

Technical White Paper

基于以太网 PHY 的时间敏感网络



Melissa Chang and Geet Modi

摘要

时间同步在现代车辆中发挥至关重要的作用，支持许多汽车应用得以实现。这些应用包括前后指示灯等车灯的同步激活，确保多个扬声器的音频播放时序正确、使用协调的传感器输入（如加速度计和麦克风输出）来消除路面噪音，将 GNSS 接收器与 v2x 收发器同步，以及同时操作激光雷达和雷达传感器进行精确的区域扫描。

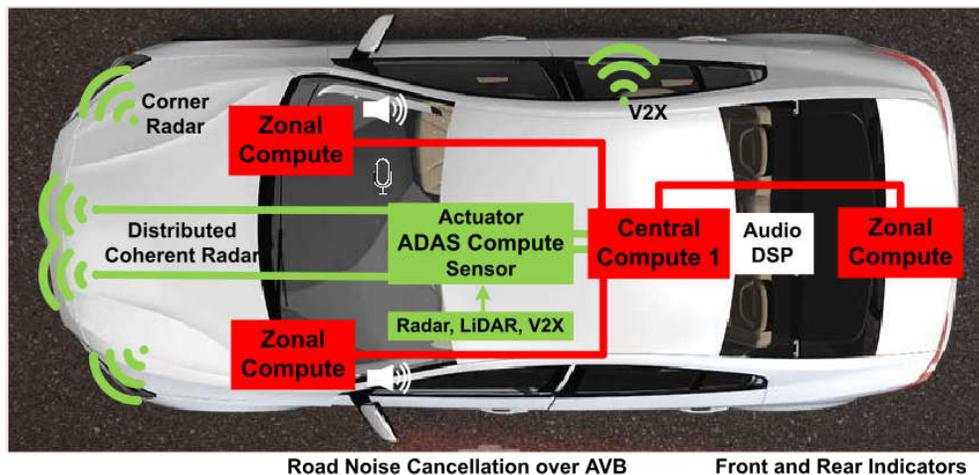


图 1-1. 汽车架构，侧重于需要时间同步的 ECU

在上述应用中引入时间同步的一种方法是通过以太网实现开放标准 IEEE 802.1AS。IEEE 802.1AS 源自“时间敏感网络” (TSN)，TSN 定义了一套标准，来设计具有“有界延迟、低数据包延迟变化和低数据包丢失的数据包传输”的系统¹。IEEE 802.1AS 是 TSN 标准之一，指定了用于确保时间敏感应用在毫秒到纳秒级别同步精度要求下，能够满足同步需求的协议和程序。此白皮书简要概述了需要时间同步的应用，IEEE 802.1AS 的工作原理，以及 TI 以太网 PHY DP83TG721、DP83TC817 和 DP83TC818 如何实现 IEEE 802.1AS，以提供精确的同步精度并减少软件开销。

内容

1 时间敏感网络在汽车应用中的作用.....	2
2 通用精确时间协议算法概述.....	3
2.1 gPTP 时间戳握手过程.....	5
3 实现 gPTP 的方法：时间戳位置.....	6
4 固定延迟和恢复时钟模式.....	6
5 事件触发器和监测器.....	10
6 简化的 gPTP 集成.....	11
7 结语.....	11
8 参考资料.....	11

插图清单

图 1-1. 汽车架构，侧重于需要时间同步的 ECU.....	1
---------------------------------	---

图 1-1. 扩展孔径雷达示例.....	2
图 2-1. 挂钟模型.....	3
图 2-2. 两个时钟间的延迟偏移.....	4
图 2-3. 两个时钟之间的频率偏移.....	4
图 2-4. 两步同步中的 gPTP 时间偏移和时钟漂移方程.....	5
图 3-1. 系统中不同类型的时间戳.....	6
图 4-1. DP83TG721 PPS 同步设置：当 PTP 在后台运行时，GPIO 引脚从 PHY 生成 PPS 信号.....	7
图 4-2. 使用本地 125MHz 时钟作为 PTP 时钟源的 DP83TG721 PPS 同步.....	7
图 4-3. 使用 MDI 恢复时钟作为时钟源的 DP83TG721 PPS 同步.....	8
图 4-4. 使用本地 250MHz 时钟并禁用固定延迟的 DP83TC818 PPS 同步.....	9
图 4-5. 使用本地 250MHz 时钟并启用固定延迟的 DP83TC818 PPS 同步.....	9
图 4-6. 使用恢复 200MHz 时钟并启用固定延迟的 DP83TC818 PPS 同步.....	10
图 5-1. PPS 应用示例.....	10
图 5-2. PHY 事件监测器和触发器应用.....	11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 时间敏感网络在汽车应用中的作用

现代车辆使用多种需要精确同步的各种传感器，而所需的同步精度取决于具体应用

一个简单的例子是使用电机自动打开后备箱。为确保后备箱平稳打开，左右电机需要同时运行。电机可由脉宽调制 (PWM) 信号控制，因此通过同步的 PWM 输入信号，两个电机可以同时运行。IEEE 802.1AS 的作用是帮助生成同步的 PWM 波形。此应用对同步精度的要求可达毫秒级。

