

Application Note

利用 TSN 以太网特性改善工业以太网控制器的时序



Pekka Varis, Thomas Schneider, Nilabh Anand and Daolin Qiu

摘要

工厂、楼宇、电网基础设施和交通运输的控制系统目前使用 PROFINET®、CC-Link®、EtherCAT® 等工业以太网协议来管理和控制生产线、机器人和自动化。实时以太网的短周期时间使通过中央控制单元运行控制算法成为可能。IEEE 以太网标准化在时间敏感型网络 (TSN) 的框架下引入了多种标准功能，用于实现这些应用所需的实时性。

在实践中，现有版本的工业以太网协议已经足够并且仍在使用。EtherCAT 等工业以太网协议通常在控制器中使用标准 IEEE 802.1Q 以太网，在设备中使用修改后的解决方案。为了提高帧在线路上的时序精确性，设备中使用了一些非 IEEE 标准解决方案，例如“时间触发发送”(TTS)。

本应用手册重点介绍了在控制器上使用调度流量增强 (EST) 的标准 TSN 特性，并与标准以太网协议进行了比较。EST 也称为时间感知型整形器或 Qbv，是现代嵌入式处理器中提供的基本 TSN 特性之一。本应用手册对基于 TSN 的标准解决方案和特定于供应商的 TTS 二者可实现的时序精确性进行了比较。

内容

1 引言.....	2
2 工业以太网协议软件栈.....	3
2.1 概述.....	3
2.2 EtherCAT.....	4
3 评估平台和方法.....	5
3.1 硬件.....	5
3.2 软件平台.....	5
3.3 测试应用.....	5
3.4 测试拓扑.....	5
4 结果.....	6
4.1 时间同步.....	6
4.2 传输时序.....	7
5 总结.....	10
6 参考文献.....	11

商标

EtherNet/IP™ is a trademark of ODVA, Inc.

Sitara™ is a trademark of Texas Instruments.

PROFINET® is a registered trademark of Siemens.

CC-Link® is a registered trademark of Mitsubishi Electric Corporation.

EtherCAT® is a registered trademark of Beckhoff Automation GmbH.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

CODESYS® is a registered trademark of CODESYS Group.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

工业控制需要具有确定性延迟的实时通信。所使用的技术已从串行现场总线发展到 EtherCAT、EtherNet/IP™ 和 PROFINET 等 IEC 标准中定义的工业以太网协议。这些标准使用 IEEE 以太网的部分器件来利用以太网提供的一些规模经济，但它们带来了一些小的变化（例如直通交换），这些变化超越并部分限制了典型 IEEE 桥接器和终点的使用。与典型的消费类或企业系统（其中平均响应能力或吞吐量是关键性能指标）不同，工业控制应用的性能受网络中与输入和输出交互的最坏情况延时的限制。

IEEE 802.1Q-2018 向用于要求工业以太网网络的标准 IEEE 以太网中引入了许多时间敏感型网络 (TSN) 特性。利用 OPC UA FX [1] 和 TSN 配置文件 IEC/IEEE 60802 [2] 等技术，预计使用 TSN 特性设计的局域网将允许使用标准的 IEEE 以太网硬件来实现工业控制网络。尽管该技术早在几年前就已推出 [4]，但它仍然是一项正在进行的工作。就像在这项技术的早期版本中，目标是控制器到控制器的通信，因此与现有技术共存。另外值得注意的是，现有的工业以太网技术仍在不断发展，是现代工厂自动化的支柱。

无论如何转变，典型的工业拓扑都保持不变，如图 1-1 所示。通常，以太网（包括 TSN）指定局域网 (LAN) 的第 1 层和第 2 层。这样，可变大小帧就可以从一个终点无状态且不可靠地传输到另一个终点，以及在两个终点之间切换。此域在图 1-1 中以浅灰色阴影显示。顶部的协议（例如 EtherCAT）是高度非对称的；有一个控制器管理少量甚至数百个器件。每种协议对这种非对称关系使用的术语略微不同，并且这种不对称的程度也各不相同。与其他工程规范类似，该术语也在转变，因为有些人认为它具有冒犯性 [3]。本文档中使用的术语“控制器”表示管理实体，“器件”表示通常受控制的实体。特别是对于 EtherCAT，将使用术语“主站”和“从站”。

