

# 使用 MSO/DPO4000B 系列示波器 调试 TCP/IPv4 和 10BASE-T/ 100BASE-TX 以太网

## 应用指南

### 引言

通过提供即时信息及在全球范围内获得产品和服务，互联网改变了我们工作和生活方式。互联网是由大量的计算机组成的全球网络，这些计算机使用互联网协议套件标准互相通信。由于互联网的流行及其简便易用特点，从摄像机到各种仪器，正有越来越多的产品连接到互联网上。如果没有适当的检验和调试工具，那么设计这些嵌入式产品不仅极具挑战性，而且耗时会非常长。

混合信号示波器(MSO)是拥有模拟和数字混合信号的嵌入式系统调试使用的的首选工具。为迅速检验和调试系统，配有 DPO4ENET 串行应用模块的 MSO4000B 系列示波器可以捕获和解码 10BASE-T/100BASE-TX 局域网 (LAN) 上的 TCP/IPv4/以太网协议和数据。MSO4000B 系列示波器可以在嵌入式系统上观察时间相关的模拟信号、数字信号、并行总线、串行总线以及与互联网相连的局域网接口。

本应用指南中所提到的配有 DPO4ENET 的 MSO/DPO4000B 均指配有 DPO4ENET 串行应用模块的 MSO/DPO4000B 系列示波器。本应用指南中使用的互联网实例是一台运行 Microsoft Internet Explorer (IE) 的笔记本电脑，使用互联网控制仪器，本例中的仪器是作为嵌入式网络服务器运行的第二台 MSO4104B。

本应用指南首先概括介绍了作为互联网实现基础的互联网协议套件的工作原理，然后讨论了每个互联网协议层的运行。在整个应用指南中，我们都使用配有 DPO4ENET 的 MSO/DPO4000B，说明协议实例及其数据。本应用指南最后部分使用配有 DPO4ENET 的 MSO/DPO4000B 测量 10BASE-T 和 100BASE-TX 以太网信号。

互联网各个层	协议
应用层	超文本传送协议(HTTP)
传送层	传输控制协议(TCP)
网际层	网际协议第四版(IPv4)
链路层	10BASE-T & 100BASE-TX 以太网

表 1. 互联网协议套件各个层。

### 互联网协议套件

互联网的运行基础是互联网协议套件。协议是指定义了信息格式、信息传送过程和信息接收过程的规则和规程。互联网协议套件分成四个协议层：应用层、传送层、网际层和链路层 1 (参见表 1)。这些层采用各种协议标准。本应用指南使用的标准有：应用层采用超文本传送协议 (HTTP)，传送层采用传输控制协议 (TCP)，网际层采用网际协议第四版 (IPv4)，链路层采用 10BASE-T 和 100BASE-TX 以太网。这些协议标准在网上不同设备之间提供了网络互操作能力。

图 1 是应用层的 Microsoft Internet Explorer (IE) 请求网络设备 (示波器) 传送网页。请求从笔记本电脑应用层的 IE 超文本传送协议 2 (HTTP) 客户端发出。每个协议层使用协议封装上一层的信息。因此，在网页请求信息经过

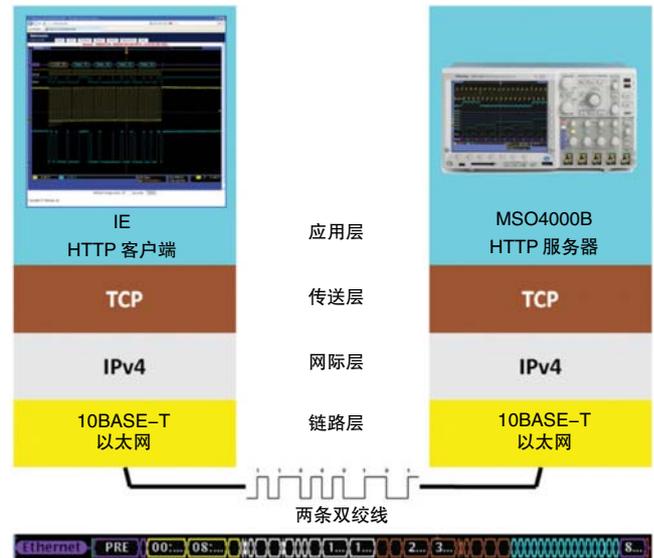


图 1. 互联网协议层与其它网络节点上的相同协议层及上一层和下一层通信。

笔记本电脑上的互联网协议的各个层时，会在请求中增加 TCP、IPv4 和 10BASE-T 以太网协议信息。

在图 1 底部，10BASE-T 以太网双绞线在笔记本电脑和示波器之间传送电信号。配有 DPO4ENET 的 MSO/DPO4000B 捕获电信号，解码底下三个协议层，如图 1 底部压缩的总线波形所示。



图 2. 在浏览器中显示的界面。



图 4. MSO/DPO4000B 带颜色代码的解码总线画面，显示了数据封装。

在示波器中，当网页请求沿着各个互联网协议层向上传送到应用层的 HTTP 服务器时，将解码和处理每条协议层消息信息。当收到网页请求时，示波器 HTTP 服务器会应答，向笔记本电脑发送一个超文本标记语言(HTTP)文件。这个 HTML 文件沿着示波器各个互联网协议层向上传送到 IT 应用。IE 在收到时显示示波器 HTML 文件(参见图 2)。

TCP 可以同时处理许多应用。图 3 显示了 TCP 有两个端口处理两种不同的应用类型。在本例中，端口 80 用于 HTTP，端口 20 用于文件传送协议(FTP)。

在图 3 中，底下三个层使用称为包的格式化信息单位。以太网标准使用的单位是帧，而不是包。某些包由一个包头字段和一个数据字段构成。通常情况下，较低级的协议包在数据字段中封装较高级的包。例如，带有 HTTP 应用消息的 TCP 包位于 IPv4 数据字段中。IPv4 包位于 10BASE-T 或 100BASE-TX 以太网帧数据字段中(参见图 3)。

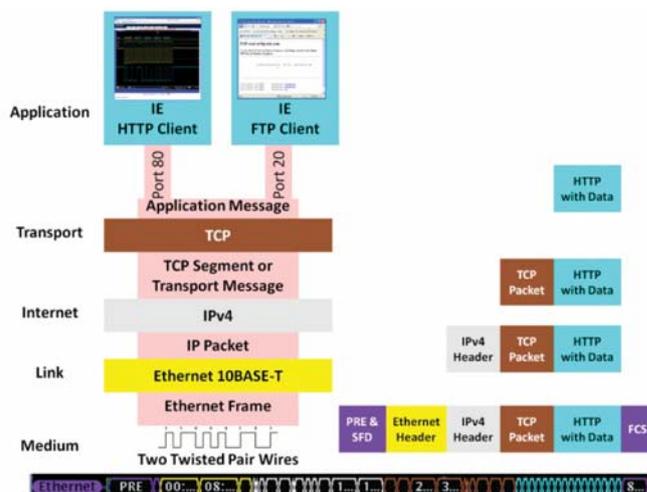


图 3. 到不同应用类型的 TCP 端口以及各层之间的数据封装。

为迅速识别不同的包字段，配有 DPO4ENET 的 MSO/DPO4000B 使用下面的颜色代码，参见图 4。

- 以太网帧头采用绿色竖线
- 以太网前置码(PRE)和帧分隔符开头(SFD)采用紫色
- 以太网包头为黄色
- IPv4 包头为褐色
- 数据为青色
- 以太网帧校验序列(FCS)为紫色
- 以太网帧尾采用红色竖线