汽车音频系统是另外一个需要时间同步的良好应用示例。为了获得高品质的空间音频体验，前后多个扬声器的音频播放需要完全同步。这可以通过同步音频播放的 ECU 和负责生成所播放音频流的中央信号处理/混频器来实现。IEEE 802.1AS 可用于实现前后放大器和中央信号处理器之间的时间同步，并对不同的路径延迟进行补偿。信号处理器在传输音频包的同时会嵌入播放时间，也就是需要在音频放大器上播放音频包的时间。尽管存在不同的路径延迟，音频放大器仍能在相同的同步时间播放音频数据包。此应用对同步精度的要求通常为微秒级。

ADAS 传感器同步是精确时间同步的另一个重要应用。雷达、激光雷达、摄像头等传感器分布在汽车上的不同位置，用于感知环境的各种变化（如障碍物、附近物体的速度等）。这些传感器扫描的信息将提供给 ADAS，帮助系统获取车辆周围 360° 的全面视图。来自这些传感器的数据同步程度越高，ADAS 计算单元能越准确地检测和实际障碍物。为了让雷达同步工作，每个雷达传感器必须在同一时间（纳秒级精度）启动环境扫描（发射“啾啾”信号）。时序不匹配可能会导致最终图像模糊。每个雷达传感器可以接收每秒一次的同步脉冲 (PPS) 参考输入信号，来确保它们同时发射“啾啾”信号。IEEE 802.1AS 的作用是帮助生成同步 PPS 信号。

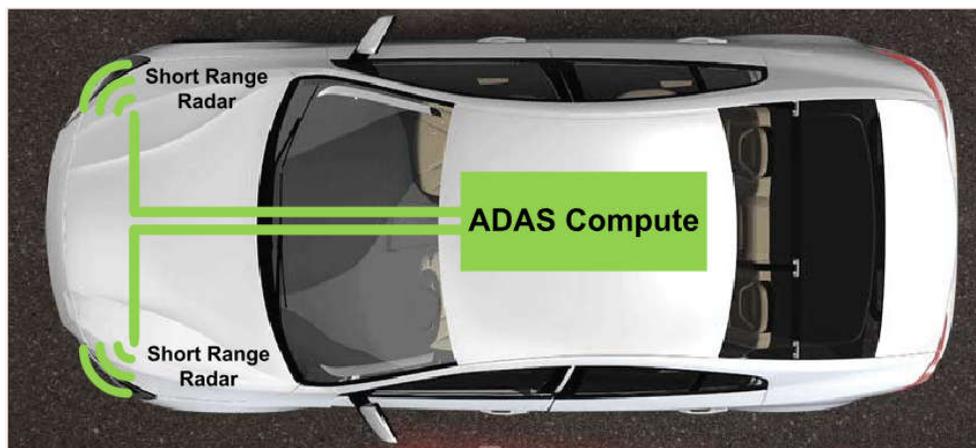


图 1-1. 扩展孔径雷达示例

无论应用是需要生成波形还是通过时间敏感网络传输时间戳，所有节点都必须基于同步参考时钟运行。IEEE 802.1AS 定义了实现同步参考时钟的程序和协议。然而，时间同步的精度取决于实施 802.1AS 的硬件架构。以下各节概述 IEEE 802.1AS 程序以及 TI 以太网 PHY 用于实现精确时间同步的一些架构选择。

2 通用精确时间协议算法概述

在 ECU 中实现 IEEE 802.1AS 通常需要两个元件：

- IEEE 802.1AS 数据包 (也称为 PTP 数据包) 的时间戳
- 使用由第一个元件生成的时间戳来计算路径延迟、抵消偏移和 ppm 漂移补偿。

第一个元件通常在硬件中实现，以提高同步精度，第二个元件通常在软件中实现，也称为 gPTP。

以下部分概述了 gPTP 算法如何实现与两个 ECU (一个主设备，一个从设备) 的参考时钟实现时间同步。在 IEEE 802.1AS 中，这种参考同步时钟也称为每日时间参考时钟或挂钟。挂钟 (请参阅图 2-1) 可以建模为一个以固定增量切换的计数器。

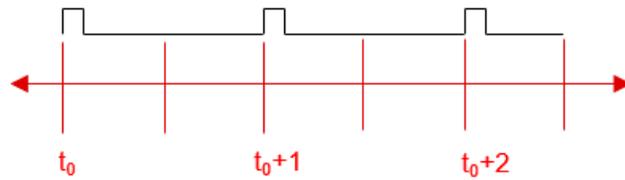


图 2-1. 挂钟模型

gPTP 可执行三个主要任务。第一个任务是将设备 ECU 的挂钟与主设备 ECU 的挂钟同步，因为每个 ECU 的启动时间可能不同。如图 2-2 所示，要使两个挂钟同步，延迟 Δt 必须相同。

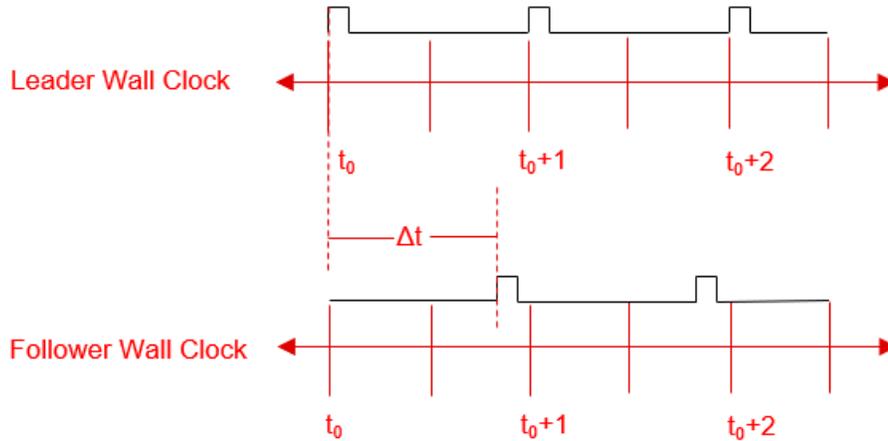


图 2-2. 两个时钟间的延迟偏移

gPTP 的第二个任务是校正挂钟源的 PPM 漂移。每个时钟都有一些 PPM 时钟漂移，这会导致频率发生轻微漂移。因此，即使延迟已经对齐，时钟的 ppm 漂移也可能在每个周期之间引入额外的延迟 Δf 。