本应用手册对 EST 的标准 TSN 特性与现有工业以太网技术进行了比较，以展示对控制器性能的优化。

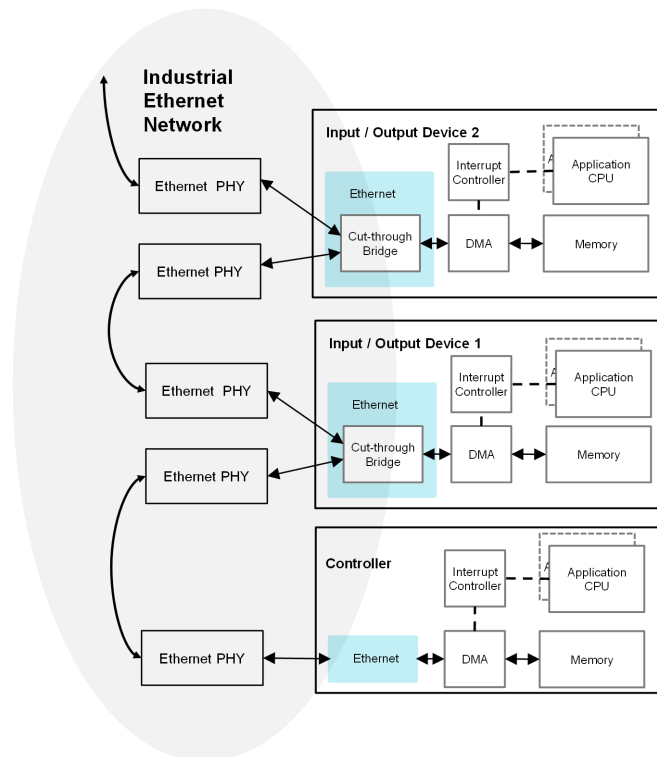


图 1-1. 典型的工业以太网

2 工业以太网协议软件栈

2.1 概述

在支持 TSN 的以太网之上使用类似 PROFINET 或 OPC UA 的应用级协议，无论是否采用 IP 和 UDP 等传输和会话级协议。图 2-1 所示为 OPC UA 和网络层示例。EtherCAT 始终直接通过以太网，在图 2-1 中显示为 OPC UA Pub Sub 的蓝色箭头线，仅由控制器（主站）发起帧发送。局域网 (LAN) 只有为 EtherCAT 保留的 EtherType 帧，由线路拓扑中的主站或最后一个从站发送。

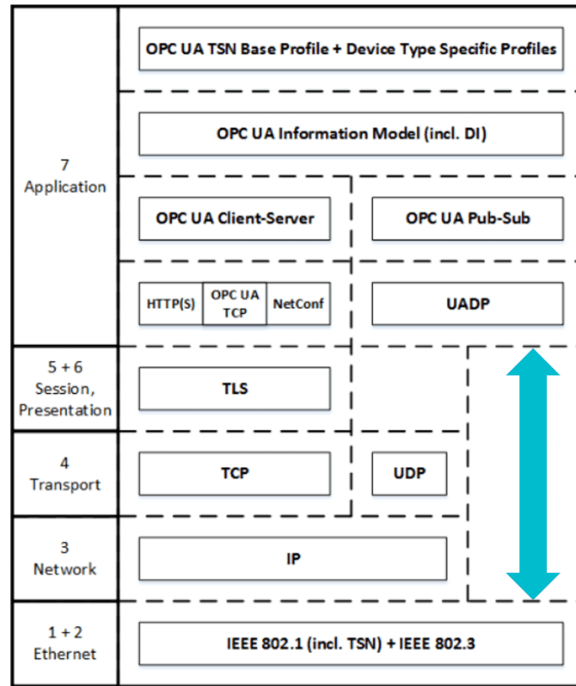


图 2-1. 基于 TSN 的 OPC UA，蓝线表示 OPC UA Pub-Sub

数十年来，网络软件栈已成功利用图 2-2 中所示的分层模型。虽然非常适合添加功能和实现可扩展性，但实时控制的缺点是最坏情况下的延时。这种情况下，工业协会会优先考虑及时性或可控延时，而非其他一切，这实际上会绕过网络栈，有时甚至绕过以太网驱动程序。

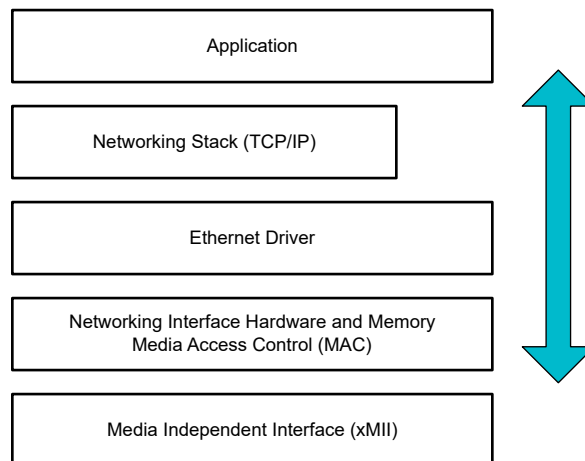


图 2-2. 网络软件栈

分布式实时控制应用通常采用周期概念。控制应用会读取输入，计算下一个所需状态，然后将这些输出发送出去。在工业以太网中，输入和输出分布在网络上。如图 2-3 中所示的时序图直观呈现了这种情形。标记为“应用任务”的灰色部分是应用在每个周期中消耗的时间。由于输入和输出通信是在周期内消耗应用任务处理时间的过程，因此需要将输入和输出通信开销列入预算。该预算基于计算抖动和通信抖动的最坏情况。