包头偏置	字段名
0-15 位	源端口: 2 字节
16-31 位	目的端口: 2 字节
32-63 位	序列号: 4 字节
64-95 位	确认号: 4 字节
96-99 位	数据偏置: 4 位
100-103 位	预留: 4 位
104-111 位	8 个标记: 8 位
112-127 位	窗口: 2 字节
128-143 位	校验和: 2 字节
144-159 位	紧急指针: 2 字节
160-...位	选项

表 2. TCP 数据包格式。

### 超文本传送协议(HTTP)

从最上面的应用层开始，HTTP 是万维网的核心协议之一。网络浏览器采用 HTTP，从 HTTP 服务器获得格式化信息。网络浏览器是客户端，采用 HTTP 请求 HTML 文件、图像、电影、表单、等等。HTTP 服务器可以是网络服务器上的网站，也可以是嵌入式系统设备，如网络摄像机或仪器。

IE 和示波器都理解 HTTP 和 HTML 协议，成功地共同协作。此外，IE HTTP 客户端和示波器 HTTP 服务器是应用层，知道怎样与下面的传送层协作，以便与其它设备通信(参见图 1)。

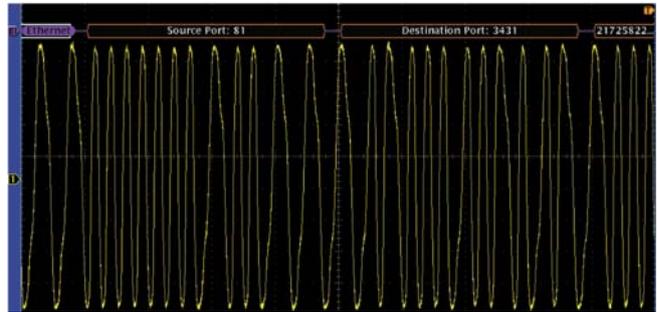


图 5. 在这个 10BASE-T 以太网采集中，TCP 包头是第 81 号源端口。

### 传输控制协议(TCP)

传输控制协议4 (TCP)是互联网协议套件传送层中广泛使用的一种协议。TCP 在网络节点之间可靠地交换数据。TCP 负责保障传送包、正确排列包顺序、确认包、避免传送重复包及包的完整性。

TCP 包中包含一个带 10 个字段的包头，外加一个可选的扩展字段。TCP 包中包含端口编号、标记、序列号等信息(参见表 2)。端口号码允许在两个网络节点之间建立多条连接。不同的应用类型在应用层和 TCP 之间使用不同的端口。

包头偏置	字段名称
0-3 位	版本
4-7 位	互联网包头长度(IHL)
8-13 位	差别化服务代码点(DSCP)
14-15 位	明确拥塞通知(ECN)
16-31 位	总长度
32-47 位	标识
48-50 位	标记
51-63 位	片段偏置
64-71 位	存活时间(TTL)
72-79 位	协议
80-95 位	包头校验和
12-15 字节	IPv4 源地址
16-19 字节	IPv4 目的地址
20-23 字节	选项
20 或 24 字节	数据

表 3. IPv4 包格式。

## 互联网协议(IPv4)

网际协议第4版(IPv4)用于互联网协议套件的网际层。计算机和设备使用 IPv4 地址定位及在互联网上相互通话。IPv4 地址识别网络及唯一的网络节点。

IPv4在互联网上把数据包从源网络节点传送到目的网络节点。这透过网络边界进行，在网络之间使用网关。为完成这一任务，IPv4 要处理寻址和数据包路由。

IPv4 地址是一种逻辑地址，与局域网寻址使用的硬件无关，适用于不同的局域网实现技术。IPv4 把逻辑地址与硬件地址映射起来。IPv4 地址是唯一的，可以包括网络号码、子网号码和网络节点号码。IPv4 地址由 4 个字节(32 位)组成，采用点分十进制符号写成。每个字节用十进制显示，通过时间周期分开。一个字节的范围是十进制值 0-255。

IPv4 包中包含多个包头字段和一个数据段。IPv4 字段有协议、IPv4 源地址、IPv4 目的地址、数据字段、等等。(参见表 3)。

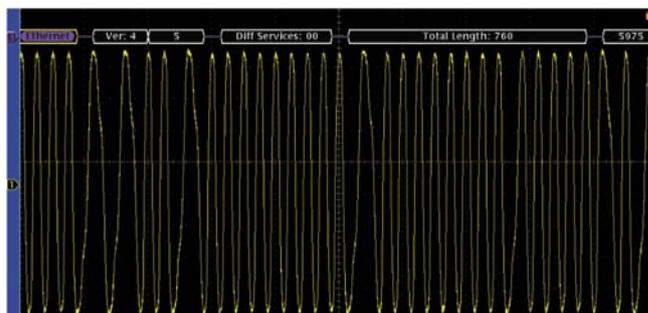


图 6a. 配有 DPO3ENET 的 MSO/DPO4000B 解码 IPv4 数据包，触发 IPv4 包字段。这个 10BASE-T 以太网采集结果表明，第一个 IPv4 字段是 version 4，第二个字段是 Internet Header Length 5，等等。

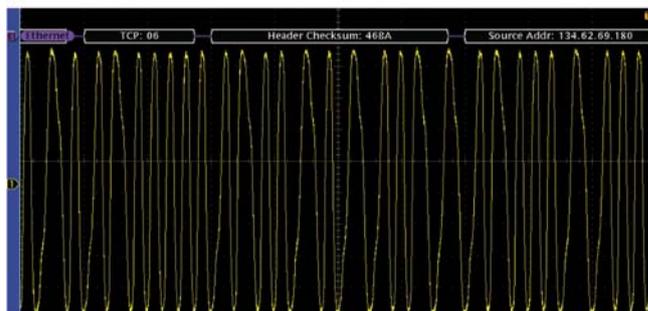


图 6b. IPv4 协议字段是 TCP，表明 TCP 消息位于 IPv4 数据字段中。

## 链路层

互联网协议套件的最底层是链路层，在网络节点之间提供物理接口。这个接口可以是电线、光纤，也可以是无线。数据根据物理硬件地址在不同网络节点之间传送。

10BASE-T 和 100BASE-TX 以太网是一种流行的链路层实现技术。大多数计算机都支持 10BASE-T 和 100BASE-TX 以太网。10BASE-T 和 100BASE-TX 的流行及其硬件实现成本不断下降，导致其在嵌入式系统中被广泛采用，如摄像机、安全系统、仪器、等等。