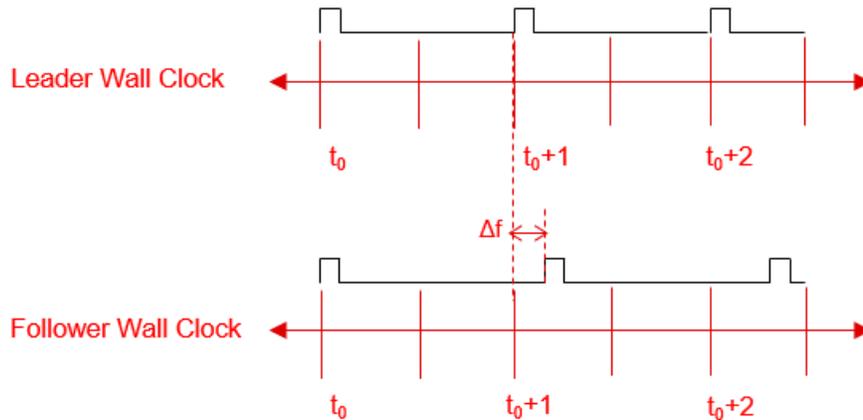


图 2-3. 两个时钟之间的频率偏移

为了解决两个时钟信号之间的计数器差异（时间偏移）和频率差异（时钟漂移），主设备 ECU 和从设备 ECU 可以交换一组时间戳来计算差异。在计算两个挂钟之间的延迟时，由于时间戳在主设备和从设备之间传输需要时间，因此存在一个路径延迟。

gPTP 的第三个任务是计算并考虑这种路径延迟。

图 2-4 展示了主设备与从设备之间交换的时间戳集合，用于计算路径延迟、时间偏移和时钟漂移补偿。

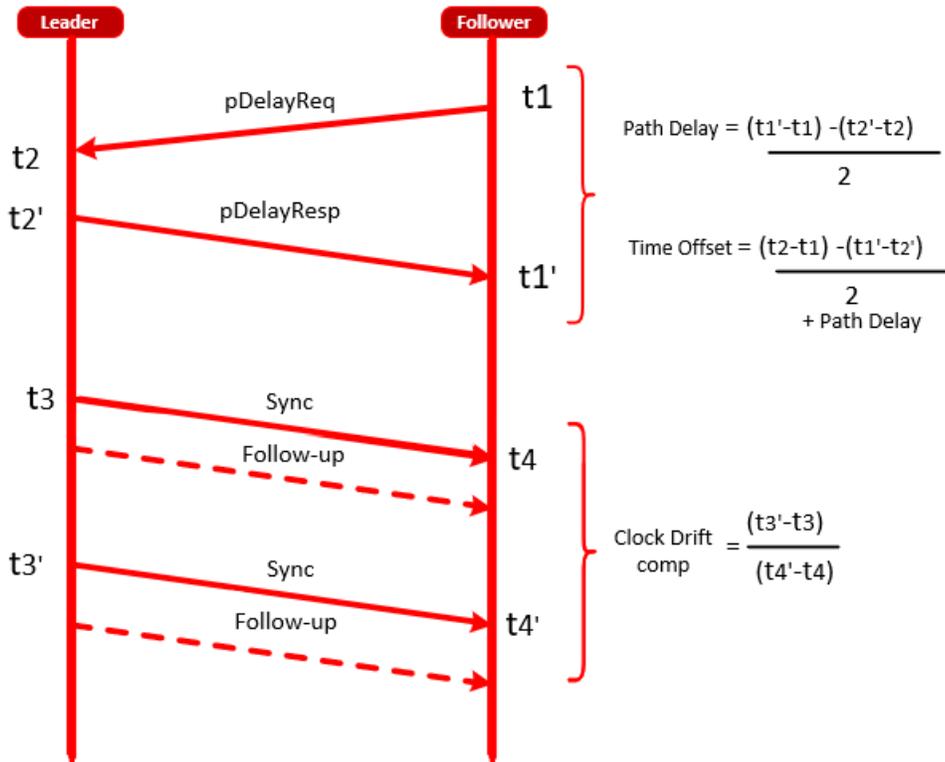


图 2-4. 两步同步中的 gPTP 时间偏移和时钟漂移方程

2.1 gPTP 时间戳握手过程

为了与 PTP 主时钟同步，PTP 从时钟必须调整偏移量以与主时钟保持一致。这个过程由从时钟发送一个对等延迟请求 `pdelay_req` (时间戳为 t_1) 来启动。接下来，主时钟在 t_2 接收到 `pdelay_req`，并在 t_2' 发送一个对等延迟响应 `pdelay_resp`，从时钟在 t_1' 接收到该响应。在握手过程中， t_2' 和 t_2 会转发给从时钟。从时钟记录了时间戳 t_1 、 t_2 、 t_2' 和 t_1' 后，这些时间戳就可以用于计算偏移量和路径延迟，并使用图 2-4 中所示的公式调整从时钟的挂钟，使其与主时钟的挂钟同步。请注意，路径延迟的公式假设路径是对称的。

