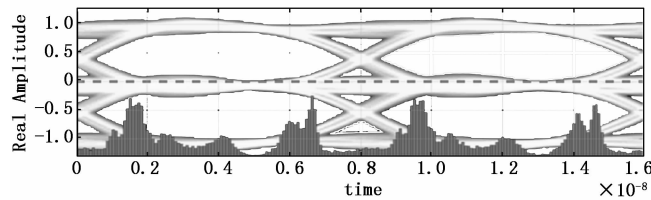


图 4 100BASE-T, 3 电平眼图

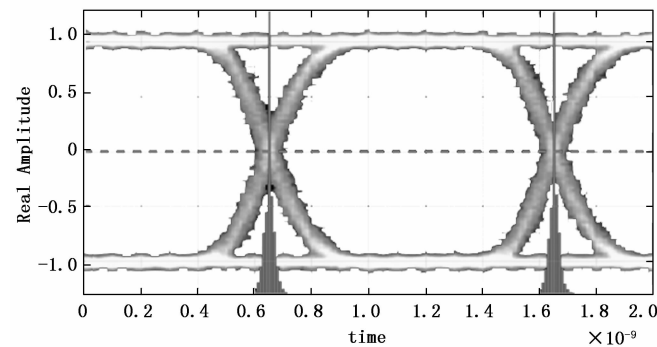


图 5 两电平眼图

首先通过统计采集, 获取 3 电平信号的实际电平, 通过计算得到交叉电平。3 电平信号采用 MLT-3 编码方式进行编码, 而 MLT-3 编码方式的电平不存在 -1 到 1 和 1 到 -1 这种跳变, 只能进行 -1 与 0、0 与 1 之间的跳变。由于 MLT-3 编码具有这种特性, 利用设置触发器的方法即可完美解决信号区分的问题, 从而让上眼图和下眼图计算时不受干扰, 同时也完成了每个信号周期的时间同步。

为此设置的 4 个触发器及其功能表如表 1 所示。

表 1 触发器功能表

触发器	功能
-1 到 0	触发到下眼图
0 到 -1	触发到下眼图
0 到 1	触发到上眼图
1 到 0	触发到上眼图

3.3 测试评分方法

根据测量计算到的上眼图、下眼图的眼高、眼宽、上升时间、下降时间和抖动共计 10 个技术指标的值, 与基于系统需求的这些技术指标的标准参考值进行对比, 判断各个技术指标是否符合系统需求, 以此对该系统的物理层进行评价。10 个技术指标及其释义见表 2。

表 2 测试评分技术指标

技术指标 (包括上、下眼图)	释义
眼高	两个上升电平与下降电平交叉点在时间上的跨度
眼宽	高电平与低电平在电势上的跨度
上升时间	信号从低电平上升到高电平在时间上的跨度
下降时间	信号从高电平下降到低电平在时间上的跨度
抖动	信号在时序上的误差

该方法的优越性在于对应不同需求的系统目标能够给出具有相当目的性的评价标准, 简单、专业、针对性。

4 测试方法的主要流程

4.1 计算触发参数部分

1) 差分采集一对差分传输线, 采集以 Multi-Level Transmit-3 多电平传输码为规则编码的信息流电平信号, 并作为原始数据记录下来。

2) 通过测量工具统计采集到信号电平的最高值和最低值, 将两者之间的电平划分为 500 个区间。

3) 统计信号电平落于各电平区间的概率, 绘制水平直方图。

4) 找到概率最高的三个峰值对应的电平 (即直方图中柱最长的三个电平), 然后按电平从低到高, 依次记为 V_n , V_0 , V_p (即 3 电平眼图中 -1、0、1 对应的实际电平)。

5) 计算交叉电平 V_{n_coss} 、 V_{p_coss} , 选取这两个电平作为触发点的原因是以交叉电平作为触发点能够最大程度保证电平在向上、下跳变时能够被精准无误地捕捉到, 从而提升眼图转化的质量。式 (1) ~ (2) 如下。