包头偏置	字段名称
0-6 字节	前置码(PRE): 7 字节
7 字节	帧头分隔符(SFD): 1 字节
8-13 字节	目的地址(DA): 6 字节
14-19 字节	源地址(SA): 6 字节
20-21 字节	长度 / 类型: 2 字节
22 字节	数据 + 填充位: 46-1500 字节
在数据末尾	帧校验序列(FCS): 4 字节

表 4. 10BASE-T 和 100BASE-TX 以太网帧格式。

### 以太网

以太网帧是局域网上传送数据的一个基本单位，帧朝着一个方向流动。

以太网帧是由七个字段组成的序列。以太网帧包括与以太网源地址、目的地址、包长度、长度/帧类型和数据有关的信息(参见表 4)。以太网帧长度最短，以便在半双工模式下进行碰撞检测。

帧传输从前置码(PRE)开始，10BASE-T接收机使用PRE进行启动同步。PRE 至少长 7 个字节，是 1 和 0 交替码型(参见图 7)。

PRE 的开头是 1，末尾是 0。第一个 PRE 位(1)可能会有相位违规或无效幅度，因为它从零伏开始。此外，某些 PRE 实现技术除要求的 7 个字节外，可能有额外的成对的 1 和 0。

100BASE-TX 的 PRE 字段相同，以实现向下兼容能力，但接收机同步不需要 PRE，因为 100BASE-TX 电接口编码不同于 10BASE-T。在不传输 10BASE-T 帧时，10BASE-T 信号为零。100BASE-TX 在帧之间传输一个空闲信号，象 10BASE-T 一样永远不会停止传输。因此，100BASE-TX 接收机一直有一个信号保持同步。

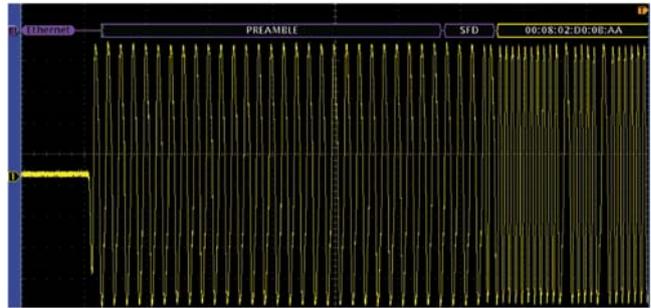


图 7. 以太网前置码(PRE)和帧头分隔符(SFD)。

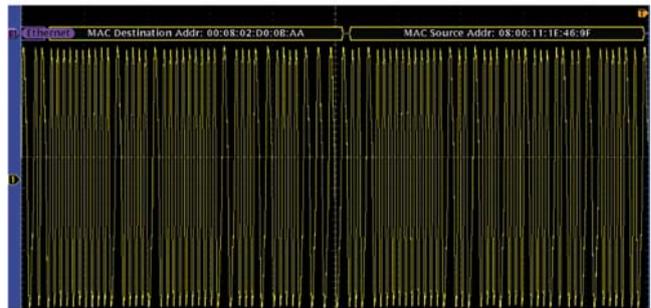


图 8. 10BASE-T 以太网 MAC 目的地址和 MAC 源地址。

帧头分隔符(SFD)表明它后面的帧头，SFD直接位于PRE后面。SFD是PRE的第二部分。SFD长1个字节，码型为 10101011。SFD 后面是帧字段。

SFD 后面是目的地址和源地址，这两个地址都长 6 个字节(参见图 8)。这些地址是物理地址，也称为媒体访问控制(MAC)地址。MAC 地址是硬件地址，对网络节点硬件是唯一的。每个网络节点有一个唯一的出厂时安装的 MAC 地址。这个硬件地址保证局域网上每个网络节点的身份是唯一的。

Time	Destination (hex)	Source (hex)	Length (hex)	Data (hex)
-6.203µs	FFFFFFFFFFFF	00D0C9B9C80D	800	IP: 4.5.0.E5.57.0.0 80,UDP,A185 134.62.69.176 134.62.69.255 008A 008A 00D1 5945 110E 965B 863E 4580

图9. 来自MAC地址00:D0:C9:B9:C8:0D的以太网广播地址FF:FF:FF:FF:FF:FF。事件表的第二行表明IPv4数据包中包含一个UDP包。

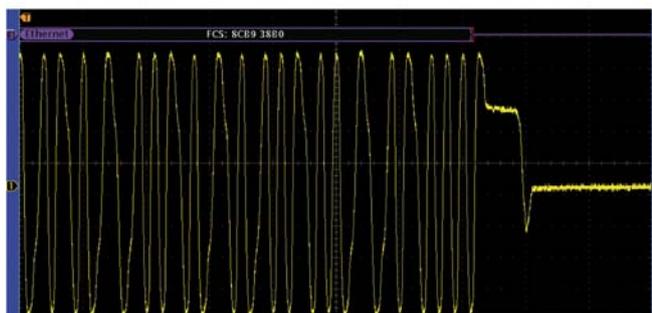


图11. 10BASE-T 4字节FCS帧校验序列(FCS), 末尾是TP\_IDL信号。

MAC 地址分成由两个十六进制数字组成的多个组。10BASE-T 和 100BASE-TX 从左到右传输 MAC 地址字节，每个字节先传送最低有效位。

目的地址可以包含表示一组网络节点的组播地址。组播地址的所有网络节点部分将接收帧。另外，所有网络节点将收到一个广播地址，广播地址是全部由 1 组成的地址(FF:FF:FF:FF:FF:FF)。在图 9 中，配有 DPO4ENET 的 MSO/DPO4000B 捕获了一个广播地址，解码成事件表。可以保存事件表，以进行存档及使用其它工具进行分析。

IEEE 注册中心分配和登记组织上唯一的标识符(OUI)。OUI是MAC地址的前三个字节。OUI被分配给以太网接口制造商。例如，OUI 08-00-11被分配给泰克公司。制造商使用最后三个MAC地址字节，识别特定的以太网接口。因此，以太网接口 MAC 地址在局域网上是唯一的。