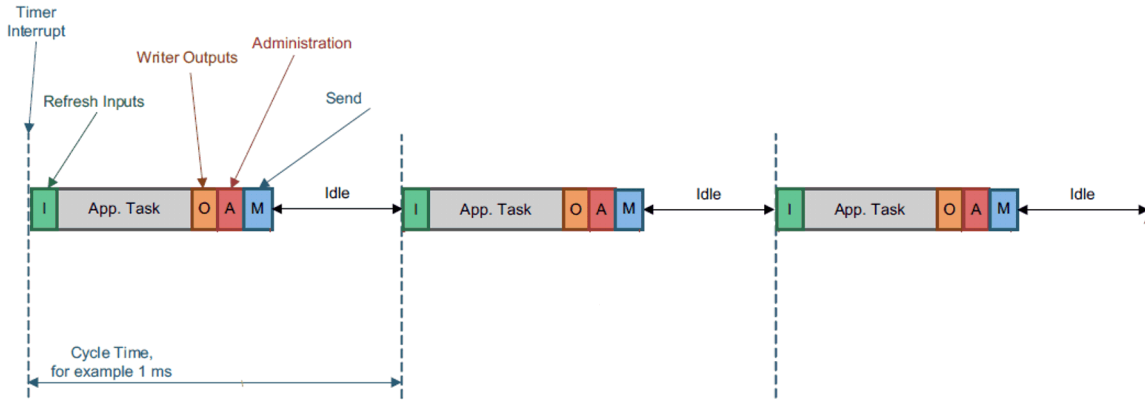


图 2-3. 循环控制的时间视图 [5]

除了输入和输出通信外，工业通信协议还为分布式设备提供同步或通用时间概念。无论周期时间或计算需求如何，同步精度通常与应用直接相关。例如，分布式系统中微秒级甚至低于 100 纳秒级的同步抖动对于网络物理系统而言通常至关重要。然而，在输入和输出通信中，系统可以承受微秒级甚至几十微秒级抖动。这种抖动的代价是每个周期中的应用计算时间减少。

2.2 EtherCAT

EtherCAT 是一种基于 IEEE 802.3 以太网的现场总线系统，由国际电工委员会 (IEC 61158) 进行了标准化。该技术由 EtherCAT 技术协会（一个由用户和供应商组成的国际社区）提供支持。该协议在运动和电机控制中尤为常用。EtherCAT 的主要优势是其支持要求数据更新时间短和通信抖动低的自动化应用。在 EtherCAT 协议中，EtherCAT 主站（之前英文为 Master）发送的帧经过每个从站节点（之前英文为 Slave）。每个 EtherCAT 从站设备在检测到寻址数据后便立即读取。然后，从站设备将数据插入帧中，然后将帧动态发送至下一个设备。段（或分支）中的最后一个从站节点检测到开放端口，便将报文发送回主站。EtherCAT 主站是段中唯一主动发送新 EtherCAT 帧的节点。该功能允许网络实现 90% 以上的可用网络带宽，同时防止不可预测的延迟，从而保证实时系统响应。EtherCAT 是使用 EtherType 标识符 (0x88A4) 传输的。

仅 EtherCAT 主站和最后一个从站在 LAN 上发送帧。主站的典型优化是使栈直接访问以太网 MAC 控制器，不仅绕过网络栈（就像基于原始以太网的 OPC UA Pub-Sub 一样），还绕过以太网驱动程序来直接或本地拥有整个以太网外设。Acontis [6] 和 IBV [7] 是提供此优化的栈提供商。图 2-4 展示了一个架构示例。