从时钟还可以调整频率以与主时钟保持一致。主时钟会持续发送同步消息， t_3 发送，并在 t_4 由从时钟接收。接下来的时间戳可以分别表示为 t_3' 和 t_4' ，如图 2-4 所示。频率漂移的计算公式如图 2-4 所示。如果比率为 1，则无需进行任何调整。如果比率为 0.9995，则每个后续周期的周期时间将是前一个周期的 0.9995 倍。

由于从主时钟发起同步消息到消息实际发送之间存在一定的延迟，系统还会发送一条后续消息，以包括原始同步消息实际发送的时间。

主时钟和从时钟可以保持同步，前提是每个带时间戳的数据包在网络上传输所需的时间始终相同。然而，在实际情况下，由于处理器和网络存在不可预测延迟，数据包的传输时间会有所不同。这使得保持同步变得更具挑战，在接下来的几个章节中，将介绍一些应对这些挑战的方法。

备注

对于具有两个以上处理器的应用，可以使用边界时钟在网络中分发 PTP 协议。有关边界时钟工作原理的更多详情，请参阅 [IEEE 1588 边界时钟和透明时钟的实现 \(使用 DP83640\)](#)。

3 实现 gPTP 的方法：时间戳位置

为了让 gPTP 正常工作，相互同步的系统必须具有一个共同的时钟源，并且能够为出站和入站数据包打上时间戳。数据包时间戳标记的位置会直接影响同步的准确性。

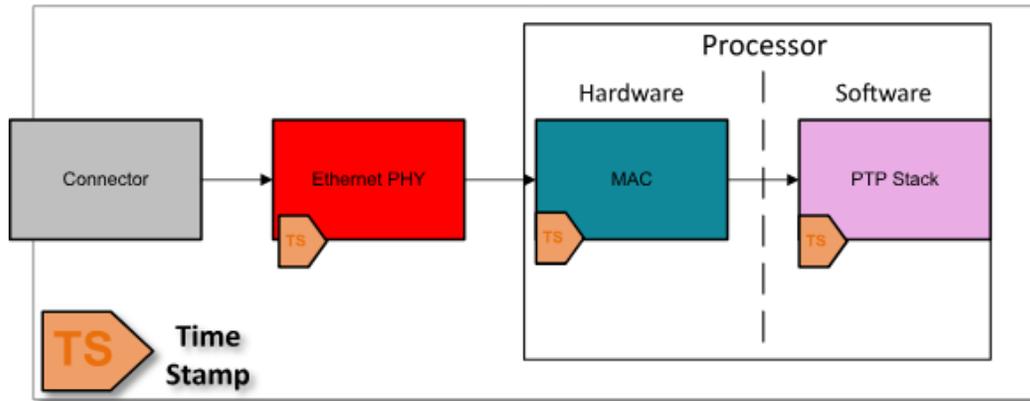


图 3-1. 系统中不同类型的时间戳

数据包的时间戳越接近电缆，所考虑的不可预测延迟因素越多，同步的准确性也越高。

对于仅需要毫秒级同步的应用（如照明和主干网），可以在软件栈中打时间戳。这种方法很简单，但由于软件处理延迟，会引入不确定性。

对于需要微秒级精度的应用（如音频和道路噪声消除），可以在 MAC 层使用硬件级时间戳。与软件时间戳标记相比，这种方法减少了延迟变化，从而提供更高的准确性。

最准确的打时间戳方式是在以太网 PHY 层打时间戳，这种方式能够实现纳秒到亚纳秒级的同步精度，适用于 ADAS 传感器应用。德州仪器 (TI) 的 DP83TG721 和 DP83TC817/8 PHY 支持 IEEE 802.1AS，提供在 PHY 层打时间戳的功能。

4 固定延迟和恢复时钟模式

除了支持 IEEE 802.1AS 硬件时间戳，DP83TG721 和 DP83TC817/8 还具有额外功能，用于解决 PHY 引起的不确定延迟。

对于 ADAS 传感器应用，这两个器件都提供将恢复的 MDI 时钟用作挂钟源的选项。通过使用恢复时钟，系统可以消除 ppm 漂移和相关补偿，从而获得更好的同步性能。恢复时钟也不需要持续调整，这可以节省软件流量和开销。因此，在使用最大吞吐量的同时，对同步精度的影响也最小。

图 4-1 显示了在 DP83TG721 上使用本地时钟和恢复时钟源进行点对点 PPS 同步的示例。从示波器的波形图中可以看出，使用恢复时钟的情况下，延迟为 4.5ns，抖动为 0ns；而使用本地时钟的情况下，延迟为 3ns，抖动为 27ns。



