

TSN网络示例

作者: Volker E. Goller

简介

通过时间敏感网络(TSN)评估套件, 客户可将几乎任何现有以太网设备连接到 TSN 网络。这种网络的最简单情况是纯线形拓扑, 由多个此类 [TSN 评估套件](#) 组成。

但是, 该套件也可配合其他供应商的 TSN 解决方案工作, 只要这些解决方案支持同样的特性集。目前, 该套件支持 802.1Qbv (计划流量) 和 802.1AS (时钟同步)。

该套件提供 3 个以太网端口, 参见图 1。它支持几乎所有标准以太网设备, 包括运行 EtherNet/IP、PROFINET RT、

ModbusTCP、BACnet IP 或任何其他 IP 协议 (PROFINET IRT、EtherCAT、SERCOS 和 POWERLINK 除外) 的设备。

本应用笔记旨在引导 ADI 公司 [TSN 评估套件](#) (以下简称为“TSN 套件”) 的用户完成配置和运行 TSN 网络所需的步骤。

本应用笔记并未取代 TSN 套件文档, 用户仍需要阅读该文档。本应用笔记必须同 [TSN 评估套件快速入门指南](#) 和 [fido5100/fido5200 实时以太网多协议\(REM\)交换机数据手册](#) 一起使用。

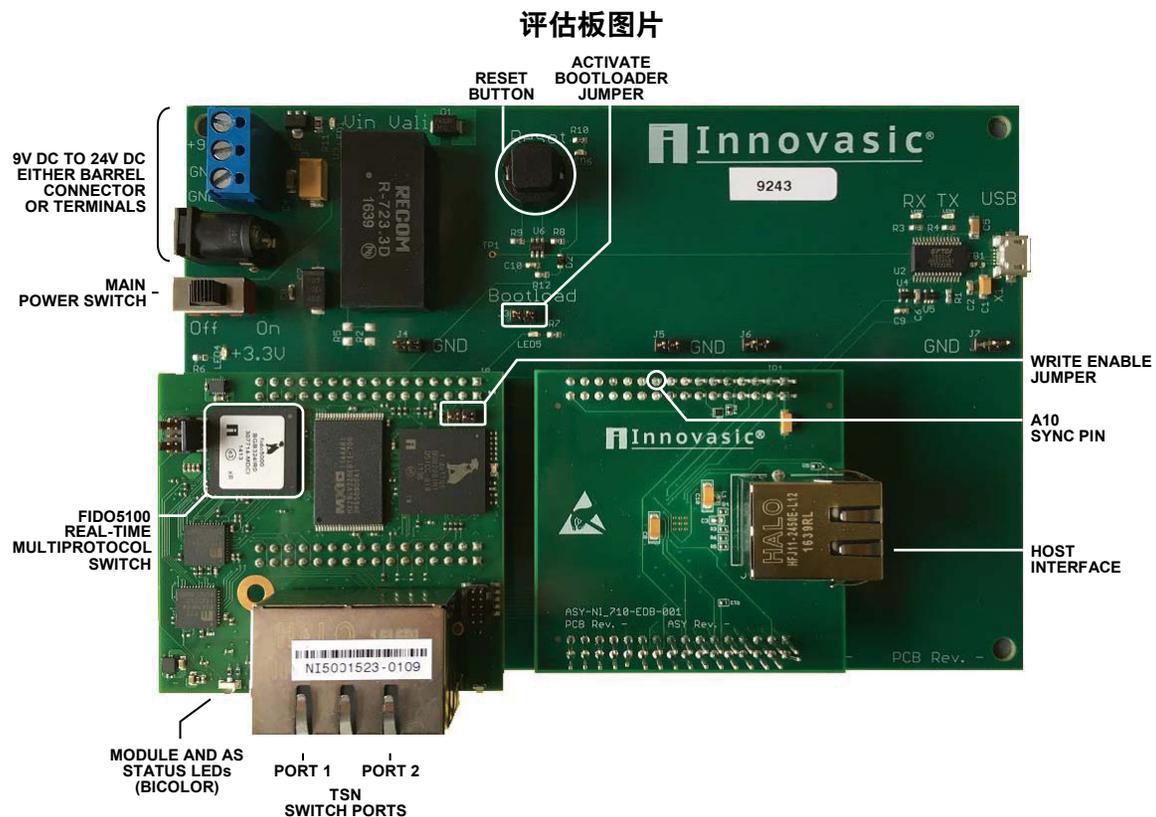


图1. 评估套件

目录

| | | | |
|----------------|---|-------------------------|----|
| 简介..... | 1 | 使用 Wireshark 和 TAP..... | 6 |
| 评估板图片..... | 1 | 完成基本设置并运行..... | 6 |
| 修订历史..... | 2 | 检查 802.1AS..... | 7 |
| 开始使用..... | 3 | 设置 TSN 流..... | 8 |
| 评估板端口..... | 3 | 创建和设置 802.1Qbv 计划..... | 10 |
| 电源..... | 3 | 本演示所用计划..... | 17 |
| 配置 TSN 套件..... | 3 | 结语..... | 18 |
| 示例设置..... | 4 | 参考文献..... | 18 |
| 主机端口..... | 5 | | |

修订历史

2017 年 10 月—修订版 0: 初始版

开始使用

按照 [TSN 评估套件快速入门指南](#) 中的说明，设置 PC 并将其连接到 TSN 评估套件。

评估板端口

必须将 PC 连接到一个 TSN 以太网端口以进行配置。有 3 个端口，其中之一是主机端口，位于印刷电路板(PCB)较窄的一侧，必须连接现有以太网设备。器件的标准以太网流量转发到交换机 TSN 端口（位于 PCB 较宽的一侧）。这种转发必须在配置任何 TSN 特性之前正常工作。

通过主机端口无法访问配置网站。TSN 套件的默认 IP 地址为 192.168.1.1。

电源

使用随套件提供的电源为设备供电，或者也可以利用螺丝端子供电。电路板设计支持 9 V 至 24 V 直流电压。

若使用螺丝端子，务必按照 PCB 上的标识连接。注意，交付时 PCB 未接通电源。

配置 TSN 套件

下面的例子将四个 TSN 套件配置为线形拓扑结构。因此，所有 TSN 套件都配置有唯一媒体访问控制(MAC)地址和唯一 IP 地址。这些地址通过 **网关设置** 菜单选择设置，其位于 [TSN 评估套件](#) 网页上。要启用 MAC 地址写入，首先应短接写入使能跳线。一次只能设置一个 TSN 套件。

注意，当设置 MAC 和 IP 地址时，最佳做法是将设备系列号的最低三位用作相应地址的最低三位，因为系列号总是印制在 TSN 端口的双 RJ45 连接器上（RJ45 位置参见图 1，最低三位为 109）。如果发生地址冲突（这种情况很少见），请使用设备系列号中的更多位数。这样做有助于记清多个电路板的 IP 地址。

如果用在在线形拓扑中，最好根据 IP 地址以升序或降序（由用户酌情决定）摆放电路板。这样有助于记清对电路板所做的变更。在用于配置套件的 PC 上，在浏览器中为每个电路板打开一个单独的标签页，并按照实际出现的顺序将这些标签页与套件关联起来（参见图 2）。