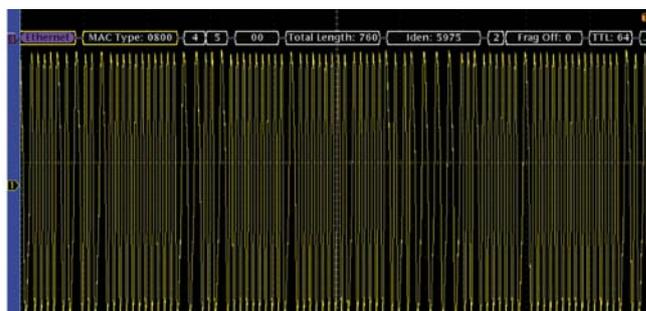


图 10. 10BASE-T 以太网 Length/Type (MAC Type)，网际协议类型为0800十六进制。Length/Type后面是以太网帧数据字段，其中包含IPv4包。

如果等于或小于 1,500 (05DC 十六进制)，Length/Type 字段是逻辑链路控制(LLC)字节数。如果大于 1536 (0600 十六进制)，那么Length/Type是类型。例如，类型2,048 (0800 十六进制)是网际协议，如图 10 所示，类型33,024 (8100 十六进制)是虚拟局域网(VLAN)。

以太网帧数据长 46–1500 个字节。如果数据小于 46 字节，那么数据字段会填充一个衬垫，变成长 46 字节。这个衬垫保证总包长足够长，可以识别双向延迟为50ms的碰撞。

帧校验序列(FCS)是一个长4个字节(32位)的循环冗余校验(CRC)值，用来检测错误。CRC 包括 Destination Address、Source Address、Length/Type、Data 和 Pad 字段。FCS MSB 最先传输，LSB 最后传输。

在没有传输 10BASE-T 数据时，会传输一个空闲信号(TP\_IDL)。在 10BASE-T 末尾，FCS 可以是空闲开头(TP\_IDL)。TP\_IDL 在 FCS 末尾一直以 1 开头，在两个位时间内一直是 1 (10BASE-T 最短 250 ns，参见图 10)。

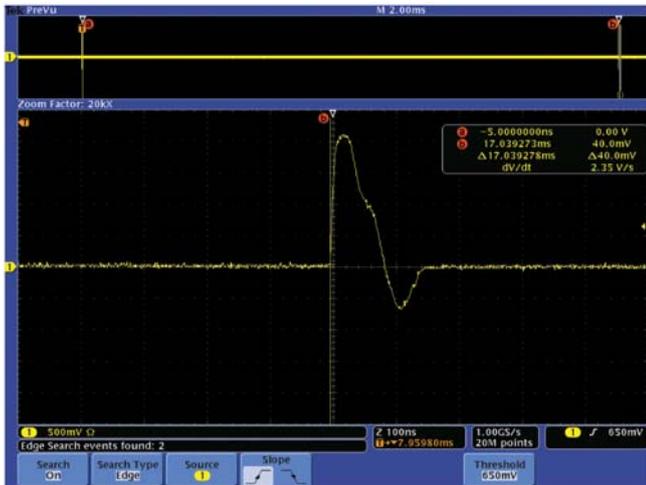


图12. 在10BASE-T IDLE期间, 链路测试脉冲每隔 16 ms ± 8 ms 传输一次。

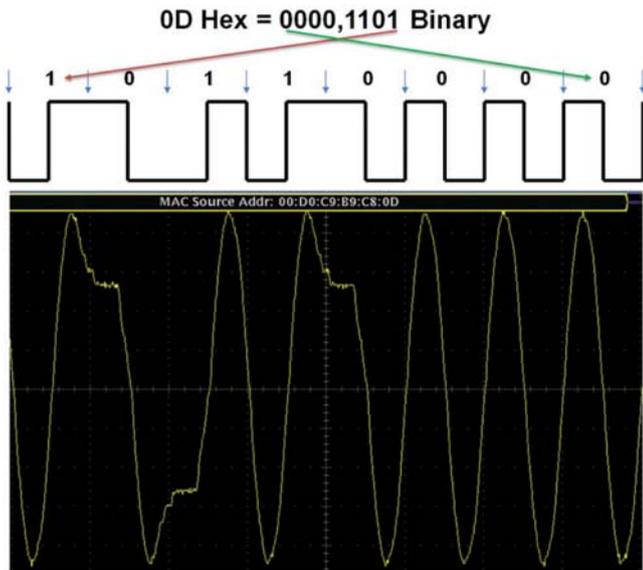


图14. 10BASE-T以太网曼彻斯特编码地址, 最低有效位位于字节最前面。

TP\_IDL开头后面没有跳变(差分电压一直保持在0 mV ± 50 mV), 直到下一个以太网帧或链路测试信号。在TP\_IDL期间, 10BASE-T链路测试脉冲每隔 16 ms ± 8 ms 传输一次。链路测试信号是585 mV – 3.1V的正脉冲, 最低宽 ~60 ns, 最高宽 ~200 ns。

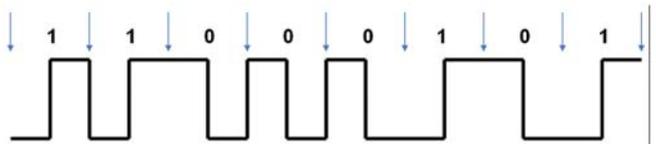


图13. 10BASE-T以太网曼彻斯特编码11000101, 在每个位中间有一个跳变。

以太网帧之间是96位的帧间空白(IFG)。10BASE-T IFG为 9.6 μs, 100BASE-TX IFG为 960 ns。在网络节点传输多个帧时, 它必须等一段时间, 这个时间等于传输下一个帧之前每个帧之间的IFG。

### 10BASE-T

10BASE-T以太网定义了网络节点之间特定的物理连接。10BASE-T采用三类(CAT3)以上电缆, 有两条非屏蔽双绞线(UTP)。这些双绞线在IEEE规范中称为媒体或介质。一个线对用于传输, 另一个线对用于接收。每个线对是一个差分信号。没有任何一个电缆线连接到网络节点的接地上。

### 10BASE-T 曼彻斯特代码

10BASE-T以太网是曼彻斯特编码数据, 其中数据信号和时钟信号结合在一起, 形成一条自同步数据流。跳变一直发生在每个位中间, 位信元周期为 100 ns。位的上一半是位的下一半的补数。结果, 10BASE-T没有DC成分。

IEEE Std 802.3TM-2008曼彻斯特编码数据把中间位上升沿定义为逻辑值1, 把中间位下降沿定义为逻辑值0。换句话说, 逻辑值1是位末尾的高电压, 逻辑值0是位末尾的低电压(参见图13)。