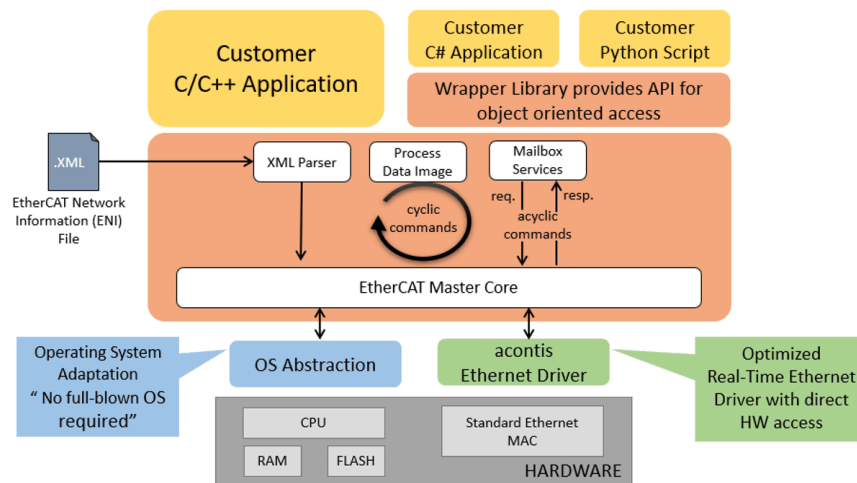


图 2-4. EtherCAT 主站软件架构 [6]

EtherCAT 是一种广泛部署的协议，许多平台上都有详细的基准测试 [8] [9] [10]。作为可实现目标的参考，达到的时钟同步通常声称低于 100ns，实际上为 $\pm 20\text{ns}$ 。测量时钟同步的方法通常是使用示波器查看每个从站节点上所需的 SYNC 输出并比较每次测量的偏移和抖动。SYNC 输出在逻辑上类似于从 TSN 时间同步 (IEEE 802.1AS) 中生成每秒 1 脉冲 (pps) 类型的引脚切换。图 2-5 展示了一个测量示例。

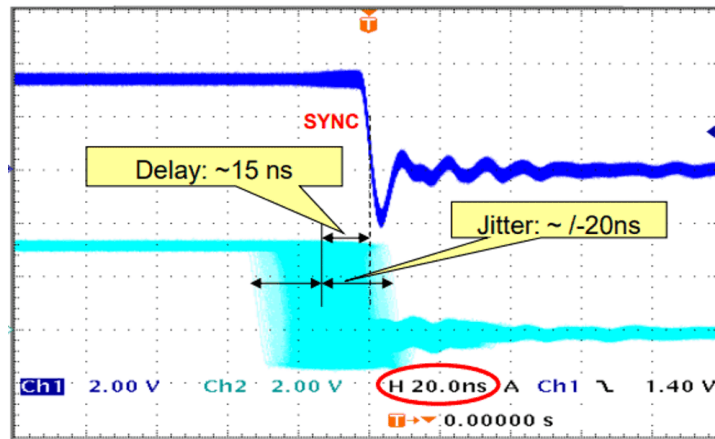


图 2-5. EtherCAT 时间同步测量示例 [10]

对于第二个关键时序指标，也就是将以太网帧精确地放置在线路上的能力，嵌入式处理器中的一些以太网 MAC（如德州仪器 (TI) Sitara™）和诸如 Intel i210 的网络接口卡 (NIC) 添加了一个非 IEEE 功能，称为“时间触发发送” (TTS)。此功能允许在某个时间点（通常就在通信周期的开始）将以太网帧精确地放置在线路上。在 100Mbit/s（当今部署的典型 EtherCAT）下，精确度达到 $\pm 40\text{ns}$ [5]。

3 评估平台和方法

3.1 硬件

此演示使用了德州仪器 (TI) Sitara™ 系列的两类嵌入式 Arm® 处理器。具有高达 1.4GHz Arm Cortex®-A53 和 800MHz Cortex-R5 内核以及集成嵌入式 TSN 开关的 AM6412 和 AM625 处理器可用作功耗低于 2W 的低端控制器。对于高端控制器，采用了具有双核 2GHz Arm Cortex-A72 的 AM682 处理器。

3.2 软件平台

Cortex A53 和 A72 内核运行带有 PREEMPT_RT 补丁的 Linux 5.10，通常称为 RT Linux。TSN 配置是通过 iproute2 软件包完成的，该软件包中包含了用于配置网络的标准接口，包括 TSN 特性。软件包中包含 tc 命令，该命令代表“流量类别队列规则” (tc qdisc)。由于使用的功能基于标准软件接口，因此应使用 iproute2 软件包命令，直接在支持 TSN 调度流量增强 (EST) 功能的任何目标上复制。

IBV [7] 和 Acontis [6] 针对这些目标提供了经过优化的 EtherCAT 主站软件栈。

3.3 测试应用

Linux 拥有一套广泛的网络测试应用，例如 netperf 和 iperf3。此外，plget [11] 是一款利用精确时间协议 (PTP) 的工具，该协议根据 IEEE 1588 进行了标准化，是所有支持 TSN 的硬件中的一项硬件功能，用于捕获以太网帧到达的时间戳和 MII 接口的传输时间。