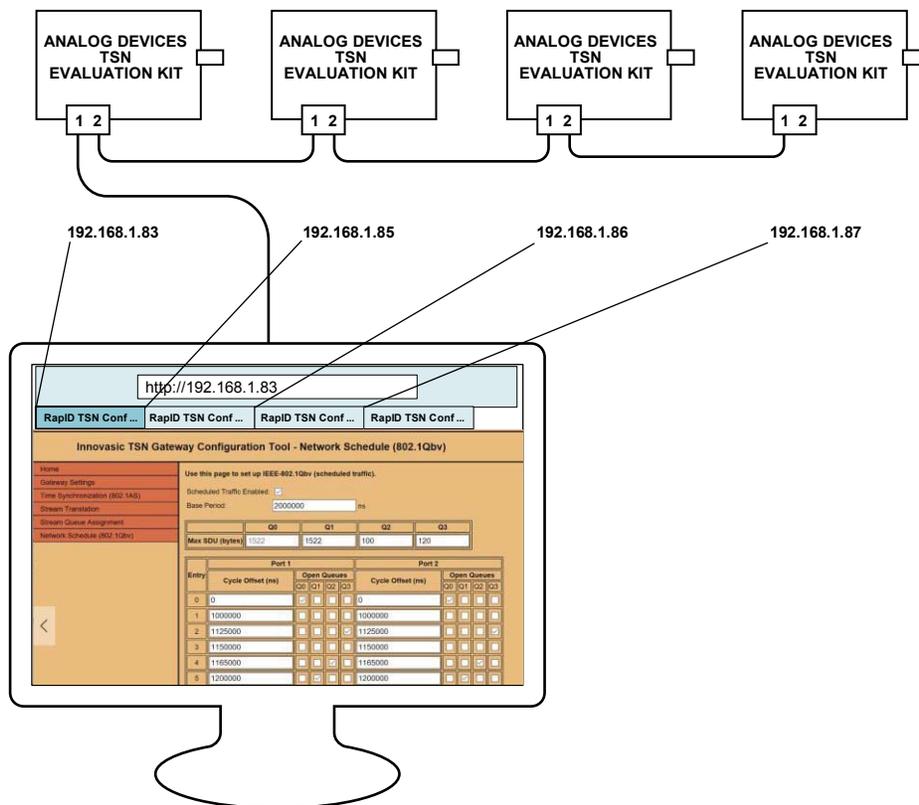


图 2. 整理地址和 TSN 套件，端口与计划配置页面布局对齐

16330-002

示例设置

完整设置如图 3 所示。四个 TSN 套件连成线形拓扑，构成 TSN 段。此时，TSN 尚未配置，一切还是运行标准以太网。在边界端口（TSN 段两端的开放端口）上连接标准非 TSN 设备。在本演示中，TSN 段右侧连接一个网络摄像头，左侧连接显示器或 PC 以显示网络摄像头拍摄的视频。

为显示网络摄像头直播视频，用于配置该演示的 PC 也可用来显示直播视频。这样在显示网络摄像头视频的同时，还能通过 Web 服务器调整 TSN 套件设置。

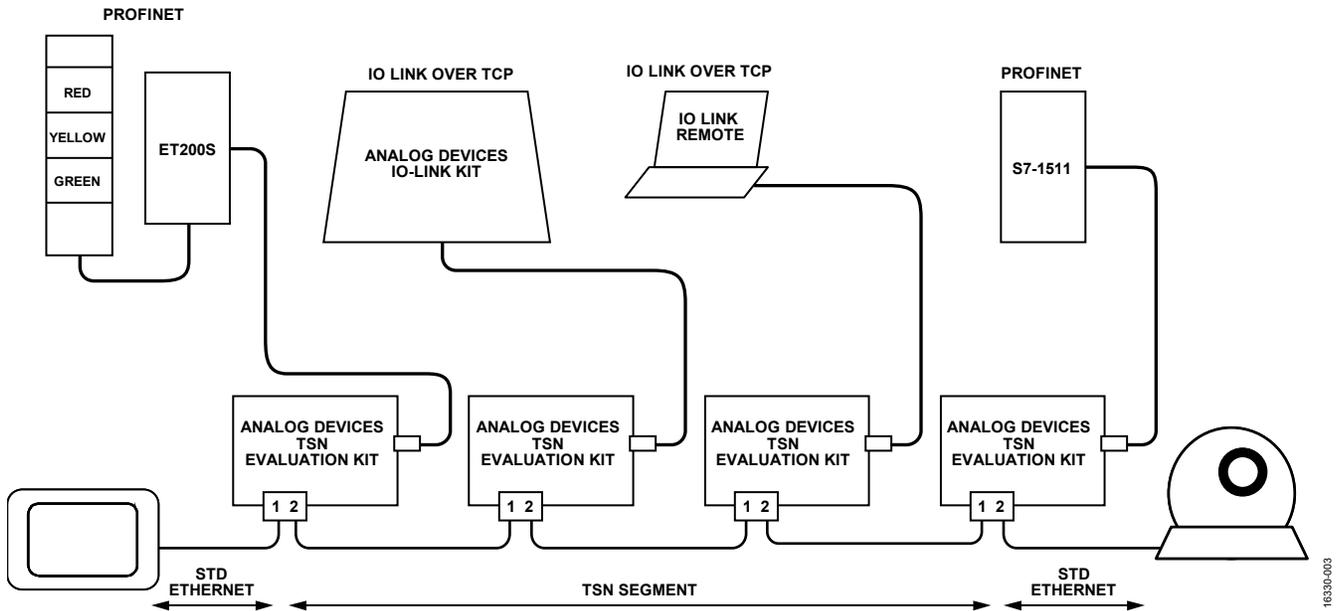


图 3. 示例设置

主机端口

利用 TSN 套件设置 TSN 网络的一个重要步骤是让网关知道连接到主机端口的设备 MAC 地址。将此地址分配给主机端口，双端口 TSN 交换机便可识别指向该端口（更确切地说是指向连接到该端口的设备）的数据包。从技术上讲，此 MAC 地址被添加到交换机静态转发数据库中。