图 4-1. DP83TG721 PPS 同步设置：当 PTP 在后台运行时，GPIO 引脚从 PHY 生成 PPS 信号

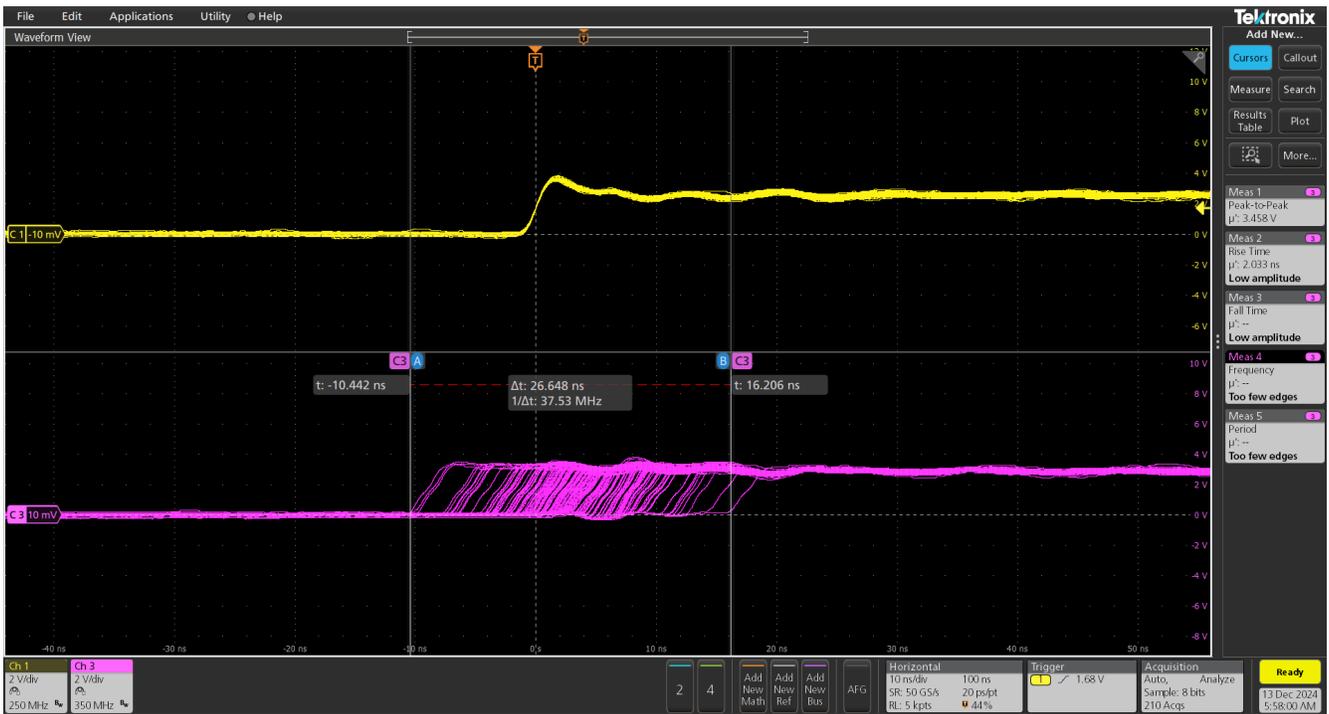


图 4-2. 使用本地 125MHz 时钟作为 PTP 时钟源的 DP83TG721 PPS 同步

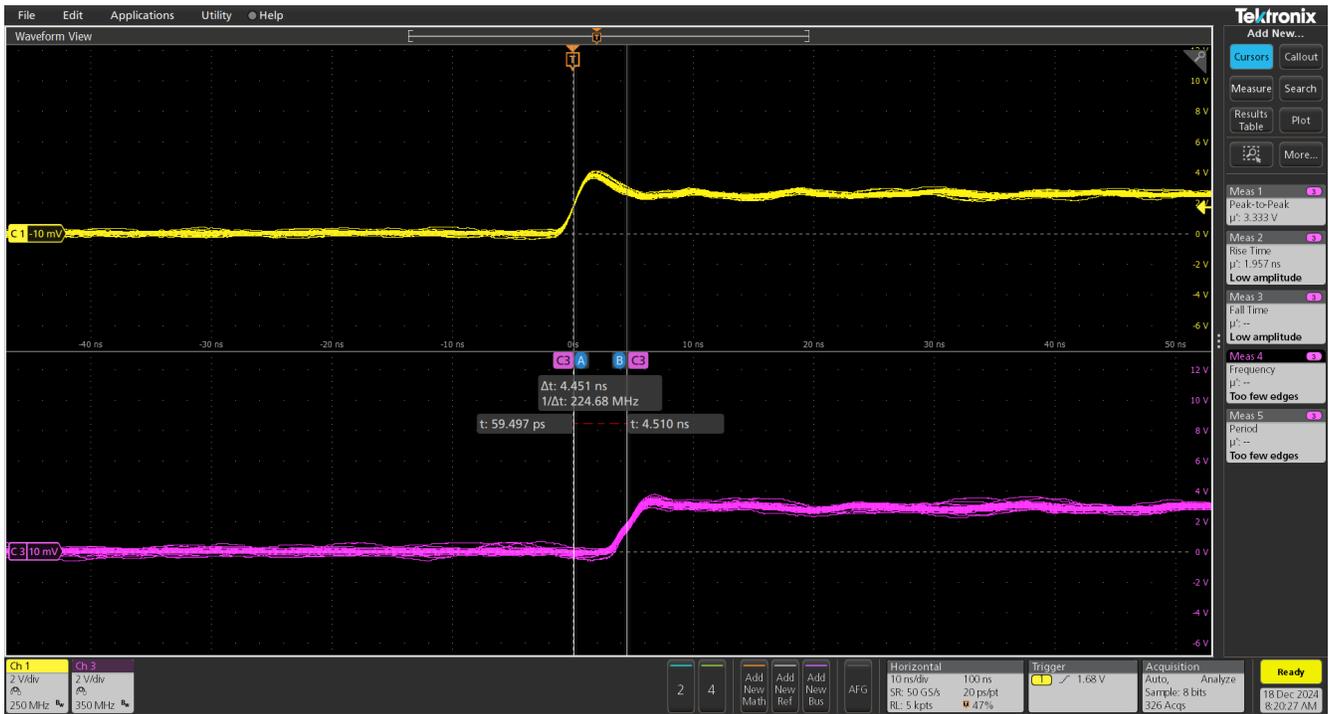


图 4-3. 使用 MDI 恢复时钟作为时钟源的 DP83TG721 PPS 同步

TI 的 100Base-T1 IEEE 802.1AS 增加了固定延迟特性，以解决 PHY 的 PCS 层出现的延迟变化。由于时钟速度较慢，低速 PHY (100Base-T1) PHY 的延迟变化更为明显。为了实现精确同步，需要详细考量架构设计。通过添加这些架构层面的考量，可以最大限度减少延迟变化的影响。

以下是 DP83TC817 在固定延迟模式和非固定延迟模式下进行测量的一些示例。使用固定延迟模式时，示波器屏幕截图显示抖动为 21ns，而在非固定延迟模式下，示波器屏幕截图显示抖动为 50ns，表明同步精度在固定延迟模式下要高得多。通过结合固定延迟模式和恢复时钟模式，可进一步提高同步精度，达到 0ns 抖动和仅 6.3ns 延迟。

