

1000Base-T 型网络物理层特征信号测试技术研究

杨 洋, 沈小青, 章文斌, 顾卫红

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 网络物理层基于网络结构底层, 负责网络电信号的发送、接收, 当网络物理层性能状态出现问题时, 将严重影响网络设备的通信质量, 且故障点难以被发现排除; 为有效确保网络设备通信质量, 及时发现设备故障隐患, 需求设计准确高效的网络物理层指标测试方法; 依据《IEEE 802.3-2000 和 ANSI X3.263-1995 标准》关于以太网物理层特征信号电参数特性的相关要求, 对 1000Base-T 型网络接口物理层一致性特征信号测试方法进行研究, 基于宽带数字示波器测试系统, 并结合数字示波器高级触发功能设计了能够准确捕获特定特征信号的测试方法, 该方法能满足网络物理层一致性测试技术需求, 准确开展网络物理层指标测试工作。

关键词: 网络接口; 物理层; 一致性; 测试

Research on Consistency Testing Technology of 1000Base-T Ethernet Physical Layer

Yang Yang, Shen Xiaoqin, Zhang Wenbin, Gu Weihong

(China Satellite Maritime Telemetry and Telecontrol Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: Network physical layer is based on the bottom layer of the network structure and is responsible for the transmission and reception of network electrical signals. When the performance status of the physical layer of the network is problematic, the communication quality of the network device will be seriously affected, and the fault point is difficult to be found and excluded. In order to effectively ensure the communication quality of network equipment and discover hidden dangers of equipment failures, it is necessary to design an accurate and efficient network physical layer index test method. According to the requirements of the IEEE 802.3-2000 and ANSI X3.263-1995 standards for the electrical parameters of the characteristic signals of the Ethernet physical layer, the test method of the physical layer consistency characteristic signal of the 1000Base-T network interface is studied, based on the broadband digital oscilloscope test system, combined with the advanced trigger function of the digital oscilloscope, has designed a test method that can accurately capture specific characteristic signals. This method can meet the requirements of network physical layer conformance test technology and accurately carry out network physical layer index test work.

Keywords: network interface; physical layer; consistency; test

0 引言

在 OSI 参考模型中, 物理层基于最底层, 其功能主要负责电参数信号的发送、接收。网络物理层出现故障时, 表现出的现象主要有: 网络设备通、断不连续, 实际数据传输率达不到标称值, 通信误码率严重偏高, 设备持续工作在高速率传输模式下数据丢包严重等。随着通信技术和网络用户需求的不断发展, 如何及时发现网络设备存在的故障, 排除设备隐患成为网络设备提供迫切需要解决的问题。对网络设备物理层电参数信号开展一致性测试工作, 能够检查设备参数状态, 准确判断其提供传输信号完整性的能力。同时, 开展网络物理层一致性测试技术研究工作, 能够迅速准确判断网络设备硬件工作状态, 丰富设备故障排查方法手段, 为网络故障的及时解决提供便利条件。

文章通过研究网络设备测试模式控制方法、以及示波

器触发设计方法, 设计了能够准确捕获特定特征信号的测试方法, 该方法能满足网络物理层一致性测试相关需求。

1 网络物理层一致性特征信号分析

网络物理层一致性特征信号是表征网络设备硬件状态的标志性参数, 研究特征信号参数对网络信号传输质量的影响, 并准确掌握特征信号的测试方法是开展测试技术研究的关键。

网络物理层信号不同于一般的编码信号, 它是通过信号电平的跳变来分辨数据信息的“0”和“1”, 随着信号频率的提升, 编码规则越加复杂。1000BASE-T 通信标准采用 UTP 不屏蔽双绞线里的 4 对线, 每线同时收发, 在全双工工作模式下可以实现 1000 Mb/s 的数据传输率。1000BASE-T 使用 8B/10B 编码, 以及 PAM-5 脉冲幅度的调制方式, 其信号较为复杂。依据 IEEE802.3 协议规范, 1000BASE-T 型以太网物理层的一致性测试提供 4 种模式, 各测试模式下需要对不同的特征信号进行指标考核, 其中测试模式 1 提供的电信号和指标考核要求最为复杂和关键, 也是文章研究的重点。