为完成设置主机 MAC 的任务，必须知道连接到主机端口的设备 MAC 地址。在自动化设备（如 PROFINET 设备）上，MAC 印制在设备外壳上，参见图 4。

一旦找到，便需要将主机 MAC 地址输入 Web 服务器的网关设置页面的**客户端** MAC 字段中。



图 4. 西门子 S7-1511 控制器 MAC 地址

在 Windows® 系统中，物理地址可通过网络适配器状态检索到。单击**本地连接状态**对话框的**常规**选项卡中的**详情**按钮。更多信息参见图 5。

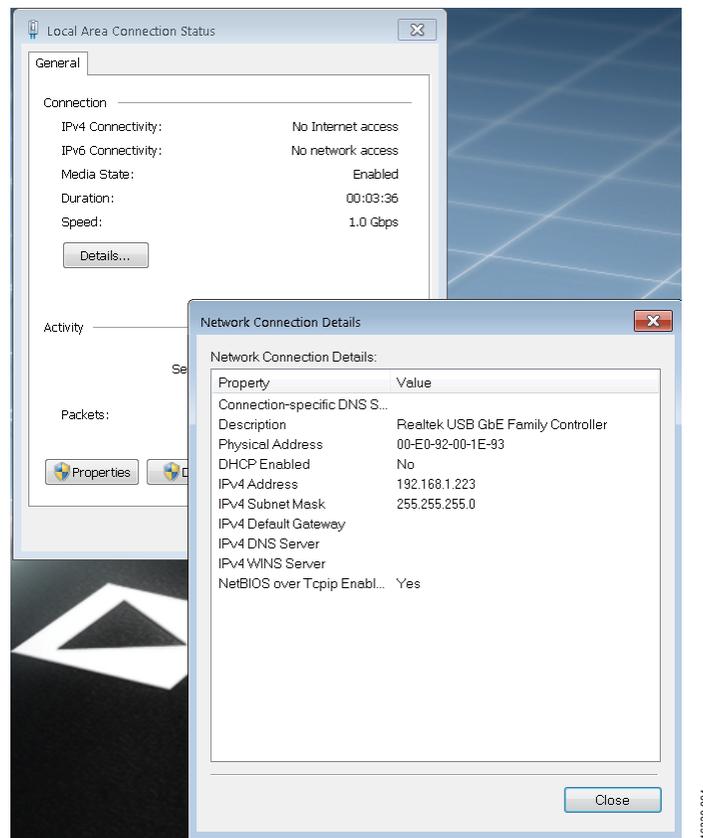


图 5. 找到 Windows 适配器 MAC 地址

使用 Wireshark 和 TAP

如果 MAC 不可用,最容易的方法可能是利用 Wireshark 等工具观察进出设备的数据包。进入设备的数据包的 MAC 地址在以太网帧的目标 MAC 地址字段中(只要不使用多播或广播消息),从设备离开的数据包的 MAC 地址封装在以太网帧的源 MAC 地址字段中。

使用 Wireshark 对调试设置很重要。设置 [TSN 评估套件](#) 之前,强烈建议安装并熟悉 Wireshark。

然而,使用 Wireshark 并不意味着所有流量都能看到,因为以太网内的数据包不是大量涌入的;相反,各交换机都有转发数据库,用来确定数据包应通过哪个端口离开,此时其到达目的地的路由路径最短。因此,建议获取一个以太网线路测试接入点(TAP)。

TAP 是一种无源以太网元件,它自己不发送流量,也不会引起延迟,但允许人们侦听任一方向流过的所有数据包。很多供应商提供 TAP,在互联网上快速搜索“以太网 TAP”或“以太网测试接入点”会返回许多结果,包括自己制作方案。本例使用 KUNBUS TAP2100,因为它能同时侦听两个连接,并且内置高分辨率时基(8 ns)。

同时侦听两个通道的能力有利于调试,可以在交换机前后分别侦听,以确定交换机是否滤除消息,或者是否正确地将消息转换到 TSN 流中。

完成基本设置并运行

用于演示的所有电路板和设备按照图 3 所示设置示例连接好后,所有 TSN 套件都可利用 Web 浏览器进行访问,根据图 2 所示配置,所有主机 MAC 地址都被添加到网关设置中,基本设置即告完成。除 TSN 外,此设置应像任何其他以太网第 2 层段一样运行。

TSN 的优势在于它扩展了标准以太网,交换机在第 2 层上发话,而不是第 3 层,允许使用不同 IP 子网地址以避免地址冲突。

在不涉及 TSN 的情况下,仍可设置所有需要的通信关系:

- 创建一个项目,连接 S7-1511 和 ET200S。IP 子网为 192.168.0.xxx。
- 利用 IP 子网 192.168.10.xxx 连接 IO 链路演示。
- 利用 IP 子网 192.168.21.xxx 设置和连接网络摄像头。

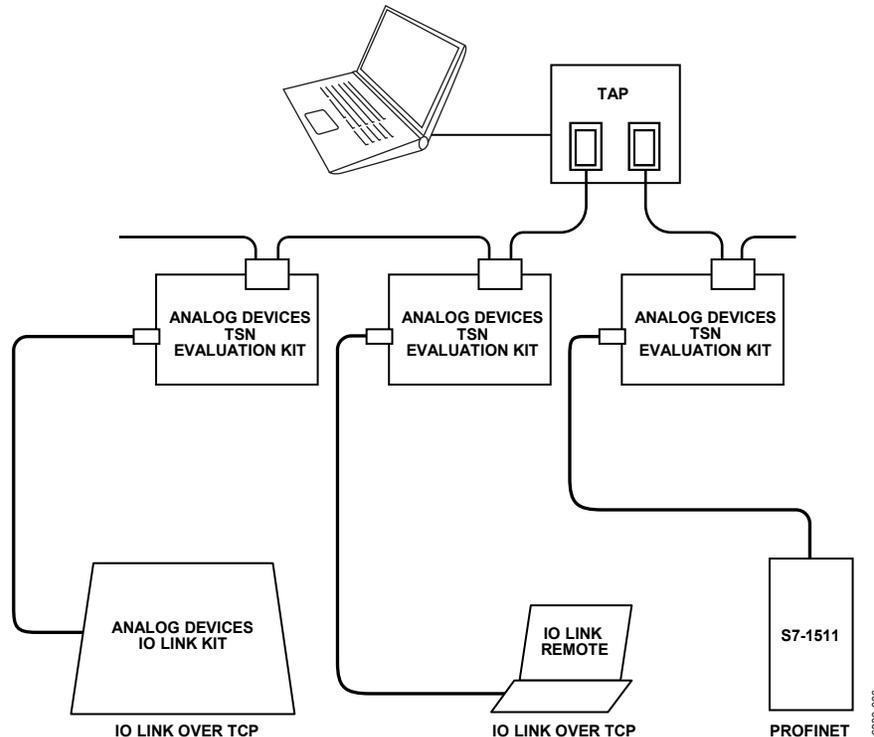


图 6. 设置中的以太网线路 TAP

检查 802.1AS

设置之后，802.1AS 时间同步即可运行。其中一个电路板承担宗时钟(grandmaster clock)的角色，标志是其 802.1AS 状态 LED 变红（参见图 1）。在同步从设备上，当时钟同步已建立时，802.1 状态 LED 变绿。

在 [TSN 评估套件](#) 网页上检查 AS 的状态，必须了解 AS 是对等时钟。宗机(grandmaster)对两个 TSN 端口来说均为主机，但其他套件对宗机来说是从机，对离开宗机更远的节点来说

是主机。端口角色框报告端口处于从机还是主机模式。如果网关不是宗机，则一个端口报告其处于从机模式，另一端口报告其处于主机模式。如果网关是 TSN 网络上的宗机，则两个端口均报告其处于主机模式，更多信息参见 [TSN 评估套件快速入门指南](#)。对等方案如图 7 所示。