3.4 测试拓扑

在测量时间同步精度的测试中，AM6442 入门套件连接到作为主领导者的 Keysight NovusONE。

对于测量基准传输时序的测试设置，一个由三个 Sitara AM2431 MCU 器件组成的小型网络作为 EtherCAT 从站，一个运行 CODESYS® (EtherCAT 主站软件栈) 的 Sitara MPU 器件作为控制器。测试了两个 Sitara MPU 器件，AM6412 作为低端控制器，AM682 作为高端控制器。

为了与应用了 EST TSN 特性的非 EtherCAT 设置进行比较，使用 AM625 入门套件代替主站，并使用 AM6412 代替从站来模拟主站向从站发送数据的 EtherCAT 网络，无需实际设置真正的 EtherCAT 网络。

4 结果

结果被分成两类：时间同步精度和传输时序。

4.1 时间同步

作为基准，测量连接 Keysight NovusONE (作为分布时钟的主时钟) 的 AM6442 入门套件的 SYNC 信号，以匹配图 2-5 中所示的参考。

在 TSN 中，可使用 IEEE 802.1AS 实现时间同步，IEEE 802.1AS 通常称为通用精确时间协议 (gPTP)。图 4-1 显示了 AM6442 入门套件的同步精度。在 1Gbit/s 下测得的抖动为 -9 至 +12 纳秒，优于在以 100Mbit/s 运行的网络上测得的抖动。

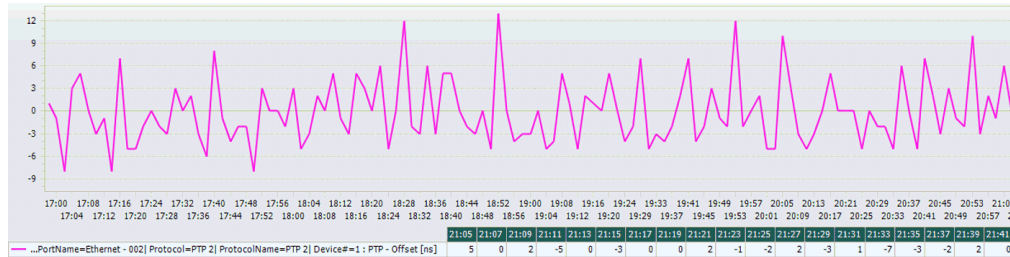


图 4-1. 使用 1Gbit/s 以太网在 Keysight NovusONE (作为主时钟) 上测量 AM6442 入门套件的 IEEE 802.1AS 精度

4.2 传输时序

在 RT Linux 上运行且采用 Codesys EtherCAT 主站但未进行任何调优或优化的 Sitara AM6412 的时序如图 4-2 所示。测量基于 TX_EN RGMII 信号，该信号从帧开始到结束都为高电平。该信号在传输帧的持续时间内保持高电平。例如，对于以 100Mbit/s EtherCAT 速度传输的 200 字节帧，TX_EN RGMII 信号处于高电平的持续时间为 16 μ s。在 TX_EN 测量中需要考虑抖动测量值。使用的周期时间为 1.5ms，放置在线路上的帧开始的抖动约为 $\pm 120 \mu$ s。在具有 2GHz Cortex A72 的 AM682 上，图 4-3 中的相同测试显示了该抖动的大约一半。