收稿日期: 2018-08-29; 修回日期: 2018-11-29。

作者简介: 杨 洋(1983-), 男, 福建邵武人, 硕士研究生, 主要从事无线电计量、嵌入式系统设计与应用方向的研究。

1.1 被测特性信号参数分析

图 1 所示, 为测试模式 1 条件下需要测试的信号模板。

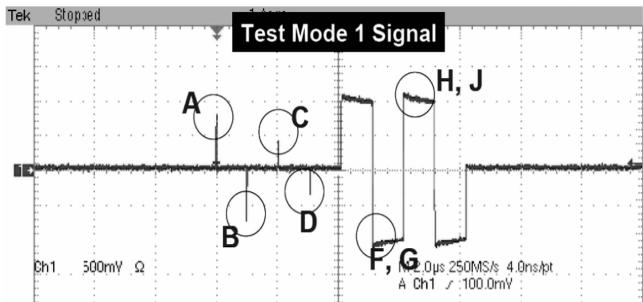


图 1 1000Base-T 型网络测试模式 1 特征信号

PHY 的 4 个发送器将连续发送数据序列: 由 +2, 127 个 0, -2, 127 个 0, +1, 127 个 0, -1, 127 个 0, 接着是 128 个 +2, 128 个 -2, 128 个 +2, 128 个 -2, 最后是 1024 个 0 组成。模式 1 使能时, 发送器将在主时钟模式下以 $125.00 \text{ MHz} \pm 0.01\%$ 的时钟频率发送数据, 此序列将不间断的重复发送。

根据测试要求, 对 1000Base-T 型以太网卡模板 1 测试需完成对图 1 中 A、B、C、D、F、G、H、J 共 8 各特征点峰值电压及对称性以及信号衰落测试。其中对 A 点、B 点间峰值电压的要求为: A 与 B 点的峰值电压: $670 \sim 820 \text{ mV}$ (150 mV 容限范围), A 与 B 点的峰值电压的差异不能超过 1%。

1.2 被测网络接口测试模式设置

根据网络产品业界对质量控制的要求, 各厂商网卡均开放寄存器控制接口进行网络物理层一致性测试。在带有 GMII 的 PHY 接口, 测试模式通过使能 GMII Management register 的 9.13: 15 位进行设置, 见下表。测试模式仅修改发送器电路发送的数据, 不会修改在非测试模式下发送器和接收器的电气和抖动设置。本文的研究重点为寄存器状态设置为测试模式 1 条件下进行特征信号测试。

表 1 GMII Management Register 测试模式设置

Bit1(9.15)	Bit2(9.14)	Bit3(9.13)	模式
0	0	0	正常模式
0	0	1	测试模式 1—发送波形测试模式

2 特征信号测试方法研究

网络接口物理层特征信号测试系统, 由测试仪器及测试夹具组成。其中测试仪器完成对被测信号电参数的捕获分析, 测试夹具引入被测信号并向测试仪器完整输入, 触发设计方法稳定触发捕获被测信号, 实现准确测试技术指标^[1]。

2.1 测试夹具及测试仪器选择

《IEEE Std 802.3-2000》标准中对测试夹具负载要求为: 满足 $100 \Omega \pm 0.2\%$ 的电阻器且在频率 $\leq 100 \text{ MHz}$ 时,

串联感抗 $\leq 20 \text{ nH}$ 、并联容抗 $\leq 2 \text{ pF}$, 要求被测试端口输出信号的最小上升时间为 3.0 ns ^[2]。测试上升时间为 3.0 ns 信号, 测试用示波器需具备足够的带宽和采样率, 根据测试系统测量误差小于 1/3 测试指标的技术要求, 测试用示波器带宽应至少选择 350 MHz 以上, 综合考虑示波器探头带宽对测试误差产生的影响并结合文献 [1] 研究成果, 本文选用如图 2 所示测试夹具及带宽 2.5 GHz 实时示波器和带宽 3.5 GHz 差分探头组合构建测试系统。