注意，创建并启用计划之后，802.1AS 服务要求队列 3 在 TAS 周期中的某一时间点打开。

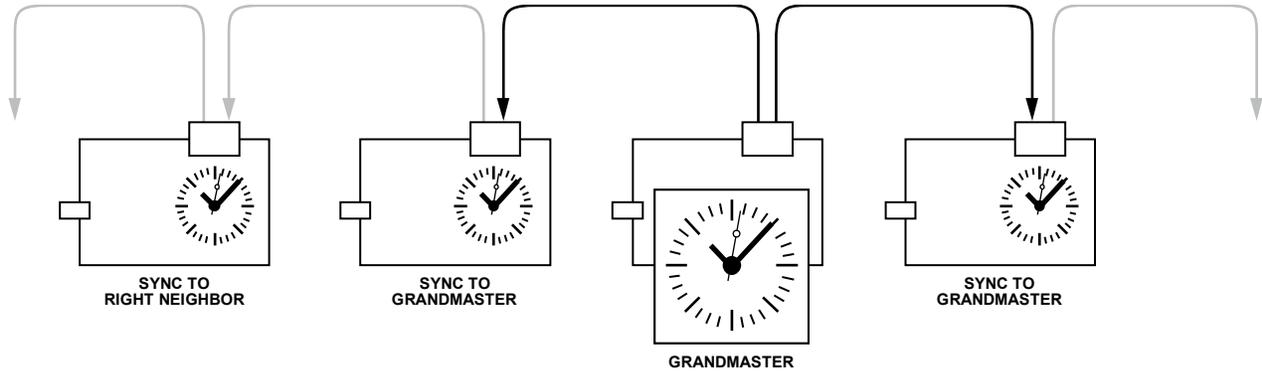


图7. 802.1AS 对等同步

16330-007

指定宗机功能

启动时,设备利用最佳主机时钟算法(BMCA)选择一个时钟宗机。多数情况下,这就足够了,不需要进一步关注。但是,有些情况下使用固定宗机可能更好。

使用时间同步页面上的“本地主机优先级 1:”和“本地主机优先级 2:”条目,可以引导最佳主机算法选择特定板作为宗时钟。图 8 显示一个调整后的 TSN 套件。优先级 1 设置为 200 (优先级高于默认 248;因此,该板承担宗机时钟角色)。

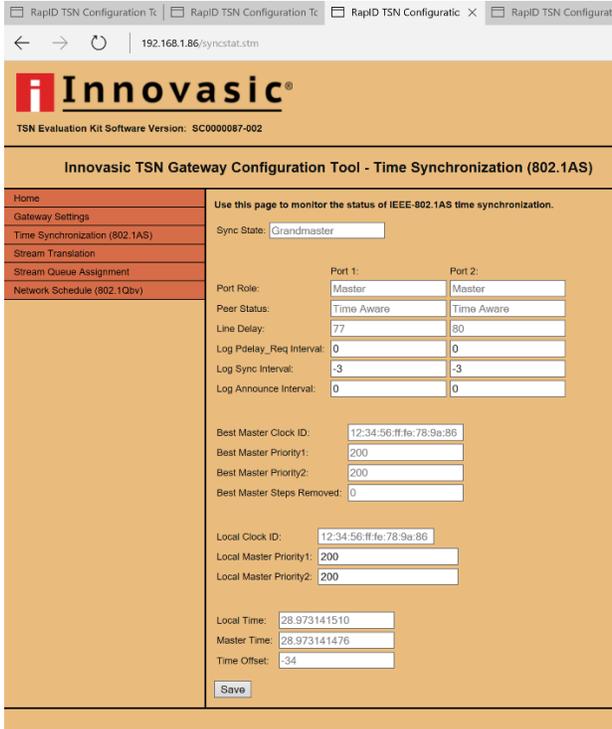


图 8. 将一个 TSN 套件指定为宗机

设置 TSN 流

TSN 流 ID 由本地分配的多播地址和 802.1Q VLAN 标记构成。本示例设置使用如下流,如表 1 所列。

表 1. 演示的 MAC、PCP 和 VLAN 设置

| 流 | TSN 多播 MAC | 优先级代码点(PCP) | VLAN ID (VID) |
|---------------------------------|-------------------|-------------|---------------|
| PROFINET S7-1511 至 ET200S | F1:D0:F1:D0:01:05 | 4 | 0x0000 |
| ET200S 至 S7-1511 | F1:D0:F1:D0:01:01 | 4 | 0x0000 |
| IO 链路 主机至演示 | F1:D0:F1:D0:00:05 | 2 | 0x0000 |
| 演示至主机 | F1:D0:F1:D0:00:01 | 2 | 0x0000 |

只要所有 TSN 节点都受控制,MAC、PCP 和 VLAN 值的设置就有很多自由度。对于本设置,PROFINET 周期性通信获得最高优先级。IO 链路和 PROFINET TSN 流由 MAC 地址的次低字节分开,但 VLAN ID 也可实现同样的目的。这种情况下,表 2 中的如下列表代表一个有效设置。流如图 9 所示。

表 2. 备选 MAC、PCP 和 VLAN 设置

| 流 | TSN 多播 MAC | 优先级代码点(PCP) | VLAN ID (VID) |
|---------------------------------|-------------------|-------------|---------------|
| PROFINET S7-1511 至 ET200S | F1:D0:F1:D0:00:05 | 4 | 0x0001 |
| ET200S 至 S7-1511 | F1:D0:F1:D0:00:01 | 4 | 0x0001 |
| IO 链路 主机至演示 | F1:D0:F1:D0:00:05 | 2 | 0x0002 |
| 演示至主机 | F1:D0:F1:D0:00:01 | 2 | 0x0002 |

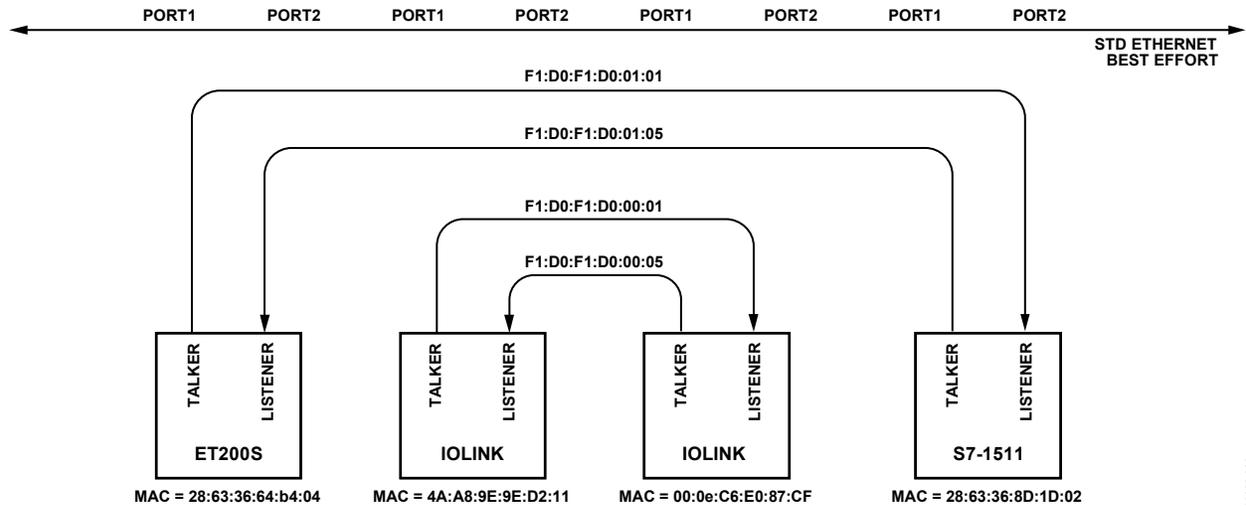


图9. 流

The screenshot shows a web interface for configuring stream translation parameters. It includes sections for Talker Methods, Talker Parameters, and Listener Parameters. The Talker Methods section has radio buttons for different methods, with 'Destination IP Address AND Protocol AND Destination Port' selected. The Talker Parameters section has a table for Streams with columns for On, Listener(s) Dest. IP Addr., IP Prot., Dest. Port., TSN Dest. MAC Addr (multicast), VLAN Priority, VLAN ID, and Egress Port. The Listener Parameters section has a table for Streams with columns for On, TSN Dest. MAC Addr (multicast), VLAN ID, Listener Dest. MAC Addr, and VLAN tag options.