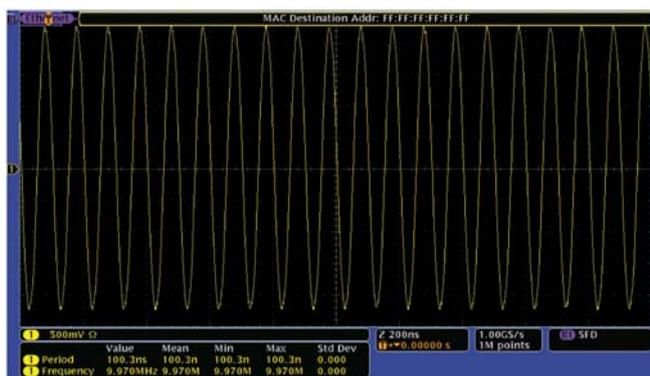


图 15. 全部为 1 的 10BASE-T 以太网曼彻斯特代码是一个 10 MHz 波形。

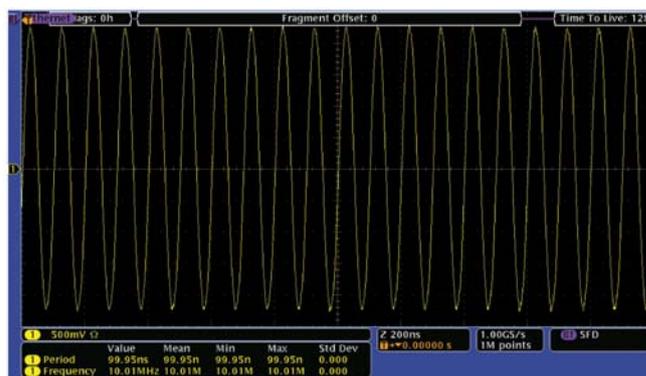


图 16. 全部为 0 的 10BASE-T 以太网曼彻斯特代码是一个 10 MHz 波形。全为零的码型与全为 1 的码型使用相位偏置区分。

以太网	示波器	探头	串行应用模块
10BASE-T	MSO/DPO4104B	TDP0500	
100BASE-TX	MSO/DPO4054B	500 MHz	DPO4ENET
	MSO/DPO4034B	差分探头	

表 5. 10BASE-T 和 100BASE-TX 推荐的设置配置。



图 17. 福禄克 8 线在线模块化适配器。

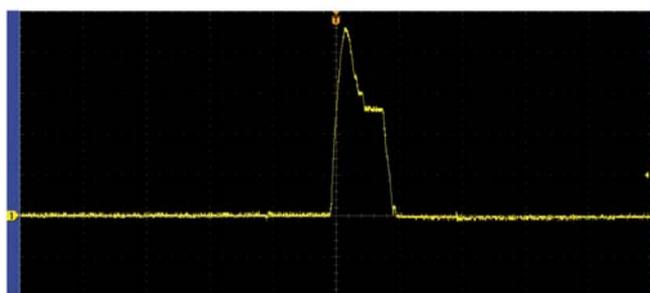


图 18. 正链路脉冲证明差分探头正确连接到 10BASE-T 以太网双绞线上。

全为 1 的突发或全为零的突发是一个 10 MHz 波形(参见图 15 和图 16)。全为 1 和全为零之间的差别在于方波形的相位，在数据流中间很难确定。配有 DPO4ENET 的 MSO/DPO4000B 在每次采集后自动解码 10BASE-T 以太网曼彻斯特编码信号，节约用户时间。

### 测试 10BASE-T 以太网

配有 DPO4ENET 串行应用模块的 MSO/DPO4000B 系列示波器触发、解码和搜索 10BASE-T 和 100BASE-TX 信号上的 TCP、IPv4 和以太网帧协议。表 5 说明了 10BASE-T 和 100BASE-TX 信号推荐的设备配置。

五类电缆没有地电平参考信号。因此，TDP0500 差分探头使用 Fluke Networks 8 线在线模块化适配器 (10230100) 访问 10BASE-T 信号。通过把两个探头输入连接到示波器前面板的 Probe Comp 接地上，选择对 TDP0500 探头自动清零，然后再把它连接到 10BASE-T 信号。然后，选择 TDP0500 4.25 V 标度，对探头自动清零。TDP0500 D+ 连接到引脚 1 上，TDP0500 D- 连接到引脚 2 上。

有两种方法，可以迅速检查 TDP0500 探头连接是否正确。第一种方法是在 10BASE-T 局域网处于空闲状态时，链路测试脉冲是一个单独的正脉冲。链路测试脉冲先变成正(最低 585 mV，最大 3.1 V)最短 60 ns (图 18)。在空闲状态下，链路测试脉冲在链路脉冲之间重复 16 ms ± 8 ms，信号电压为 0 mV ± 50 mV (参见图 12)。



图 19. 10BASE-T 以太网帧末尾两位正 TP\_IDL 信号证明差分探头正确连接到 10BASE-T 以太网双绞线上。

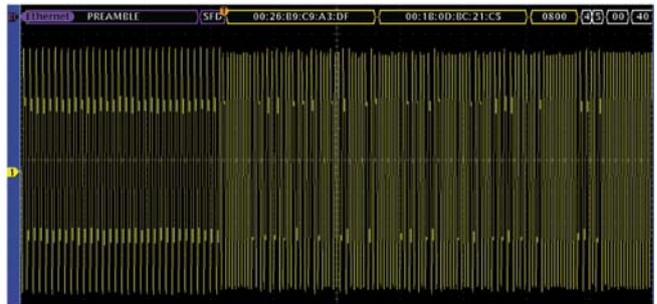


图 20. SFD 上触发的 10BASE-T 以太网帧采集。

以太网	位周期	示波器 最低采样率	20M 记录长度时 的时间跨度
10BASE-T	100 ns	100 MS/s	200 ms
100BASE-TX	8 ns	1 GS/s	20 ms

表 6. 解码 10BASE-T 和 100BASE-TX 的最低采样率要求。

第二种方法，在 FCS 末尾，可能有一个 TP\_IDL 信号，开头是 1，然后在 2 个位时间内(200 ns)是 1。因此，TP\_IDL 信号最短 250 ns，为正(参见图 19)。

MSO/DPO4000 垂直标度设置成差分信号尽可能多地填充垂直显示画面，而不会削掉波形。一个很好的起点是 500 mV/division，您可能需要调节垂直 Fine Scale。示波器总线解码要求每个位周期最少 8-10 个样点，以成功解码。因此，解码干净的 10BASE-T 信号使用的最低采样率为 100 MS/s (参见表 6)。

在不包括虚拟局域网(VLAN)标记包头(4个字节)时，没有 PRE、SFD 和 TP\_IDL 的 10BASE-T 帧最大为 1,518 字节 (1.2144 ms)。示波器的记录长度设为 1M，水平标度设为 1 ms/division。结果，10BASE-T 以太网信号以 100 MS/s 采样率采样，采集时间跨度为 10 ms，如果位于最大 1.2144 ms 的包长度中，那么将捕获整个数据包。

通过输入总线参数，包括选择 10BASE-T、差分探头、门限及打开/关闭 TCP/IPv4 解码，前面板上蓝色的 Bus 按钮可以定义 10BASE-T 以太网总线。10BASE-T 门限很好的一个起点是为逻辑值高预置值 500 mV，为逻辑值低预置值 -500 mV。Low 门限与前面板上的 Trigger Level 相同，当一个变化时，另一个也会跟着变化。示波器配置成触发 SDF，置于单次采集模式(参见图 20)。