$$V_{n_coss} = \frac{(V_n + V_0)}{2} \quad (1)$$

$$V_{p_coss} = \frac{(V_0 + V_p)}{2} \quad (2)$$

计算触发参数部分流程图如图 6 所示。

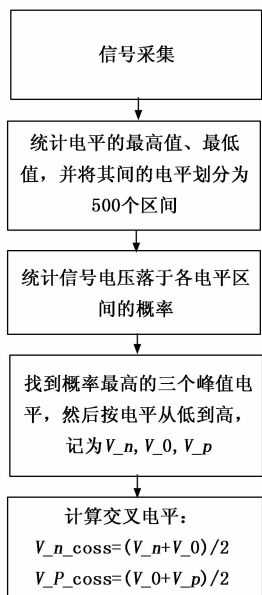


图 6 计算触发参数部分流程图

4.2 触发信号到上下两个眼图部分

1) 差分采集一对差分传输线, 采集以 Multi-Level Transmit-3 多电平传输码为规则编码的信息电平信号, 并作为原始数据记录下来。

2) 由于 MLT-3 编码具有“不存在-1 到 1 和 1 到-1 这种跳变”这种特性, 使用触发器来将 3 电平眼图分解成上下两个眼图, 以此规避直接统计 3 电平信号无法计算眼高、眼宽、上升时间、下降时间、抖动等指标的问题。具体方法如下: 信号通过交叉电平 V_{n_coss} 时, 0 到-1 触发器或-1 到 0 触发器触发, 记录 8 ns (一个周期) 波形于下眼图; 信号通过交叉电平 V_{p_coss} 时, 0 到 1 触发器或 1 到 0 触发器触发, 记录 8 ns (一个周期) 波形于上眼图; 信息为“0”时, 电平保持不变, 记录 8 ns (一个周期) 波形于前一记录的眼图。

3) 上下眼图各重复记录 1 万次信号, 这样做的目的是减小偶然性对最终数据的影响, 最大程度上保证对该物理层测试评价的客观性和非偶然性。

4) 对触发器触发后得到的分离数据进行处理, 最终将 3 电平眼图绘制成两个两电平眼图“上眼图”和“下眼图”, 方便进行参数计算进而对该物理层质量进行评价。

触发信号到上下两个眼图部分流程图如图 7 所示。

4.3 计算综合评分部分

1) 由上一部分得到眼图并观察计算, 得到眼图的技术指标参数: 眼高 (两个上升电平与下降电平交叉点在时间上的跨度)、眼宽 (高电平与低电平在电势上的跨度)、上升时间 (信号从低电平上升到高电平在时间上的跨度)、下降时间 (信号从高电平下降到低电平在时间上的跨度)、抖动 (信号在时序上的误差)。

2) 对每一个单个维度设置评分标准, 设定判断阈值, 对所有的单个维度进行评分。其标准基于现场对系统的需

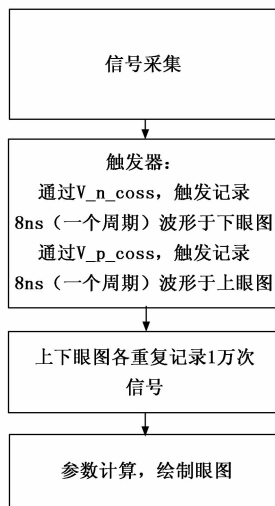


图 7 触发信号到上下两个眼图部分流程图

求, 并不是固定的, 这样做的目的是最大程度保证物理层测试的针对性, 对于不同应用场景的以太网给出不同的评价标准。

3) 基于各个维度评价结果, 得到该物理层测试进行总体评价。

计算综合评分部分流程图如图 8 所示。

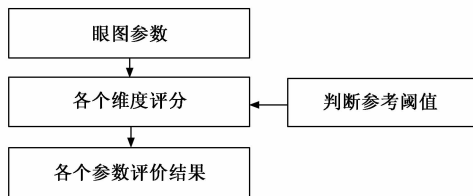


图 8 计算综合评分部分流程图

5 测试方法的仿真实例

基于一些一般工业环境对以太网需求的经验, 这里给出各技术指标的参考值如表 3。

表 3 测试评分技术指标参考值

技术指标(上眼图)	参考值
眼高	1 V
眼宽	8 ns
上升时间	≤ 2 ns
下降时间	≤ 2 ns
抖动	≤ 2 ns

值得注意的是, 对于不同工业环境的使用倾向, 需要相关从业人员根据经验对以上参考值进行针对性修改, 以期得到该工业环境最具针对性的以太网物理层测试评分方法。

5.1 物理链路完好的测试

对一物理链路完好的百兆以太网物理层使用本论文的测试方法进行仿真测试。

依照上述的测试方法, 先采集电信号, 确定电信号电平的最高值和最低值划分两者之间的电平值为 500 个区间,

绘制水平直方图。观察水平直方图得到本次测试的三个峰值电平 V_n , V_0 , V_p , 通过上述公式计算交叉电平 V_{n_coss} , V_{P_coss} 。

设置 4 个触发器, 将 3 电平眼图分解成上下两个眼图。信号通过交叉电平 V_{p_coss} 时, 0 到 1 触发器或 1 到 0 触发器触发, 记录 8 ns (一个周期) 波形于上眼图; 信息为“0”时, 电平保持不变, 记录 8 ns (一个周期) 波形于前一记录的眼图。重复记录信号, 最终绘制出上眼图如图 9。