图10. IO 链路设备流设置

IO 链路和 PROFINET 流量之间有一个重大区别。PROFINET 流量使用 VLAN 标记的目标 MAC 地址和优先级代码点(PCP)来识别需要转换(发话器方法)为 TSN 流的流量,但 IO 链路演示使用传输控制协议(TCP)连接。因此,它使用发话器侧的目标 IP 地址加协议加来源端口和 IO 链路 PC(侦听器侧)的目标 IP 地址加协议加目标端口。像多数 TCP 连接一样,服务器侧端口地址通常是稳定的,但客户端端口

号可能不同。这类似于 Web 服务器,其默认端口为 80(参见图 10)。

将 VLAN 标记的目标 MAC 地址和优先级代码点(PCP)用于 PROFINET,即允许将高优先级数据流量分配给 TSN 流。PROFINET 利用 VLAN PCP 6 给所有确定优先级的流量加上标记(参见图 11)。

Use this page to set up talker and listener stream translation parameters.

Talker Methods (choose one):

- Destination MAC Address
- Destination MAC Address AND Priority Code Point (PCP) of VLAN tag
- Destination IP Address AND DSCP
- Destination IP Address AND Protocol AND Source Port
- Destination IP Address AND Protocol AND Destination Port

Talker Parameters:

| Streams | On | Listener(s) Dest. IP Addr: | IP Prot: | Source Port: | TSN Dest. MAC Addr (multicast): | VLAN Priority: | VLAN ID: | Egress Port: |
|-----------|-------------------------------------|----------------------------|----------|--------------|---------------------------------|----------------|----------|---|
| Stream 1: | <input checked="" type="checkbox"/> | 192.168.10.10 | TCP | 7 | F1:D0:F1:D0:00:01 | 2 | 0x000 | <input checked="" type="radio"/> Port 1 <input type="radio"/> Port 2 <input type="radio"/> Both Ports |
| Stream 2: | <input type="checkbox"/> | 0.0.0.0 | UDP | 0 | F1:D0:F1:D0:00:02 | 0 | 0x000 | <input type="radio"/> Port 1 <input type="radio"/> Port 2 <input checked="" type="radio"/> Both Ports |
| Stream 3: | <input type="checkbox"/> | 0.0.0.0 | UDP | 0 | F1:D0:F1:D0:00:03 | 0 | 0x000 | <input type="radio"/> Port 1 <input type="radio"/> Port 2 <input checked="" type="radio"/> Both Ports |
| Stream 4: | <input type="checkbox"/> | 0.0.0.0 | UDP | 0 | F1:D0:F1:D0:00:04 | 0 | 0x000 | <input type="radio"/> Port 1 <input type="radio"/> Port 2 <input checked="" type="radio"/> Both Ports |

Listener Parameters:

| Streams | On | TSN Dest. MAC Addr (multicast): | VLAN ID: | Listener Dest. MAC Addr: | VLAN tag: |
|-----------|-------------------------------------|---------------------------------|----------|--------------------------|--|
| Stream 1: | <input checked="" type="checkbox"/> | F1:D0:F1:D0:00:05 | 0x000 | 4A:A8:9E:9E:D2:11 | <input type="radio"/> Do not change <input checked="" type="radio"/> Remove <input type="radio"/> Replace VLAN tag with: |
| Stream 2: | <input type="checkbox"/> | F1:D0:F1:D0:00:06 | 0x000 | 00:00:00:00:00:00 | <input type="radio"/> Do not change <input checked="" type="radio"/> Remove <input type="radio"/> Replace VLAN tag with: |
| Stream 3: | <input type="checkbox"/> | F1:D0:F1:D0:00:07 | 0x000 | 00:00:00:00:00:00 | <input type="radio"/> Do not change <input checked="" type="radio"/> Remove <input type="radio"/> Replace VLAN tag with: |
| Stream 4: | <input type="checkbox"/> | F1:D0:F1:D0:00:08 | 0x000 | 00:00:00:00:00:00 | <input type="radio"/> Do not change <input checked="" type="radio"/> Remove <input type="radio"/> Replace VLAN tag with: |

图 11. PROFINET 主机流设置

创建和设置 802.1Qbv 计划

硬件和通信设置完毕且 802.1AS 时钟同步之后，便可创建计划。但在此之前，建议先回顾一下以太网基本知识。

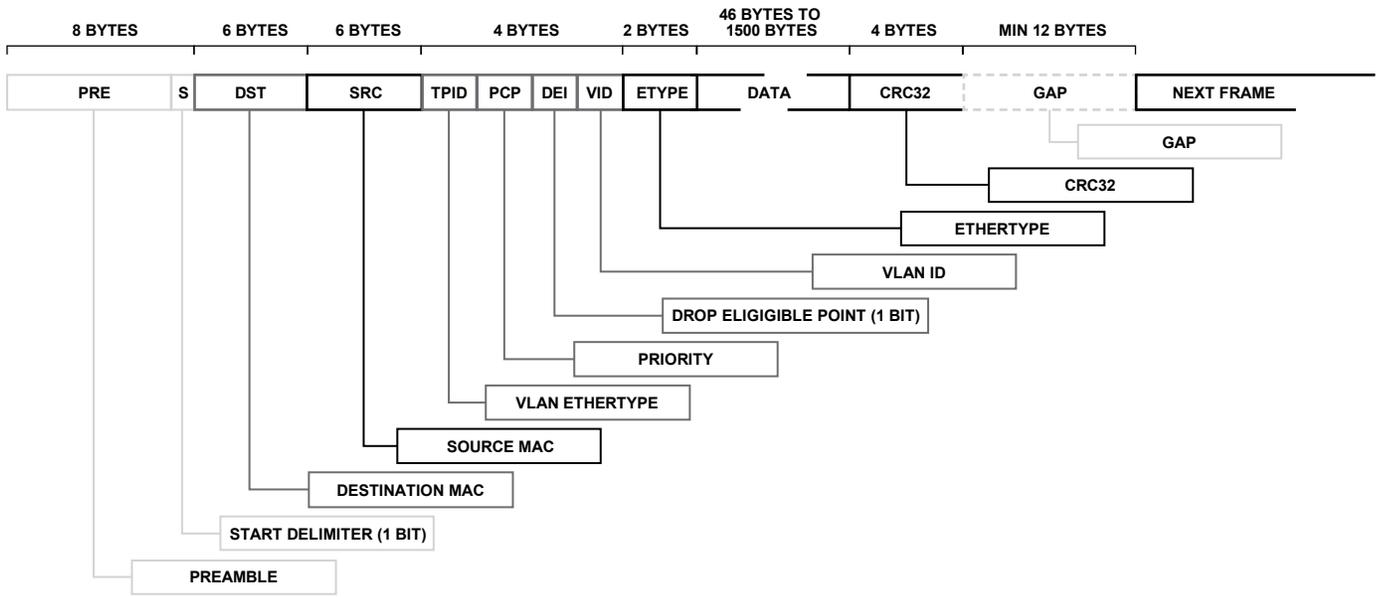
回顾：以太网帧和 TSN

从软件角度看，以太网帧由第 2 层报头信息（目标和来源地址、EtherType）、最多 1500 字节的数据（假设不使用超长帧）和 CRC32 组成。当计算机收到以太网帧时，帧中的以太网报头和数据字段复制到计算机主存储器中。

此外，线路上的以太网帧包含一个 63 位前同步码、一个 1 位起始定界符和最少 12 字节的线静默间隙（参见图 12）。以太网帧的最小长度是 64 字节（包括 CRC）。相对较长的前同步