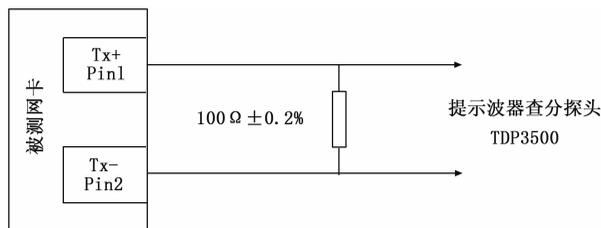


图 2 测试夹具及示波器探头电路结构

2.2 示波器触发方式设计

测试模式 1 模板信号各特征点的测试, 需要分别使用“欠幅脉冲”触发方式和“欠幅脉冲+时基延迟”触发方式两种方法完成。

(1) “欠幅脉冲”触发方式。

“欠幅脉冲”触发方式, 其定义为: “触发脉冲振幅通过第一个阈值, 但重新通过第一个阈值前未能通过第 2 个阈值, 可以检测正欠幅或负欠幅, 或只能检测那些宽于指定宽度的欠幅”。可理解为: 示波器能够通过设计电压阈值, 捕获幅度符合电压阈值范围内的脉冲信号。分析测试模式 1 特征信号特点, 发现 A 点、C 点、H 点为正电压信号, 根据技术指标 A 点电压应为 $0.67 \text{ V} \sim 0.82 \text{ V}$, C 点电压应为 A 点电压的 0.5 倍、误差 $\pm 2\%$, H 点电压 $\geq A$ 点; B 点、D 点、F 点为负电压信号, 根据技术指标 B 点电压应为 $0.67 \text{ V} \sim 0.82 \text{ V}$, D 点电压应为 B 点电压的 0.5 倍、误差 $\pm 2\%$, F 点电压 $\geq B$ 点。特征信号 A 点、C 点、H 点, B 点、D 点、F 点符合欠幅脉冲特性, 可通过电压阈值设计、使用“欠幅脉冲”高级触发方式准确捕获特征信号各测试点波形, 分析信号参数。

各特征信号点触发设计如图 3~6 所示。

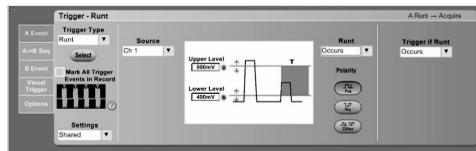


图 3 信号 A 点欠幅触发设计示意图

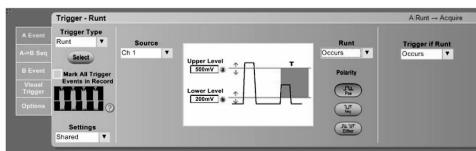


图 4 信号 C 点欠幅触发设计示意图

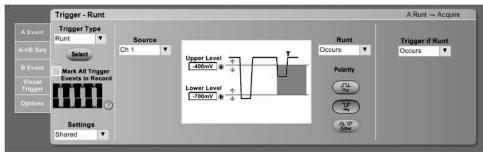


图 5 信号 B 点欠幅触发设计示意图

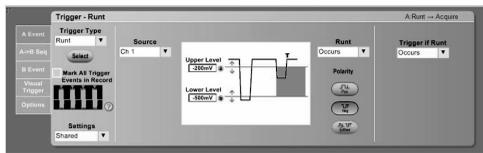


图 6 信号 D 点欠幅触发设计示意图

(2) “欠幅脉冲+时基延迟”触发方式。

特征信号 F 点、G 点、H 点、J 点分别位于两个脉冲宽带、幅度相等的脉冲信号顶部及底部，由于被测信号特征一致，无法使用单一的触发模型准确捕获信号，基于使用“欠幅脉冲”触发方式能够准确捕获特征信号 D 点的成果，设计使用“欠幅脉冲+时基延迟”触发方式对信号 F 点、H 点进触发设计。

宽带数字示波器 DPO7254C 具备 5 ns~250 s 时基延迟功能，延迟精度为 $\pm 2.5 \times 10^{-6}$ 根据《IEEE Std 802.3-2000》标准对测试模式 1 特征信号的定义，F 点、H 点与信号 D 点分别间隔 $2.0 \mu\text{s}$ 、 $3.0 \mu\text{s}$ 。选择 DPO7254C 宽带示波器高级触发功能，将触发模式选择为“欠幅脉冲触发方式”，设置触发高电平为 -400 mV 、低电平为 -200 mV 、如图 7 所示，触发延迟为 0 ns ，负极性电压，调整示波器延迟设置，延迟时间分别设置为：“ $2.0 \mu\text{s}$ ”、“ $3.0 \mu\text{s}$ ”，分别用于捕获信号 F 点、H 点。

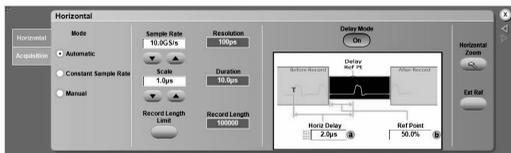


图 7 “欠幅脉冲+时基延迟”触发设计示意图

3 测试试验

根据上述分析，选择使用 TF-GBE-BTP 型测试夹具、宽带数字示波器及测试探头搭建测试环境，设置示波器触发模式，稳定捕获测试模式 1 特征信号（如图 1）用于指标分析。