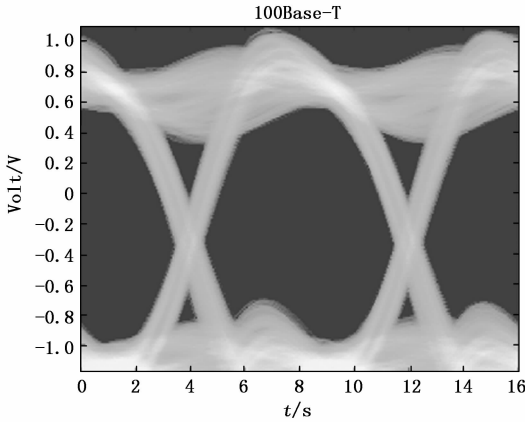


图 9 物理链路完好的测试上眼图

依照上述方法, 对上眼图绘制水平直方图, 将水平直方图两峰值做差, 得到上眼图的眼高并记录; 以“0”电平为目标电平, 绘制垂直直方图, 将垂直直方图上相邻的两个峰值做差, 得到上眼图的眼宽并记录; 以低电平上升 20% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 再以低电平上升 80% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 将两个峰值处时间做差, 得到上眼图的上升时间并记录; 以高电平下降 20% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 再以高电平下降 80% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 将两个峰值处时间做差, 得到上眼图的下降时间并记录; 再以“0”电平为目标电平, 绘制垂直直方图, 对直方图进行标准差计算, 得到上眼图的抖动并记录。

将上述计算的 5 个技术指标做表, 如表 4。

表 4 物理链路完好的测试上眼图技术指标值

技术指标(上眼图)	值
眼高	0.8230 V
眼宽	7.2905 ns
上升时间	2.0564 ns
下降时间	2.2069 ns
抖动	0.3548 ns

信号通过交叉电平 V_{n_coss} 时, 0 到 -1 触发器或 -1 到 0 触发器触发, 记录 8 ns (一个周期) 波形于下眼图; 信息为“0”时, 电平保持不变, 记录 8 ns (一个周期) 波

形于前一记录的眼图。重复记录信号, 最终绘制出下眼图如图 10。

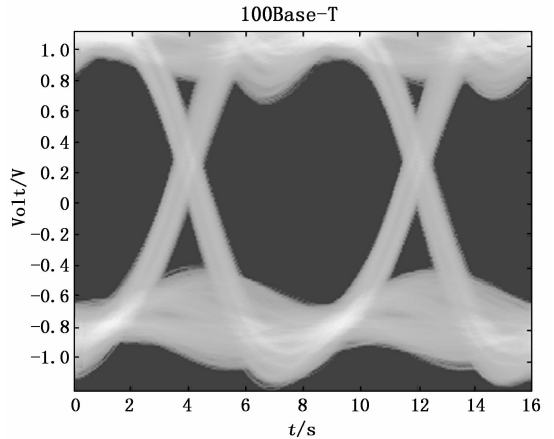


图 10 物理链路完好的测试下眼图

依照上述方法, 对下眼图绘制水平直方图, 将水平直方图两峰值做差, 得到下眼图的眼高并记录; 以“0”电平为目标电平, 绘制垂直直方图, 将垂直直方图上相邻的两个峰值做差, 得到下眼图的眼宽并记录; 以低电平上升 20% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 再以低电平上升 80% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 将两个峰值处时间做差, 得到下眼图的上升时间并记录; 以高电平下降 20% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 再以高电平下降 80% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 将两个峰值处时间做差, 得到下眼图的下降时间并记录; 再以“0”电平为目标电平, 绘制垂直直方图, 对直方图进行标准差计算, 得到下眼图的抖动并记录。

将上述计算的 5 个技术指标做表, 如表 5。

表 5 物理链路完好的测试下眼图技术指标值

技术指标(下眼图)	值
眼高	0.8315 V
眼宽	7.2052 ns
上升时间	2.2069 ns
下降时间	2.0063 ns
抖动	0.3974 ns

以表 3 为技术指标参考值, 观察到实验测试结果基本与之吻合。

5.2 接头处屏蔽失效链路的测试

对一接头处屏蔽失效链路的百兆以太网物理层使用本论文的测试方法进行仿真测试。

依照上述的测试方法, 先采集电信号, 确定电信号电平的最高值和最低值划分两者之间的电平值为 500 个区间, 绘制水平直方图。观察水平直方图得到本次测试的三个峰值电平 V_n , V_0 , V_p , 通过上述公式计算交叉电平 V

$_n_coss, V_P_coss$ 。

设置 4 个触发器, 将 3 电平眼图分解成上下两个眼图。信号通过交叉电平 V_p_coss 时, 0 到 1 触发器或 1 到 0 触发器触发, 记录 8 ns (一个周期) 波形于上眼图; 信息为“0”时, 电平保持不变, 记录 8 ns (一个周期) 波形于前一记录的眼图。重复记录信号, 最终绘制出上眼图如图 11。