码和静默时间以及最小长度，源于较早的以太网版本，但仍需要维持并予以保证。不过，有些 PHY 允许将前同步码缩短到 16 位，但这不是常见做法。

TSN 流在标准以太网帧上增加了 4 个字节，即 VLAN 标记。这种流始终包含一个 VLAN 标记。VLAN 标记由优先级(PCP)和 VLAN ID 组成。VLAN ID 同目标 MAC 一起构成 TSN 流标识。每个 TSN 流只能有一个发送器（发话器），但可以有一个或多个接收器（侦听器）。在任何帧长度计算中，都必须加上这四个字节（参见表 3）。帧在线路上占用的最短时间（100 Mbps 时）为 6.72 μ s，完整 1500 字节数据帧占用的时间为 123.36 μ s。



- STD ETHERNET FRAME ELEMENTS
- TSN STREAM ELEMENTS
- THESE ELEMENTS AFFECT TIMING BUT HAVE NO PROGRAMMER ACCESS

16330-012

图12. 以太网帧

表3. 以太网帧时序

| 速率 (Mbps) | 速率 (MBps) | 字节时间 (μs) | 第2层 (字节) | 前同步码 (字节) | 间隙 (字节) | SDU 最小值 (字节) | 时隙 最小值 (字节) | 时隙时间 最小值(μs) | 时隙时间 最大值(μs) |
|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|---------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 10 | 1.25 | 0.8 | 22 | 8 | 12 | 42 | 84 | 67.2 | 1233.6 |
| 100 | 12.5 | 0.08 | 22 | 8 | 12 | 42 | 84 | 6.72 | 123.36 |
| 1000 | 125 | 0.008 | 22 | 8 | 12 | 42 | 84 | 0.672 | 12.336 |

以太网基础架构的时序

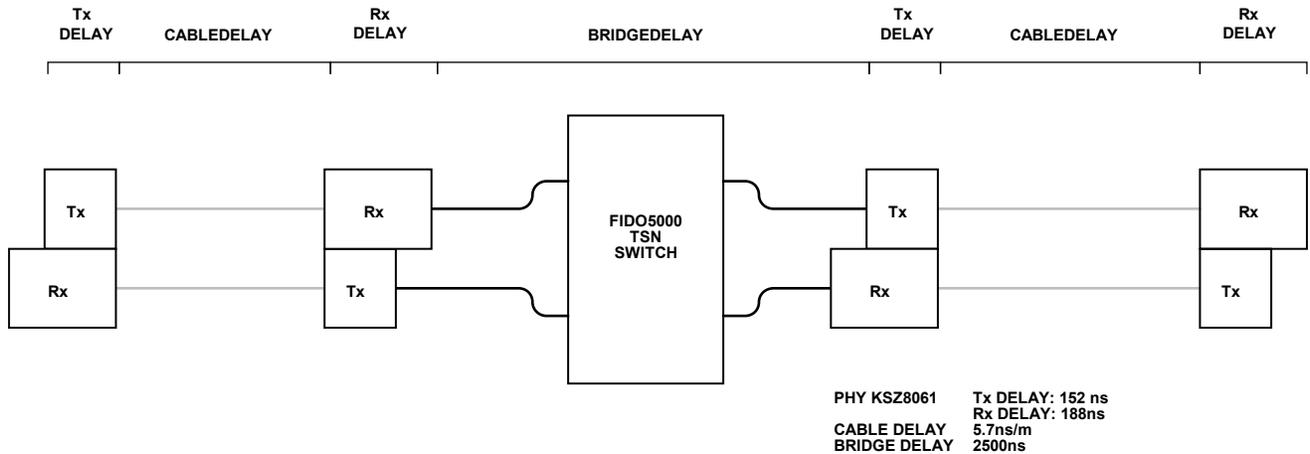


图 13. TSN 双端口交换机时序模式

以太网传输通道的时序模型

虽然以太网相当快,但传输通道的延迟需要考虑。对于 100 Mbps 全双工以太网环境,考虑下列参数:

- PHY延迟: 在接收和发送期间,由于数据的内部处理,以太网PHY会引入延迟。接收(RX)延迟通常大于发送(TX)延迟。另外, RX时序可能引起几纳秒左右的抖动。这些延迟在几百纳秒左右,与PHY元件有关。一个字节占用80 ns, 故PHY延迟为1到4个字节延迟。
- 桥延迟: 以太网交换机会引入桥延迟(消息穿过交换机的延迟时间)。对于直通式双端口交换机,桥延迟很小。作出转发决定之前,交换机必须收到8字节前同步码、12字

节源/目标MAC地址和4字节VLAN标记。这些要求合计起来就是最小1.92 μ s的桥延迟(注意还有其他因素可能会使桥延迟略有增加)。

- 电缆延迟: 典型 CAT5 电缆的延迟为每米 5.7 ns, 或大约半个发送位。对于桌面设置或使用短电缆的机柜,电缆延迟要比 PHY 延迟低大约一个数量级。但是,对于全长 100 m 以太网电缆,电缆延迟会再增加 570 ns (约相当于 7 个字节)。

对于一个物理范围较广(电缆较长)和/或有许多节点的系统,要为其计算一个复杂计划,必须考虑所有这些延迟。对于该桌面演示,应在计划中增加 10,000 ns 的裕量以使结果可靠。

802.1Qbv 调度器操作

IEEE 为 Qbv 定义了多达 8 个队列，也称为时间感知整形器 (TAS)。IEEE 还定义了一组字节，一个字节对应周期内的一个确定偏移。这些字节中的各位使能或禁用相应的队列。利用一个周期中的每个时间片，一个字节定义哪些队列使能，哪些队列禁用。在使能的队列中，优先级较高的队列得到处理。必须知道，周期中的时间片可以有任意起始偏移，这些偏移的单位为纳秒(ns)。周期时间的单位也是纳秒(ns)。

空闲时，以太网发送器从所有使能队列中优先级最高的队列获取一个以太网帧。当发送器忙于发送该帧时，它便不会获取其他帧（意味着没有另一发送队列）。

TSN 套件目前实现的 TAS 以 4 个队列为限，一个周期中最多有 16 个偏移（也称为闸门开启事件）。

图 14 所示为 TAS 调度器框图。此图中，所有队列都有一些以太网帧在排队，并定义了四个偏移：0 ns、500 ns、1000 ns 和 2000 ns。本例中，周期时间为 2500 ns。图 14 显示了 2000 ns 有效偏移，导致队列 2 和队列 3 被阻止，队列 0 和队列 1 使能。队列 1 的优先级高于队列 0，故发送器从队列 1 获取下一帧，直至队列 1 清空或当前时间片用完。如果当前时间片用完，偏移 0 的下一时间片会使能队列 0，但由于队列 3 有消息在排队且优先级更高，所以要发送的下一帧选自队列 3。