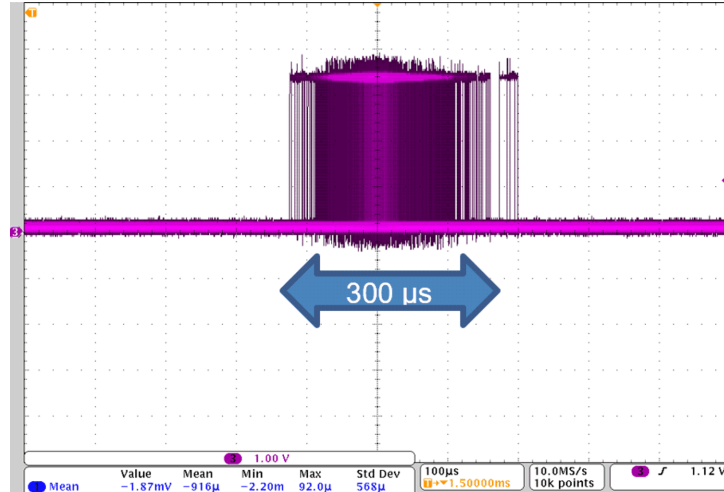


图 4-2. Sitara AM6412 的基准 CODESYS EtherCAT 帧 TX_EN 时序 - 1.5ms 周期时间，示波器处于持续模式

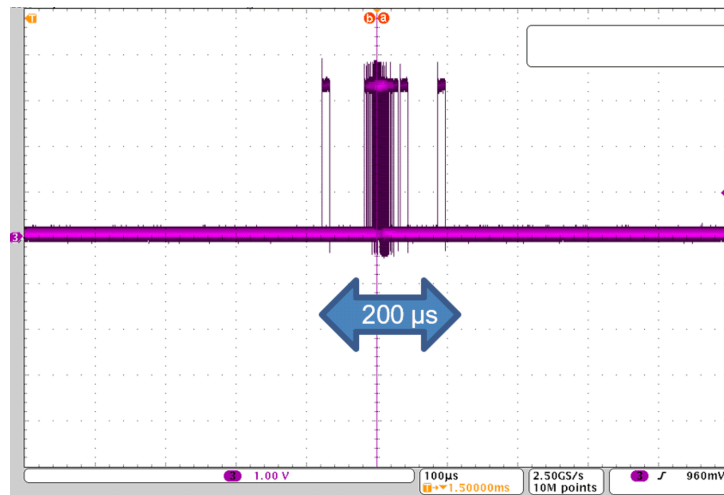


图 4-3. Sitara AM682 上的基准 Codesys EtherCAT 帧 TX_EN 时序 - 1.5ms 周期时间，示波器处于持续模式

图 4-4 显示了 AM6412 同一用例的以太网线流量的 Wireshark 捕获。

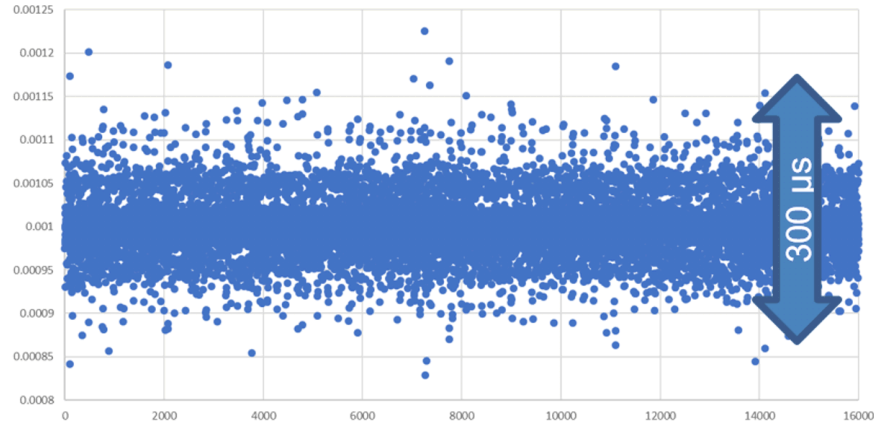


图 4-4. Sitara AM6412 Wireshark 上的基准 Codesys 捕获 EtherCAT 帧 - 1ms 周期时间

这些抖动结果与典型的 RT Linux 系统中中断延迟一致 [12]。可以使用 [13] [14] 中所示的步骤将其降低到几十微秒的低值。这仍然比 TTS 方法可实现的数量级至少高两个甚至三个。不使用支持 EtherCAT 的 TTS，而是使用 EST 的 TSN 特性创建了一个调度，其中所有发送门都是关闭的，但每隔 100 μ s，门都会打开一次以便将一个帧发送出去，如图 4-5 中的命令行片段所示。

```
tc qdisc replace dev eth0 parent root
\ handle 100 taprio num_tc 8
\ map 0 1 2 3 4 5 6 7 0 0 0 0 0 0 0
\ queues 1@0 1@1 1@2 1@3 1@4 1@5 1@6 1@7
\ base-time 100000000
\ sched-entry S ff 2848
\ sched-entry S 00 97152
\ flags 2
```

图 4-5. 用于实现“时间触发发送”的 EST 调度命令

图 4-5 中的命令最初可能看起来很复杂，但 [15] 中介绍了细节。带有“sched-entry”的两行对于实现 TTS 非常重要。这些行指定在 2848 纳秒内，所有 8 个队列 (ff, 8 个队列的位图) 均打开，而在 97152 纳秒内，所有门均关闭 (00)。根据该调度，假设应用程序已完成其处理并已准备好发送该帧，则每次发送一个帧。为了模拟 EtherCAT 主站向从站发送数据，使用 AM625 入门套件作为端点 (代替主站)，并将 Sitara AM6412 配置为网桥 (代替从站)。Pliget 数据包生成器用于生成表示 EtherCAT 主站流量。接收以太网端口的 Pliget 硬件时间戳由从站使用。按照图 4-5 中的 EST 调度运行 10k 个数据包时，数据包间隙在 -2ns 到 +10ns 之间，如图 4-6 所示。