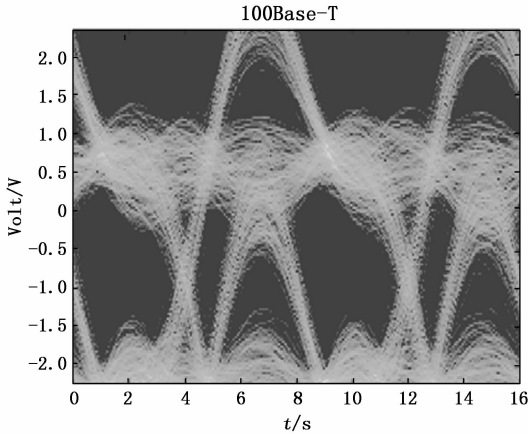


图 11 接头处屏蔽失效链路的测试上眼图

依照上述方法, 对上眼图绘制水平直方图, 将水平直方图两峰值做差, 得到上眼图的眼高并记录; 以“0”电平为目标电平, 绘制垂直直方图, 将垂直直方图上相邻的两个峰值做差, 得到上眼图的眼宽并记录; 以低电平上升 20% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 再以低电平上升 80% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 将两个峰值处时间做差, 得到上眼图的上升时间并记录; 以高电平下降 20% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 再以高电平下降 80% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 将两个峰值处时间做差, 得到上眼图的下降时间并记录; 再以“0”电平为目标电平, 绘制垂直直方图, 对直方图进行标准差计算, 得到上眼图的抖动并记录。

将上述计算的 5 个技术指标做表, 如表 6。

表 6 接头处屏蔽失效链路的测试上眼图技术指标值

技术指标(上眼图)	值
眼高	0.844 7 V
眼宽	7.389 3 ns
上升时间	0.551 7 ns
下降时间	2.733 5 ns
抖动	0.305 3 ns

信号通过交叉电平 V_n_coss 时, 0 到 -1 触发器或 -1 到 0 触发器触发, 记录 8 ns (一个周期) 波形于下眼图; 信息为“0”时, 电平保持不变, 记录 8 ns (一个周期) 波形于前一记录的眼图。重复记录信号, 最终绘制出下眼图如图 12。

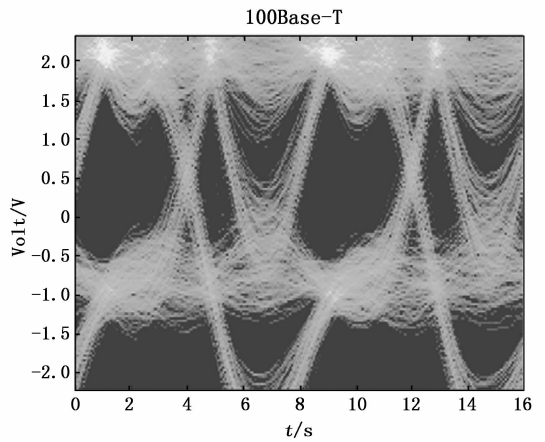


图 12 接头处屏蔽失效链路的测试下眼图

依照上述方法, 对下眼图绘制水平直方图, 将水平直方图两峰值做差, 得到下眼图的眼高并记录; 以“0”电平为目标电平, 绘制垂直直方图, 将垂直直方图上相邻的两个峰值做差, 得到下眼图的眼宽并记录; 以低电平上升 20% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 再以低电平上升 80% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 将两个峰值处时间做差, 得到下眼图的上升时间并记录; 以高电平下降 20% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 再以高电平下降 80% 处的电平为目标电平, 绘制垂直直方图并记录第一个峰值处的时间, 将两个峰值处时间做差, 得到下眼图的下降时间并记录; 再以“0”电平为目标电平, 绘制垂直直方图, 对直方图进行标准差计算, 得到下眼图的抖动并记录。

将上述计算的 5 个技术指标做表, 如表 7。

表 7 接头处屏蔽失效链路的测试下眼图技术指标值

技术指标(下眼图)	值
眼高	0.8555 V
眼宽	7.3834 ns
上升时间	1.1285 ns
下降时间	1.9812 ns
抖动	0.3083 ns

以表 3 为技术指标参考值, 观察到实验测试结果基本与之相差甚远。

6 结束语

出于解决目前工业用以太网缺乏优质的物理层测试方法的困境这一目的, 本文提出了一种新的以太网物理层测试方法, 详细介绍了如何将 MLT-3 编码信号产生的 3 电平眼图分解成有行业通用测量方法的两电平眼图, 并介绍了如何通过两电平眼图的各项指标值最终对当前以太网物理层的质量进行综合评价。