当所有队列同时使能时，TAS 像经典服务质量(QoS)优先级队列一样工作，先服务优先级最高的队列。

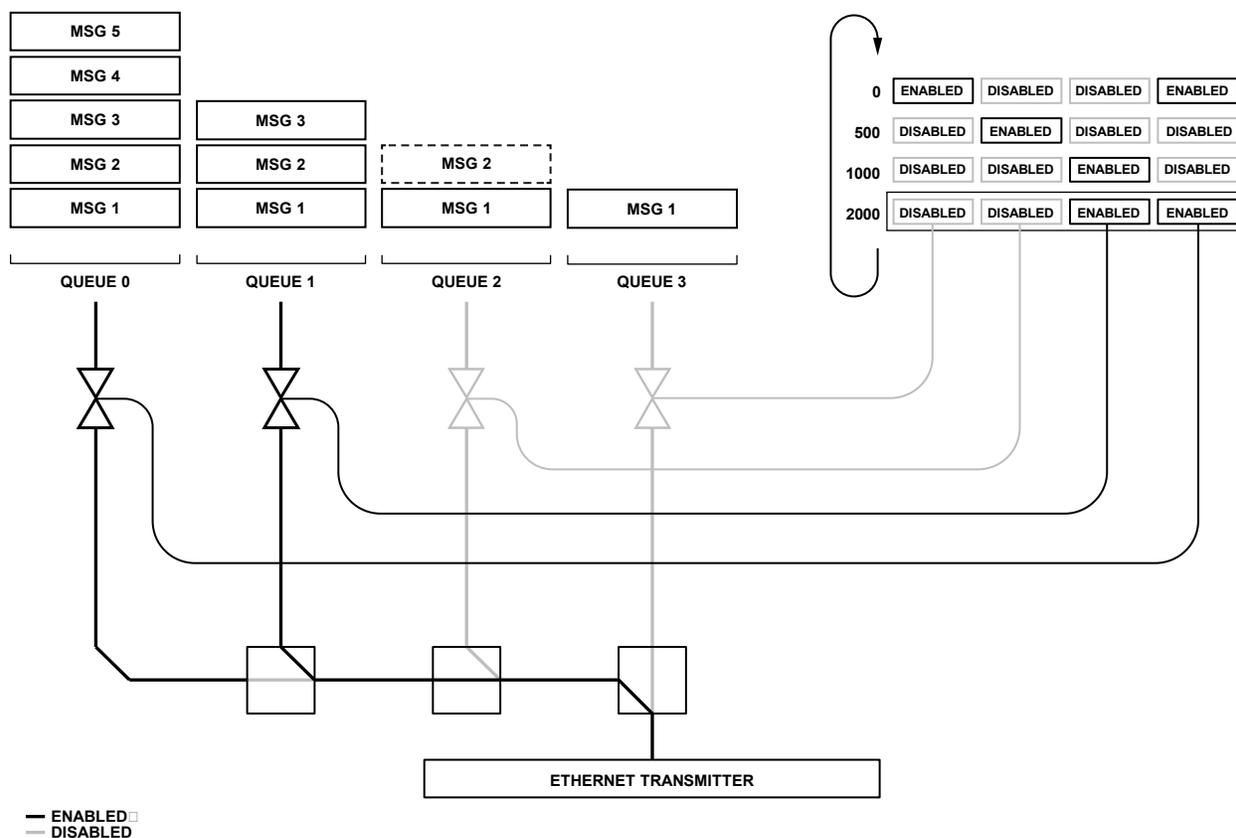


图 14. 802.1Qbv 调度器

16330-014

防护带

使用调度器来防护带宽时，必须确保当较高优先级闸门开启时发送器空闲。如果发送器未空闲，可能会发生较低优先级的长帧阻止或至少延迟较高优先级流量的情况。为保证发送器空闲，能够立即开始发送较高优先级流量，应插入一个防护带。当防护带有效时，它会禁止发送器获取下一帧。

为了达到目的，防护带必须足够长，使得特定队列中可能排队的最长消息圆满完成，然后才会发生下一次闸门开启事件。可能排队的最长消息的大小在“最大服务数据单元(maxSDU)”参数中定义，单位为字节。

不需要禁用所有队列以手动创建防护带，TSN 套件会自动处理防护带相关事务。

图 15 显示了一个简单例子。在 t_0 时，调度器首次使能。在该时间之前，即 t_0 左边，所有闸门打开。在发送闸门使能时间内，发送器可以从队列 0 (本例中为 Q0，一次开启一个闸门) 获取帧。防护带时间 (参见图 15) 为队列 3 开启事件之前的防护带，其宽度足以使一个完整的 1522 SDU 帧得到安全发送，然后发生 Q3 闸门开启事件。

当 Q3 开启时，两个期间均要短得多，因为 Q3 仅用来传输较短的帧。其 maxSDU 可能只有 200 字节。

队列 0 的 maxSDU 为固定值 1522，允许配置 Web 服务器的 Web 流量通过队列 0 而不会掉包。

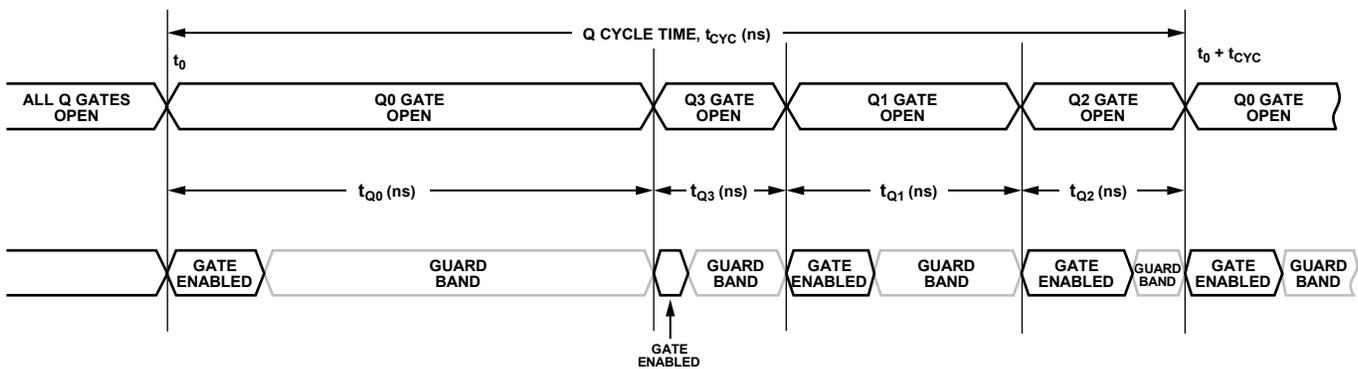


图 15. 计划时序、启动、防护带

16330-015

以太网帧大小、帧速率和不同步

各队列都必须定义帧大小，因此需要知道指定队列使用的协议。对于周期性通信，很容易计算流量的长度和速率。但对于使用可变数据包大小的协议（例如任何通过 TCP 传输的流量），要求使用最差情况值。举例来说，ModbusTCP 可用于周期性通信，但对于 TCP，除数据包外，还要使用非常短的握手包。此外，Modbus 知道若干访问设备的命令，其中一些命令比另外一些命令要长。为将 ModbusTCP 放入计划中，需要估计最差情况下的 maxSDU 字节数。

对于 PROFINET RT，可以专门针对周期性数据定义一个流，流中只需很少的额外帧，甚至不需要。因此，对 maxSDU 的估计会更精确。但 TSN 套件与 PROFINET RT 不同步（PROFINET RT 协议无此能力），PROFINET 周期性通信依靠自己的时钟运行。为保证各帧在 PROFINET 周期时间内发送，TAS 周期时间必须小于（快于）PROFINET；最佳实践是快 2 倍。