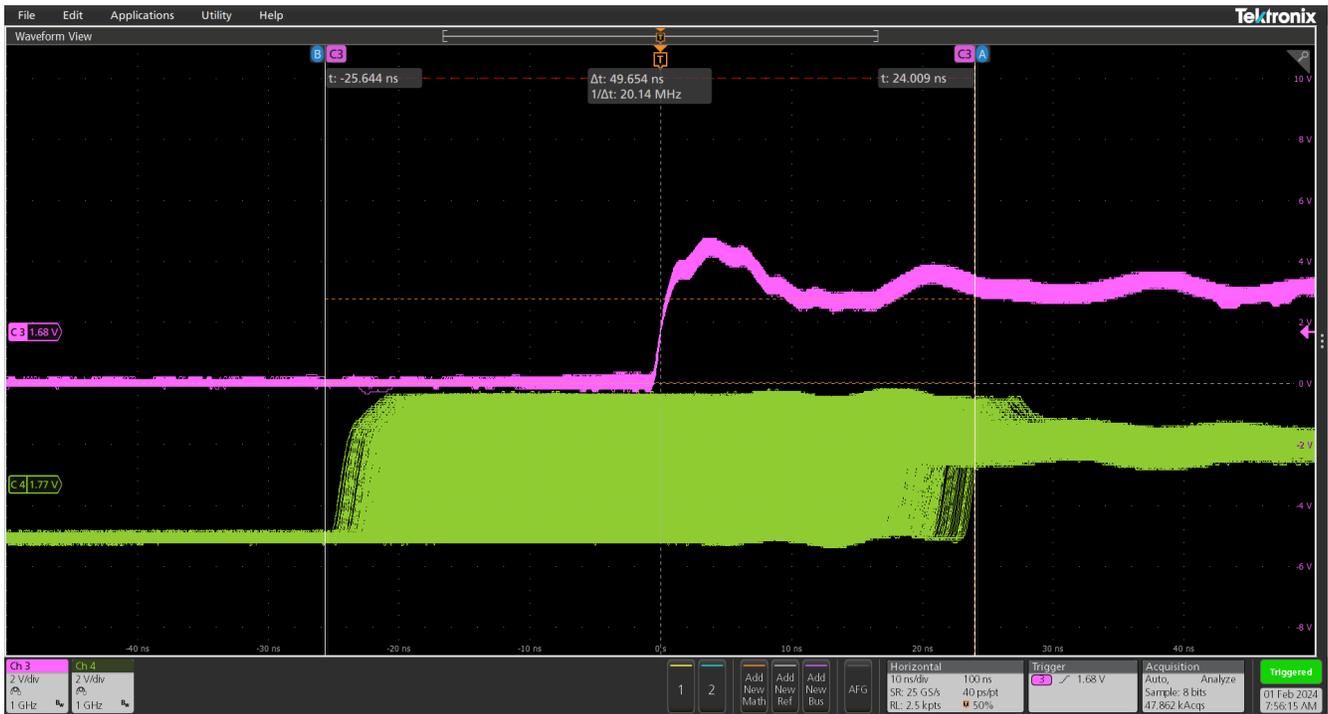


图 4-4. 使用本地 250MHz 时钟并禁用固定延迟的 DP83TC818 PPS 同步

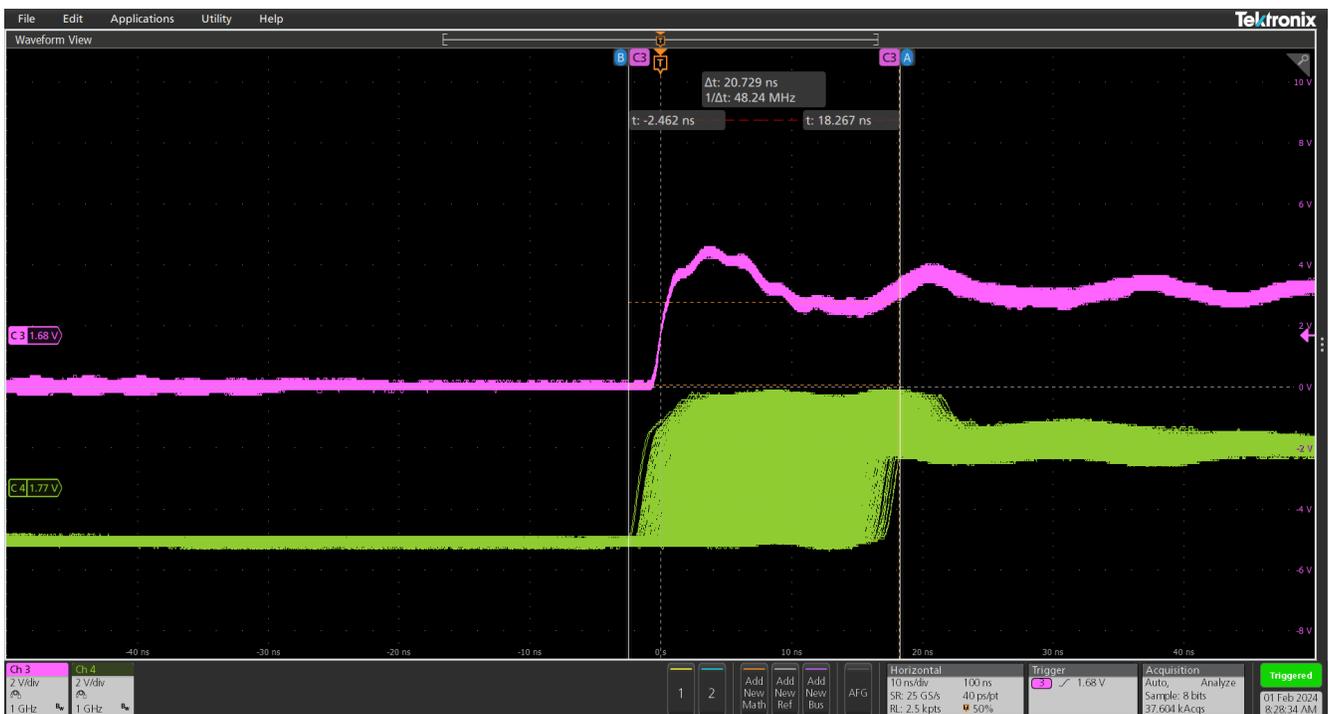


图 4-5. 使用本地 250MHz 时钟并启用固定延迟的 DP83TC818 PPS 同步

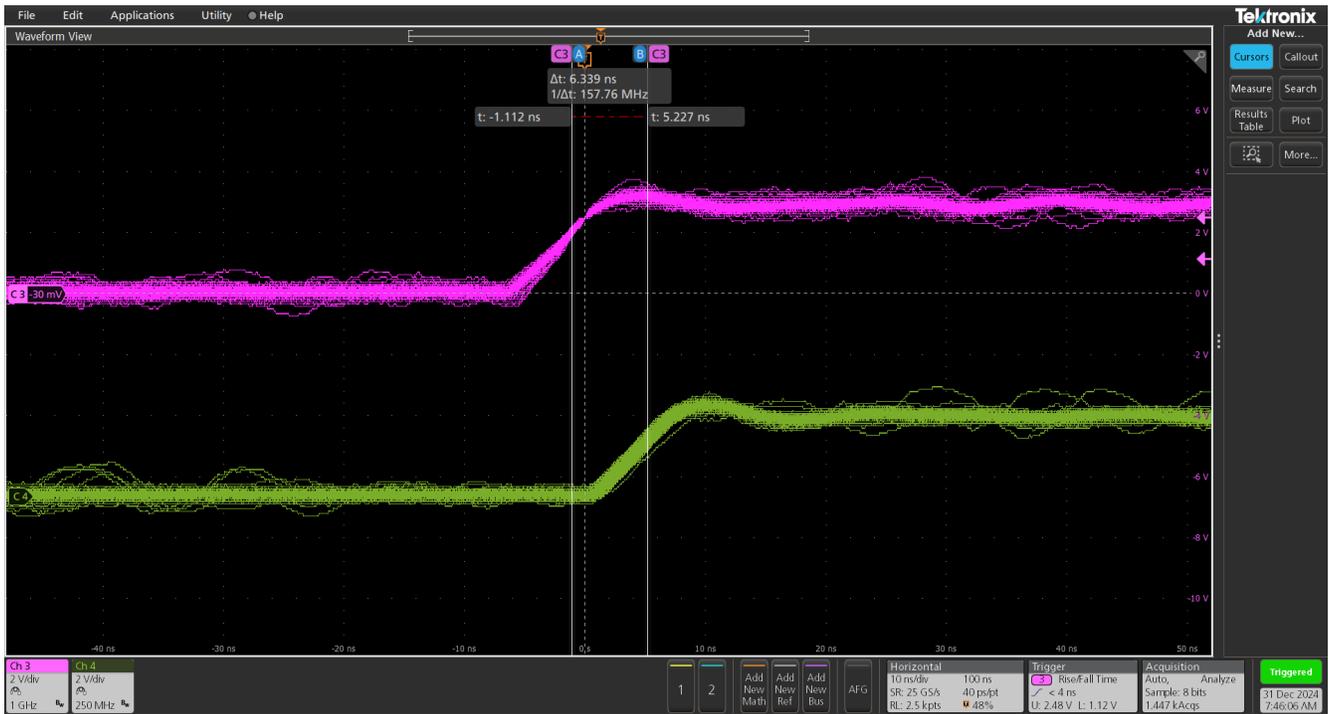


图 4-6. 使用恢复 200MHz 时钟并启用固定延迟的 DP83TC818 PPS 同步

5 事件触发器和监测器

DP83TG721 和 DP83TC817/8 还支持在 PHY GPIO 引脚上提供事件触发器和监测器，从而减轻为 TSN 应用生成这些触发器和监测器的一些处理器开销。事件触发器是 GPIO 生成的 PWM 波形，与挂钟保持一致。它们可用于生成同步的每秒脉冲 (PPS) 波形或 1Hz PWM 波形。

事件监测器是 GPIO 引脚的输入波形，可以为每个上升沿或下降沿设置时间戳。这些功能特别适合以下需要将来自某些接收器的输入与通过以太网连接的收发器的输出进行同步的应用场景。