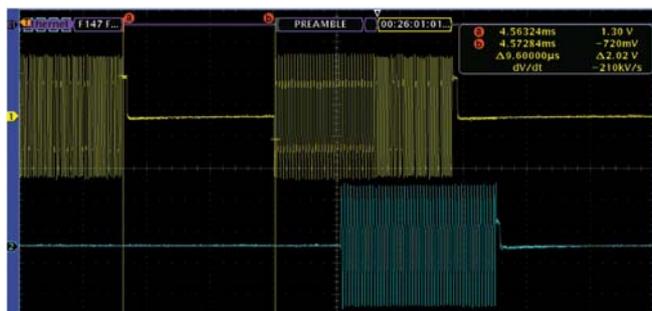


图 21. 10BASE-T 以太网帧采集使用光标测得的帧间空白为 9.6 μs，在两个信号之间有一个碰撞。

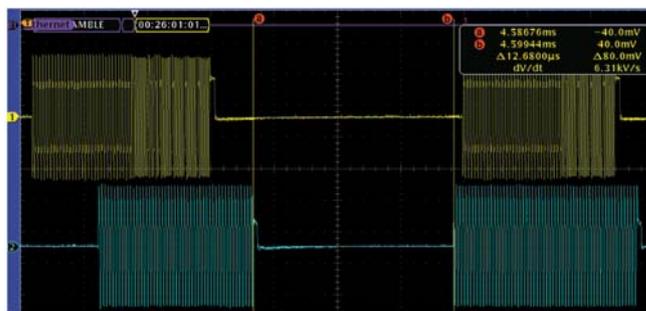


图 22. 10BASE-T 以太网帧采集在第一个碰撞后在底部 10BASE-T 波形上的帧间空白为 12.68 μs。第二个碰撞发生在显示画面右侧，在底部通道开始传输 PRE 之后。

图 21 使用光标测量 96 位的帧间空白 (IFG)，等于 9.6 μs。此外，碰撞发生在 10BASE-T 顶部波形的前置码 (PRE) 与底部 10BASE-T 波形开头的中间。这两个网络节点都识别碰撞，停止传输。

在第一个碰撞后，底部通道等了 12.68 μs，然后开始传输；顶部通道等了 15.88 μs，然后开始传输。这产生了第二个碰撞，如图 22 所示。在第二个碰撞后，底部 10BASE-T 信号成功地传输数据包。

### 100BASE-TX

100BASE-TX 以太网是快速以太网标准的一部分，它通过五类 (CAT5) 以上电缆以 100 Mit/s 的标称速率传送业务。在五类电缆中，100BASE-TX 使用一个线对进行传输，使用另一个线对进行碰撞检测及接收。与 10BASE-T 一样，100BASE-TX 以半双工或全双工模式工作。

十六进制数据	输入 4b	输出 5b
0	0000	11110
1	0001	01001
2	0010	10100
3	0011	10101
4	0100	01010
5	0101	01011
6	0110	01110
7	0111	01111
8	1000	10010
9	1001	10011
A	1010	10110
B	1011	10111
C	1100	11010
D	1101	11011
E	1110	11100
F	1111	11101

表 7. 100BASE-TX 4b5b 编码。

### 100BASE-TX 4B5B、扰码和 MLT-3 代码

100BASE-TX 以太网编码基于 ANSI X3.2631995 (TP-PMD)标准。传输经过三次转换。首先，传输采用 4B5B 二进制编码，防止可能导致接收机丢失时钟同步锁定的零字符串。第二，传输被加扰，以最大限度地降低电磁辐射。最后，传输使用多电平传输 3 (MLT-3)编码，以减少信号的高频成分。这三次变化使得手动解码 100BASE-TX 信号变得几乎没有可能。

符号	说明	输出
I	IDLE	11111
J	开头 #1	11000
K	开头 #2	10001
T	末尾	01101
R	复位	00111
H	传输错误	00100

表 8. 100BASE-TX 符号。

4B5B二进制编码用来防止长零字符串，因为这会导致接收机时钟同步没有数据边沿。参见表 7。4B5B 二进制编码把 4 位转换成 5 位，数据码型是最多 1 后面带 0 及最多后面两个 0。位速率从 4B5B 输入的 100 Mbps (每个位 10 ns)变成输出的 125 Mbps (每个位 8 ns)。

4 位数据使用 16 个 5 位输出代码。余下的另外 16 个输出代码用于协议。例如，参见表 8，其中显示了 IDLE (I)、Control (J, K, T 和 R)和 Transmit Error (H)的输出代码定义。其余没有使用的 5 位输出代码没有定义，是无效代码。