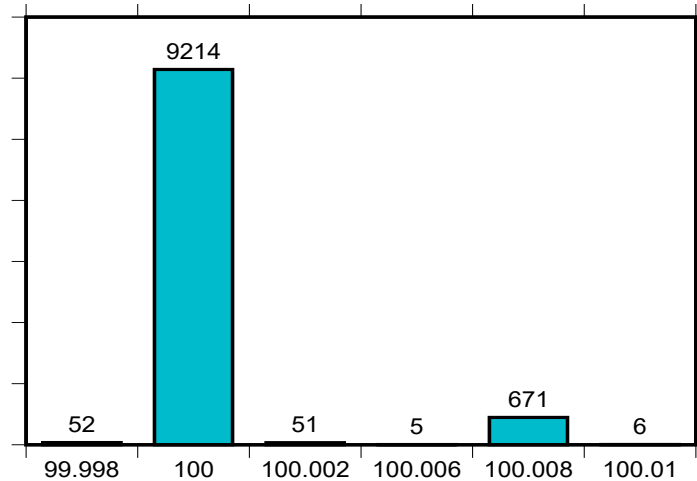


图 4-6. 采用 100 μ s EST 整形器时，1Gbit/s 下 10k 帧数据包间隙 (以微秒为单位)

图 4-7 显示了使用 EST 调度时 Codesys EtherCAT 主站设置的 TX_EN RGMII 测量。该图与图 4-2 中没有 EST 调度时的基准 TX_EN RGMII 测量结果相当。由于以 100Mbit/s 的速度发送一个帧的线路长度而产生的持续时间约为 110 μ s。

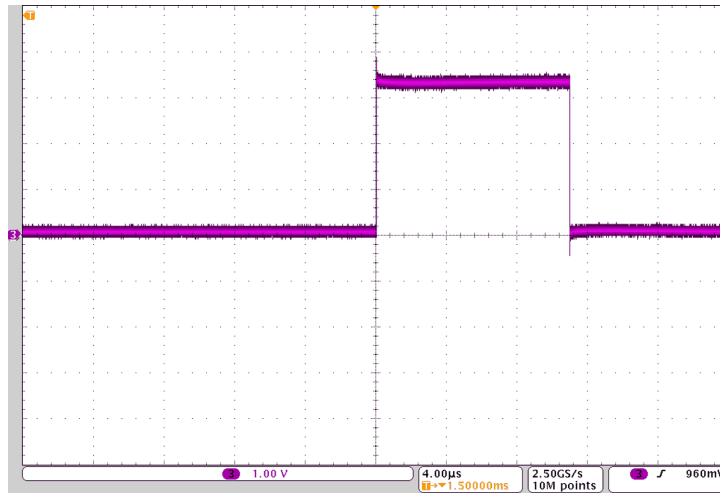


图 4-7. EST 形状的 Codesys EtherCAT 主站的 TX_EN 时序 - 1.5ms 周期时间，示波器处于持续模式

在抖动方面，在 TX_EN 信号中，10ns 的帧起始抖动在该分辨率下不可见。图 4-8 和图 4-9 显示了开始发送和结束发送帧的放大视图。这证实了抖动低于 10ns。