3.1 峰值电压（信号幅度对称性测试）

测试特征信号峰值电压的实质是为了验证端口的驱动能力，即是否具有足够远的信号传递能力，同时也确保设备输出信号电压正确。其中“峰值电压”即“信号幅度对称度”项目需要对测试模式 1 特征信号中 A、B、C、D，4 个点的峰值电压值进行测试，以验证其是否在 IEEE802.3 协议规范所容许的范围内。测试首先使用“欠幅脉冲”触发方式分别稳定捕获各个信号特征点，使用示波器自动测量（Measure）功能中峰值电压 high/low 测量功能及通过 $|+V_{out}/-V_{out}|$ 数据计算完成状态判断。以 A 点、B 点测

试为例，测试界面如图 8 所示。

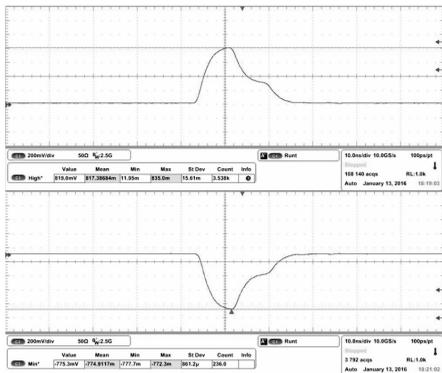


图 8 信号峰值电压测试示意图

使用示波器自动测量（Measure）功能中 High、Maximum 参数测量功能，记录屏幕左下方 Measure 参数中 High 即为 $+V_{out}$ （信号 A 点幅度），Maximum 即为脉冲峰值；更改触发设置，重复上述步骤，记录下负向脉冲波形过冲参数为 $-V_{out}$ （信号 B 点幅度），参数计算方法为： $0.82 \leq | +V_{out}/-V_{out} | \leq 1.22$ ，特征信号 A 点 $+V_{out} = 819.0 \text{ mV}$ ，B 点 $-V_{out} = -775.3 \text{ mV}$ ，A 点、B 点电压均满足 $0.67 \text{ V} \sim 0.82 \text{ V}$ 技术指标要求， $| +V_{out}/-V_{out} |$ 测试值为 1.06，符合对称性技术指标要求。

3.2 信号衰落测试

信号衰落指的是信号幅度在经过某特定时刻，相对其参考幅度的衰减量，IEEE802.3 协议规范将衰落时刻规定为 500 ns 。信号衰落测试需要准确测试模式 1 特征信号中 H 点、J 点、F 点、G 点信号幅度，验证插入的磁损耗是否过大。测试中首先设置示波器触发模式，使用“欠幅脉冲+时基延迟”模式稳定捕获，并准确分辨各特征信号波形，使用示波器游标测量功能，同时在时基和幅度两个坐标参数下，测试信号衰落值。以 F 点、G 点测试为例，测试界面如图 9 所示。

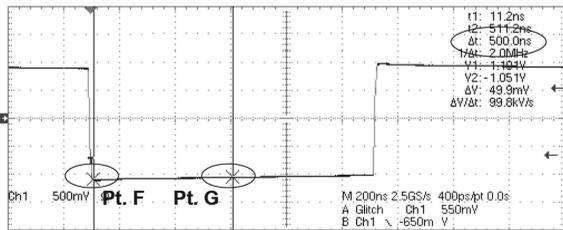


图 9 信号衰落测试示意图

设置示波器触发高电平为 -400 mV 、低电平为 -200 mV ，将示波器稳定触发于特征信号 D 点，设置延迟时基为 $2.0 \mu\text{s}$ ，将待测信号 F 点、G 点稳定触发在测试区域中心，游标 1 置于特征信号 F 点幅度最高值，游标 2 设置于距离特征信号 F 点 500.0 ns 时基位置、即为特征信号 G 点，记录屏幕左下方 Measure 参数中游标 1 测试值即为 $V1$ 、 $V1 = 1.101 \text{ V}$ ，游标 2 测试值即为 $V2$ 、 $V2 = -1.051 \text{ V}$ ，信号衰落值 $V2/V1 = 95.4\%$ ，测试结果满足 $V2/V1 \geq 73.1\%$ ，满足指标技术要求。

4 总结

以太网物理层处于OSI参考模型的最底层,定义了数据传输与接收所需要的电信号、光信号、线路状态、时钟基准、数据编码和电路特性等,不仅承担了为整个网络进行数据传输的物理媒介功能而且向数据链路层提供了传输原始比特流的物理链接功能和标准接口。以太网接口的物理特性对网络性能的影响在越是在关键的时刻越起着重要的作用,十分值得广泛的关注和重视。本文通过分析网络设备物理层特征信号参数特点、生成方法,并基于数字示波器高级触发功能,设计了能够准确捕获特定特征信号的测试方法,能够满足对物理层一致性特征信号测试分析需求,通过测试实验表明该方法稳定、可靠,可用于工程实践。