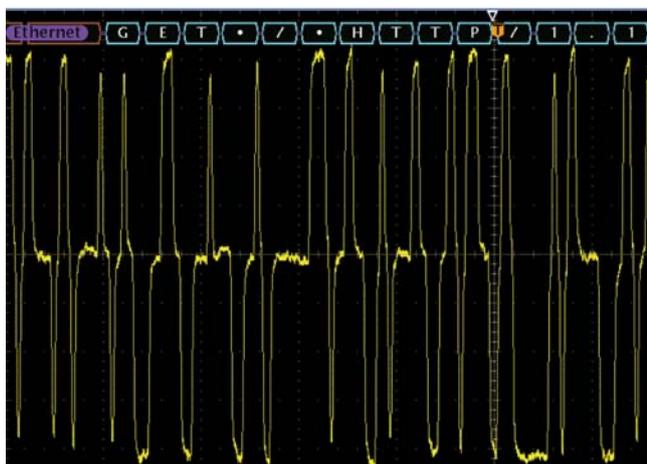


图 23. 100BASE-TX 扰码波形。把这个波形与图 24 比较，其中数据相同，时间不同，波形不同。

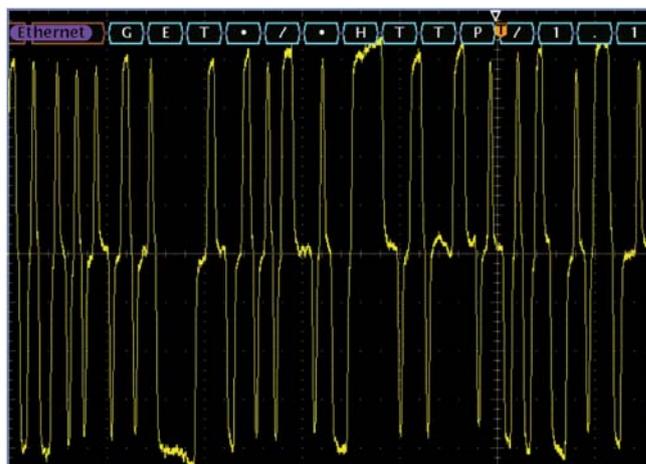


图 24. 100BASE-TX 扰码波形。把这个波形与图 23 比较，其中数据相同，时间不同，波形不同。

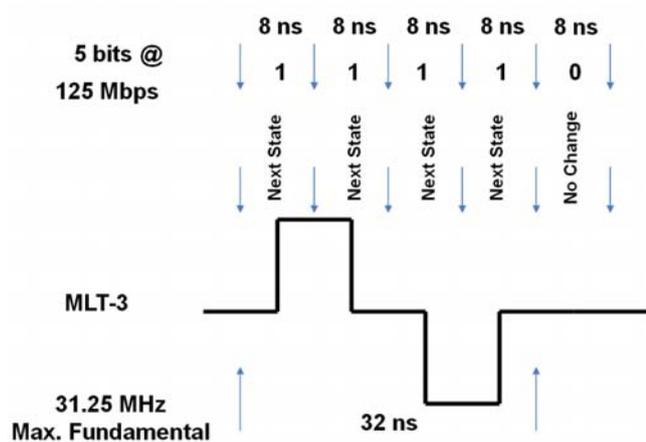


图 25. 100BASE-TX MLT-3 编码的最大基础频率为 31.25 MHz。

在 4B5B 编码后，传输被加扰，以最大限度地降低电磁辐射。加扰的传输导致在不同时间传输的相同数据值有不同的波形码型。参见图 23 和图 24。

多电平传输 3 (MLT-3) 编码采用三个电压电平 (三种状态)。MLT-3 连续循环通过状态 -1、0、+1、0、-1、0、+1、0，依此类推。逻辑值高导致移到下一种状态，逻辑值低导致保持相同状态。

4 位输入符号速率是 100 Mbps (10 ns/位)，4B5B 输出符号速率是 125 Mbps (8 ns/位)。在 MLT-3 编码后，最大基础频率为 31.25 MHz。参见图 25。

对非屏蔽双绞线电缆，MLT-3 差分信号为 950 mV-1050 mV。

通过接收 IDLE 符号检验 100BASE-TX 链路完整性，IDLE 符号在帧之间传输。此外，IDLE 符号保持接收机时钟同步。

100BASE-TX 数据流开头分隔符 (SSD) 位于以太网帧 PRE 前面，是符号序列 J 后面跟着 K。100BASE-TX 数据流结尾分隔符 (ESD) 位于以太网帧 FCS 后面，是符号序列 T 后面跟着 R。H 符号用来传播接收错误。



图 26. 在 20 ms 采集中在 SFD 上标出 10 个 100BASE-TX 以太网帧。帧 SFD 之间的导航通过 Wave Inspector 前面板上的箭头键简便完成。

### 测试 100BASE-T 以太网

100BASE-TX 探测配置与上一节中的 10BASE-T 相同。如表 9 所示，100BASE-TX 推荐的最低采样率为 1 GS/s。当 MSO/DPO4000B 配置成 20 M 点记录长度和 2.00 ms/division 时，MSO/DPO4000B 在采样率为 1 GS/s 时的最大时间跨度为 20 ms。触发设为 100BASE-TX 以太网帧头(SFD)，进行一次采集。

MSO/DPO4000B 系列示波器在所有通道上提供了高达 20 M 点的波形记录，相当于 20,000 多个全分辨率屏幕数据。如果按每秒一个全分辨率屏幕(1,000 点)的速度计算，那么滚动通过 20M 点的波形需要五个半小时以上。MSO/DPO4000B Wave Inspector 是一种搜索和导航功能，简化了处理大型采集的任务。MSO/DPO4000B 集成了触发和搜索功能，触发设置被复制到搜索中，搜索设置被复制到触发中。在这种情况下，100BASE-TX 以太网帧头触发设置被复制到搜索中。Wave Inspector 在几秒钟内，搜索并标记 20M 点记录中所有 SFD。SFD 标记是图 26 中波形上方的白色空心三角形。注意 100BASE-TX 传输连续的 IDLE 符号，双绞线一直活动，如果没有标记，眼睛很难找到 20 M 点采集中的数据。在找到和标记 SFD 以后，只需按 Wave Inspector 前面板上的 Previous 和 Next 箭头键，就可以在发生的帧头之间导航。

开始帧分隔符。

- MAC 地址。
- 触发 48 位源地址和目的地址。
- MAC 长度 / 类型。
- 在  $\leq$ ,  $<$ ,  $=$ ,  $>$ ,  $\geq$ ,  $\neq$  特定 16 位值或落在范围内或落在范围外时触发。
- MAC 客户端数据。
- 在  $\leq$ ,  $<$ ,  $=$ ,  $>$ ,  $\geq$ ,  $\neq$  特定数据值或落在范围内或落在范围外时触发。触发的字节数量可以在 1-16 之间选择。字节偏置选项为无所谓、0-1499。

MAC Q 标记控制信息。

- 触发 Q 标记 32 位值。
- IP 包头。
- 触发 IP 包头 4 位值、源地址、目的地址
- TCP 包头。
- 触发目的端口、源端口、序列号和确认号。
- TCP/IPv4 客户端数据。

在  $\leq$ ,  $<$ ,  $=$ ,  $>$ ,  $\geq$ ,  $\neq$  特定数据值或落在范围内或落在范围外时触发。触发的字节数量可以在 1-16 之间选择。字节偏置选项为无所谓、0-1499。

- 包尾。
- FCS (CRC) 错误。

表 9. MSO/DPO4000B 系列示波器，配有 DPO4ENET 串行应用模块 10BASE-T 触发和搜索。

- 开始帧分隔符。
- MAC 地址。

触发 48 位源地址和目的地址。

- MAC Q 标记控制信息。
- 触发 Q 标记 32 位值。
- MAC 长度 / 类型。

在  $\leq$ ,  $<$ ,  $=$ ,  $>$ ,  $\geq$ ,  $\neq$  特定 16 位值或落在范围内或落在范围外时触发。

- IP 包头。
- 触发 IP 包头 4 位值、源地址、目的地址、TCP 包头。

触发目的端口、源端口、序列号和确认号。

- TCP/IPv4 客户端数据。

在  $\leq$ ,  $<$ ,  $=$ ,  $>$ ,  $\geq$ ,  $\neq$  特定数据值或落在范围内或落在范围外时触发。触发的字节数量可以在 1-16 之间选择。字节偏置选项为无所谓、0-1499。