创建一个有效紧凑的调度并非易事，原因如下：

- 帧大小可能不同。调度必须考虑的是最差情况，而非最频繁的情况。
- 由于要发送额外的帧（握手、罕见命令等），帧速率可能不同。
- 应用周期与TAS周期不同步（需要过采样）。
- 周期时间不同的流需要在一条线路上共存。解决此类问题的一种办法是使用较慢的TSN计划，并在TSN周期内为较快的流量多次开启闸门。示例参见图16。

让应用与 TAS 调度器同步是可能的。TAS 同步脉冲（当一个周期启动或完成时）由 TSN 套件上的 CPU 模块的引脚 A10 提供。应用可以使用此信号来与 TAS 周期同步，从而不需要过采样。

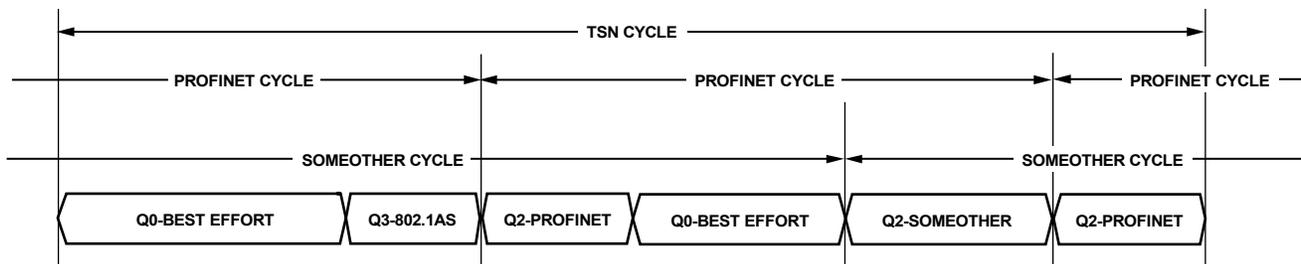


图 16. 一个支持不同周期时间的计划；PROFINET 的计划次数是其他流量的两倍

最后必须考虑 TSN 套件框图（参见图 17）。每个以太网端口对应一个 TAS 调度器。如有一帧通过某个以太网端口接收到，TSN 套件会检查有无已知 TSN 流 ID。若识别出 TSN 流，就会应用反向流转换，并将该帧送出到主机端口。若未识别，或者它是无匹配 IP 地址的“尽力而为”流量，则该帧将被放入“其他端口”TAS 队列以供传输。

PROFINET IRT 甚至在 TSN 可用之前便使用计划流量，这种简化的转发称为“相对转发器”。只有未被转发的流量会被识别，已转发帧的传输时间是相对于接收时间（加桥延迟）而言。这与 PROFINET 术语中的绝对转发器形成对比。

绝对转发器首先查找目标端口，然后在一个绝对时间（计划内）送出帧。此绝对时间必须考虑桥延迟和查找时间。因此，绝对转发器比相对转发器稍慢且更加复杂。绝对转发器的一个应用是多端口交换机，其中对出口端口的查找无论如何都会发生。

如有一帧通过主机端口接收到，就会根据已定义的流转换筛选器对其进行检查。如其未被转换，该流量将在 TAS 的“尽力而为”队列中排队。适当的端口是通过交换机的动态转发数据库来选择，但若发生流转换，则可以规定该帧通过哪个端口离开。因此，流转换配置页面允许选择端口 1、端口 2 或同时选择这两个端口作为期望的出口端口。

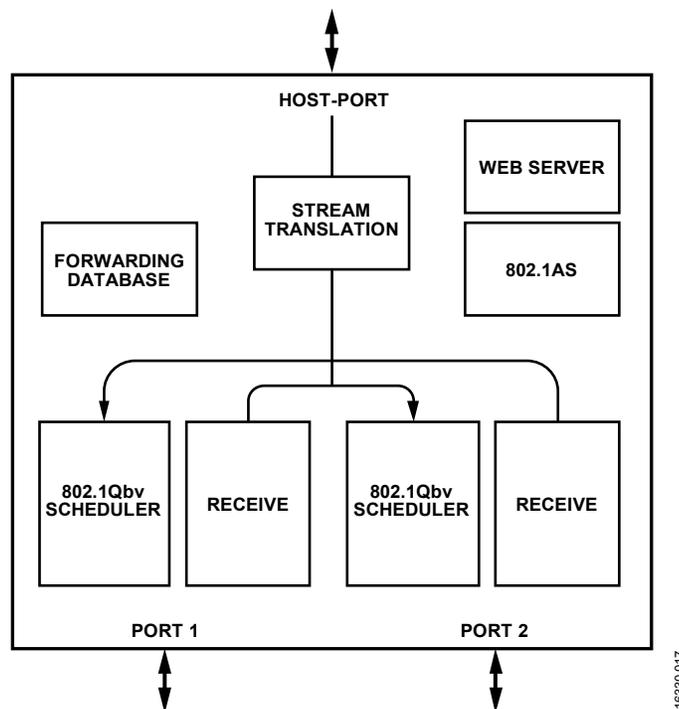


图 17. TSN 套件框图

本演示所用计划

本演示选择 2 ms 的 TAS 周期时间，并将 50% 以上的带宽分配给“尽力而为”流量(1 ms)。流量时序如表 5 所示。

在此演示的 TSN 段的最左端和最右端，仅安排指向 TSN 段的流量。由此得到的计划对各端口是一样的（参见表 4）。

表 4. 端口计划结果

| 端口 1 | 已计划 |
|----------------|----------|
| 0 | Q0, 尽力而为 |
| 1,000,000 ns | Q3 |
| 1,011,400 ns | Q2 |
| 1,029,400 ns | Q1 |
| 1,117,760 ns | Q0, 尽力而为 |
| = 1,882,240 ns | Q0 合计 |

表 5. 流量和时序

| 流 | 队列 | 协议 | maxSDU | 速率 | 时隙时间 | 裕量 |
|--------------------|----|-------------|------------------|------------------|--------------|------------------|
| 尽力而为 | 0 | http, 视频流 | 1522 | N/A ¹ | 1,882,240 ns | N/A ¹ |
| F1:D0: F1:D0:00:01 | 1 | TCP, IO 链路 | 1000 | <<<TAS | 81,600 ns | 6670 ns |
| F1:D0: F1:D0:00:05 | 1 | TCP, IO 链路 | 1000 | <<<TAS | 81,600 ns | 6670 ns |
| F1:D0: F1:D0:01:01 | 2 | PROFINET IO | 80 | 4 ms | 8000 ns | 10,000 ns |
| F1:D0: F1:D0:01:05 | 2 | PROFINET IO | 80 | 4 ms | 8000 ns | 10,000 ns |
| 802.1AS | 3 | PTP | 110 ² | 2 ms | 10,400 ns | 1000 ns |

¹ N/A 表示不适用。

² 本例中，110 为 PTP 帧的长度。但在较大网络中，follow_up 消息中的 TLV 可能会大幅增长。这种情况下，必须应用实际大小或最差情况下的大小。

结语

当 TSN 配置协议 802.1Qcc 变得普及时，没有人必须手动计算一个计划或担心如何利用 Web 服务器配置电路板。但是，了解调度网络的含义和优势是掌握此技术的第一步。调试和了解调度网络的性能需要这种水平的认知。收获的知识对在现场全面实施 TSN 会很有价值。

ADI 公司的 TSN 评估套件为客户积累 TSN 实际使用经验提供了一种方便且成本低廉的途径。

参考文献

TSN 评估套件快速入门指南, ADI 公司

IEEE TSN 标准: 802.1AS, 802.1Q, 802.1Qbv