参考文献:

- [1] 杨洋,韩璐,沈小青,等. 100Base-TX以太网物理层一致性测试技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2016(9): 74-76.
- [2] IEEE Std 802.3, 2000 Edition Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications [S].
- [3] 泰克公司. 眼图和抖动 [J]. 现代电视技术, 2006(1): 99-100.
- [4] 孙灯亮. 数字示波器原理和应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012.
- [5] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements [S], 2008.
- [6] 罗昶,黎连业. 计算机网络故障诊断与排除 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [7] 杨洋,沈小青,柏永斌,等. 基于AVR和以太网的远程环境监控系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2013(2): 418-420.
- [8] 杨洋,沈小青,顾卫红,等. 抖动测试系统的构建与应用技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015(8): 2640-2642.
- [9] 沈小青,楼杨,叶玲玲,等. 高速串行数据链路中基于相位噪声时钟抖动测量 [J]. 计算机测量与控制, 2015(5): 1470-1471.
- [10] 熊德健. 网络物理层测试工具应用研究 [J]. 甘肃科技, 2018(23): 69-71.
- [11] 马凯. 基于故障传播的软件故障定位方法研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- [12] Weiser M. Programmers use slices when debugging [J]. Communications of the ACM, 1982, 25(7): 446-452.
- [13] 李必信. 基于程序切片谱的软件错误定位技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2013.
- [14] Zhang X, Neelam G, Rajiv G. Locating faulty code by multiple points slicing [J]. Software Practice & Experience, 2007, 37(9): 935-961.
- [15] Reps T, Ball T, Das M, et al. The use of program profiling for software maintenance with applications to the year 2000 program [R]. Springer Berlin Heidelberg, 1997, 1301.
- [16] Yu Kai, Lin Mengxiang, Gao Qing, et al. Locating faults using multiple spectra—specific models [J]. SAC 2011: 1404-1410.
- [17] 何印标. 基于多层次频谱的软件故障定位研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.
- [18] Wong W E, Wei T, Qi Y, et al. A Crosstab-based Statistical Method for Effective Fault Localization [R]. Proceeding of 1st International Conference on Software Testing. 2008: 42-51.
- [19] Reiter R. A theory of diagnosis from first principles [J]. Artificial intelligence, 1987, 32(1): 57-95.
- [20] 徐俊洁. 多故障程序的概率诊断方法研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [21] Cleve H, Zeller A. Locating causes of program failures [J]. Software Engineering, 2005: 342-351.
- [22] DeMillo R A, Pan H, Spafford E H. Failure and fault analysis for software debugging [A]. Proceedings of 21st International Computer Software and Applications Conference [C]. 1997: 515-521.
- [23] 邹雨果. 基于程序谱的软件错误定位方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [24] 李博. 软件调试中多错误定位的算法研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [25] 于全江. 多故障环境下的频谱故障定位技术实证分析 [D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [26] 文万志,李必信,孙小兵,等. 基于条件执行切片谱的多故障定位 [J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(5): 1030-1043.
- [27] 张泽林. 基于数据挖掘的软件多故障定位与分析技术 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [28] 曹鹤玲,姜淑娟. 基于Chameleon聚类分析的多错误定位方法 [J]. 电子学报, 2017, 45(2): 394-400.
- [29] <http://www.pleuma.cc.gatech.edu/aristotle/Tools/subjects/>. [EB/OL].
- [30] 黄小红,赵逢禹. 软件故障定位关键技术研究综述 [J]. 软件导刊, 2017, 16(7): 205-209.
- [31] Jones J A, Harrold M J. Empirical evaluation of the Tarantula automatic fault localization technique [A]. Proceedings of the 20th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering [C]. 2005: 273-282.
- [32] 文万志,陈建平,陈翔,等. 基于分块切片的软件错误定位技术 [J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(12).
- [33] Manos Renieris, Steven P. Reiss. Fault localization with nearest neighbor queries [J]. IEEE Computer Society, 2003: 30-39.
- [34] 鞠小琳,姜淑娟,张艳梅,等. 软件故障定位技术进展 [J]. 计算机科学与探索, 2012, 6(6): 481-494.
- [35] Zhang Z, Chan W K, Tse T H, et al. Is nonparametric hypothesis testing model robust for statistical fault localization [J]. Information and Software Technology, 2009: 1573-1585.
- [36] 滕庆亚. 基于动态切片的错误定位方法研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- [37] Jones J A, Bowering J F, Harrold M J. Debugging in parallel [A]. Proceedings of the 2007 International Symposium on Software Testing Analysis [C]. 2007: 16-26.

(上接第4页)