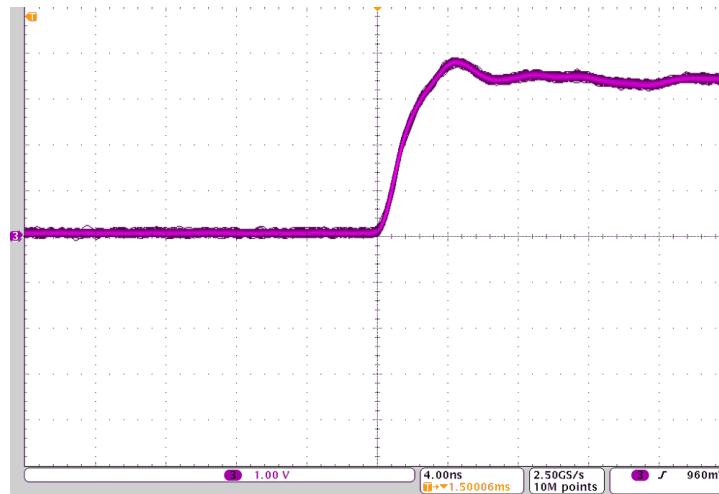


图 4-8. EST 形状的 Codesys EtherCAT 主站的 TX_EN 信号开始时的放大视图 - 1.5ms 周期时间，示波器处于持续模式

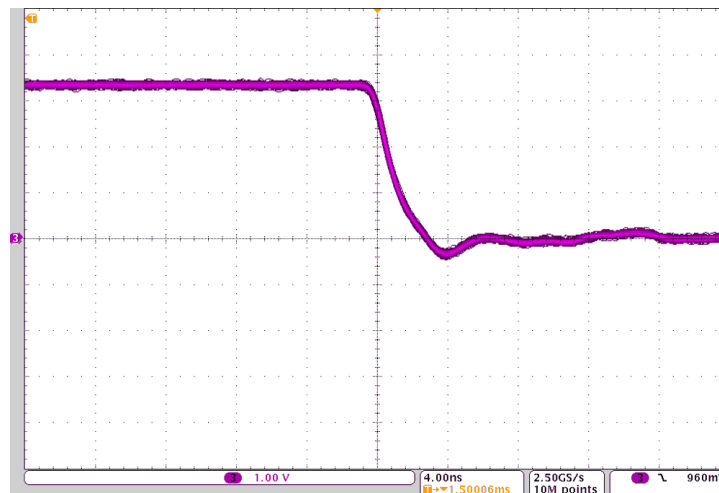


图 4-9. EST 形状的 Codesys EtherCAT 主站的 TX_EN 信号结束时的放大视图 - 1.5ms 周期时间，示波器处于持续模式

5 总结

如果设计得当，具有 IEEE 802.1Q-2018 TSN 特性的千兆位以太网局域网可以实现与 EtherCAT 相当的时间同步。在这两个系统中，最大的误差源都是时钟和物理级收发器的硬件设计。通过利用 EST 的标准 TSN 特性，可以将帧精确地放置在线路上，而无需依赖供应商专有的 TTS 实现。这些发现对于需要精确而可靠的通信的行业（例如运动和电机控制）具有重要意义。此外，能够精确地将帧放置在线路上，这说明了支持 TSN 的硬件可用于改进当前的 EtherCAT 主站实现方案，并为 TSN 解决方案在某些用例中成为 EtherCAT 的可行替代方案铺平了道路。

6 参考文献

1. The OPC Foundation releases the OPC UA Field eXchange (UAFX) Specifications , <https://opcfoundation.org/news/press-releases/the-opc-foundation-releases-the-opc-ua-field-exchange-uafx-specifications/>
2. IEC/IEEE 60802 TSN Profile for Industrial Automation , <https://1.ieee802.org/tsn/iec-ieee-60802/>
3. EtherCAT FAQs, 1.5 EtherCAT uses the Master/Slave Medium Access Control (MAC) method.How about inclusive language? , <https://www.ethercat.org/en/faq.html#:~:text=Since%20ETG%20does,list%20of%20abbreviations>
4. D. Bruckner, R. Blair, M-P. Stanica, A. Ademaj, W. Skeffington, D. Kutscher, S. Schriegel, R. Wilmes, K. Wachswender, L. Leursx, M. Seewaldxi, R. Hummenxii E-C, Liuxiii S. Ravikumarxiv. OPC UA TSN A new Solution for Industrial Communication. https://cdn.weka-fachmedien.de/whitepaper/files/OPC_UA_TSN_-_A_new_Solution_for_Industrial_Communication.pdf
5. 适用于 Sitara™ AM57x 千兆位以太网和 PRU-ICSS 且具有“时间触发发送”功能的 EtherCAT® 主站参考设计 , <https://www.ti.com.cn/tool/cn/TIDEP0079>
6. Acontis EtherCAT Master Stack , <https://www.acontis.com/en/ethercat-master.html>
7. icECAT , EtherCAT® Master Stack for Embedded Systems , <https://www.ibv-augsburg.de/en/products/icnet/ethercat-master/>
8. icECAT。EtherCAT Master Stack Benchmark , https://www.ibv-augsburg.de/downloads/icECAT_EtherCAT_Master_Stack_Benchmark.pdf
9. EtherCAT Master Stack Technical Presentation , http://software.acontis.com/Documents/AT1020_V1.1_EC-Master-Technical.pdf
10. EtherCAT 特性：分布式时钟 , https://training.ti.com/sites/default/files/docs/f2838x_ethercat_distributed_clocks.pdf
11. Ivan Khoronzhuk , “plget” , <https://github.com/ikhorn/plget>
12. OSADL QA Farm on Real-time of Mainline Linux, Latency plots of all RT systems under test , <https://www.osadl.org/Combined-latency-plot-of-all-RT-systems.qa-latencyplot-allrt.0.html?latencies=&showno=&slider=0>
13. CODESYS Control Performance Optimization of Real-Time Performance , https://content.helpme-codesys.com/en/CODESYS%20Control/_rtsl_performance_optimization.html
14. Song, Yoong Siang, Kweh, Hock Leong, Choong, Chwee-Lin, Ong, Boon Leong ; Systemic Analysis and Guide to Achieve Concurrent Real-Time Linux Applications over TSN Network , Embedded World Conference 2022
15. TSN Documentation Project for Linux , <https://tsn.readthedocs.io/>

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司