- 包尾。
- 空闲。
- FCS (CRC) 错误。

表 10. MSO/DPO4000B 系列示波器，配有 DPO4ENET 串行应用模块 100BASE-T 触发和搜索。

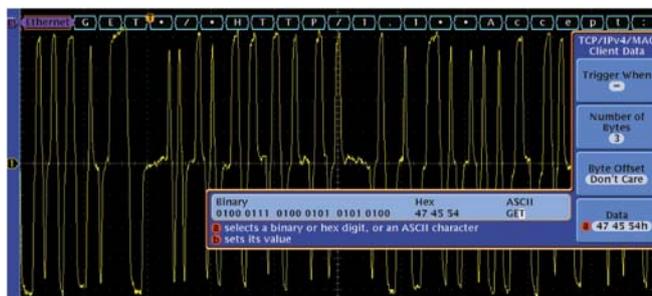


图 27. 100BASE-TX 采集, 触发 TCP 数据字段中的 HTTP “GET” 命令。

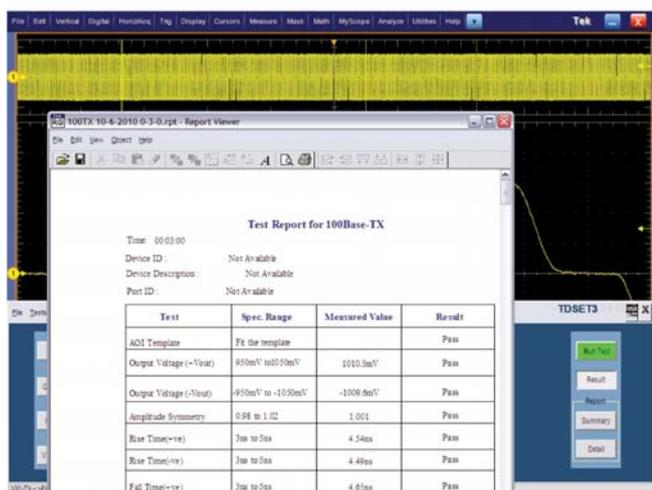


图 29. 测试通过 / 失败状态及详细报告。

## MSO/DPO4000B 触发和搜索

配有 DPO4ENET 串行应用模块的 MSO/DPO4000B 系列示波器为 10BASE-T 和 100BASE-TX 以太网信号提供了一套完善的触发功能。高级触发功能包括 TCP/IPv4 协议和客户端数据, 如表 9 和表 10 所示。图 27 显示了 100BASE-TX 采集触发 TCP 数据字段中的 HTTP GET 命令。

## 10BASE-T 和 100BASE-TX 物理层一致性测试

如果没有正确的信号保真度, 系统互操作能力可能会不可靠。网络系统中存在着各种不同的运行条件, 因此, 确定设计变化对信号完整性的影响十分重要。以太网测试要求基本参数测量, 如幅度和上升时间以及抖动、模板测试、等等。通过 TDSET3 以太网一致性测试软件及 MSO/DPO5000 系列、DPO7000 系列和 DPO/DSA/MSO70000 系列示波器, 泰克提供了 10BASE-T 和 100BASE-TX 以太网电信号一致性测试功能。

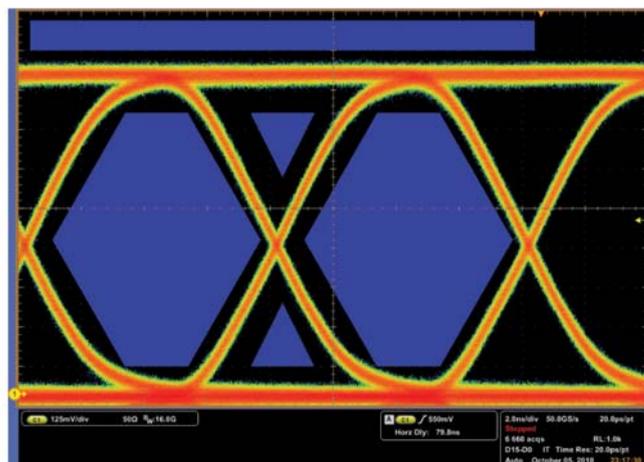


图 28. 基于 IEEE Std 802.3-2008 标准的 100BASE-TX 模板测试。

TDSET3 以太网一致性测试软件为调试和验证 10BASE-T、100BASE-TX 和 1000BASE-T 以太网物理层提供了多种测试功能。TDSET3 提供了单键自动测试功能, 拥有准确的归一化和干扰源消除功能, 保证可靠的结果。自动抖动测量功能不需用户干预, 实现快速可靠的测量。模板自动拟合和定位功能最大限度地缩短了测试时间(参见图 28)。自动通过 / 失败通知提供了快速测试结果, 报告编制程序节约了编制测试结果文档的时间(参见图 29)。

## 小结

以太网和相关串行总线已经成为行业标准, 在当前许多嵌入式电路中广泛使用。解码这些总线采用的传统手动解码方法耗时较长。通过使用自动触发、解码和搜索工具, 可以简便地调试和找到设计问题的成因。

配有 DPO4ENET 串行应用模块的 MSO/DPO4000B 系列示波器可以迅速捕获和分析 10BASE-T 和 100BASE-TX 信号上的 TCP/IPv4 / 以太网帧协议。这些解码后的协议和波形在示波器显示屏上与其它串行/并行总线、模拟信号和数字信号时间相关, 可以全面了解设计, 迅速检验和调试嵌入式系统。TDSET3 以太网一致性测试软件与相应的示波器相结合, 可以对 10BASE-T、100BASE-TX 和 1000BASE-T 以太网物理层进行全面的模拟验证、一致性测试和器件检定。

## 参考资料

IETF RFC 请参阅 <http://www.ietf.org/>，可以查看哪些其它 RFC 与您访问的 RFC 有关。

1. IETF RFC-1122 互联网主机要求 – 通信层。
2. IETF RFC-2616 超文本传送协议 – HTTP/1.1。
3. W3C HTML 4.01 规范请参阅 <http://www.w3.org/TR/html401/>。
4. 与 TCP 相关的 IETF RFC 有：RFC 3168, RFC 2581, RFC 1122, RFC 793 和 RFC 675。
5. 与 IPv4 相关的 IETF RFC 有：RFC 3260, RFC 3168, RFC 2474, RFC 1349 和 RFC 791。
6. 100BASE-TX 物理层一致性测试(61W-17381-2)应用指明说明了 TDSET3 以太网一致性测试软件怎样提供多种 100BASE-TX 测试，保证验证结果。
7. IETF RFC-1180 TCP/IP 教程。
8. 10BASE-T 和 100BASE-TX 规范是 IEEE Std 802.3TM-2008 Part 3 的一部分：载波感应多址及碰撞检测(CSMA/CD)访问方法和物理层规范。IEEE Std 802.3™-2008 请参阅：<http://standards.ieee.org/getieee802/index.html>。

### 如需进一步信息

泰克维护完善的一套应用指南、技术简介和其它资源，并不断扩大，帮助工程师处理尖端技术。请访问：[www.tektronix.com.cn](http://www.tektronix.com.cn)



版权所有 © 泰克公司，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国国外专利的保护。本文中的信息代替以前出版的所有资料。技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。Tektronix 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文提到的所有其它商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。