图 5-1 显示了 PPS 输入和 PPS 输出通过 PTP 同步。这两个信号均由处理器接收和生成。

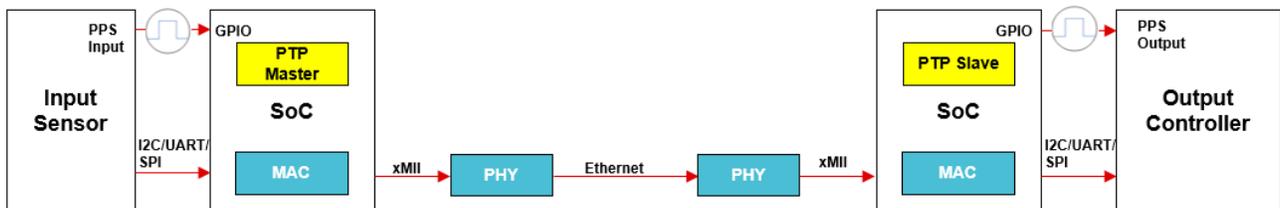


图 5-1. PPS 应用示例

图 5-2 显示了 PPS 输入和 PPS 输出通过 PTP 同步。这两个信号均由 PHY 接收和生成，从而减轻了上图中的处理器开销。

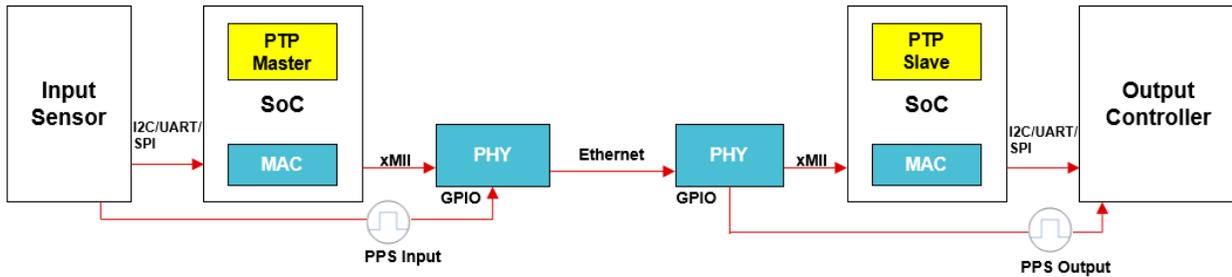


图 5-2. PHY 事件监测器和触发器应用

6 简化的 gPTP 集成

当 IEEE 802.1AS 采用 PHY 级时间戳时，PTP 时间戳信息和相关的 PTP 序列 ID 将存储在 PHY 中。使用传统的 MDC/ MDIO 串行接口访问这些数据包可能需要几微秒到几毫秒的时间，有时与 SoC 中运行的 802.1AS 软件栈进行集成时可能非常复杂。

为了简化与 gPTP 的集成，TI PHY 额外提供了两种方法来为主机 SOC 提供 PTP 时间戳。

- 在 PTP 报文转发到 ECU 之前，通过 RX 接口在 PTP 报文中添加时间戳。
- 一种基于数据包的状态机制，允许 PHY 向 SoC 生成带时间戳的带内以太网帧。该数据包称为 **PHY 状态帧**，可用于提供发送 PTP 数据包时间戳，接收 PTP 数据包时间戳、事件时间戳和触发条件。

通过这些附加功能，SoC 可以直接从 IEEE 802.1AS 软件栈访问 PTP 报文，而不必通过 MDIO/MDC 访问报文，从而大大简化了 gPTP 的集成过程，并提升了效率。

7 结语

时间同步对许多汽车应用至关重要。IEEE 802.1AS 是实现时间同步的可靠方法。实现 IEEE 802.1AS 的方法有多种，但在 PHY 级打时间戳可以提供最精确的同步级别。TI 的 DP83TG721 和 DP83TC818/7 具有额外功能，例如用于增强同步的固定延迟模式和 MDI 恢复时钟功能、能够降低 TSN 应用处理器开销的事件触发器和监测器功能，以及可生成 PHY 状态帧以简化 gPTP 集成的功能。

8 参考资料

1. IEEE Std 802.1AS™-2020 《IEEE 局域网和城域网标准 - 时间敏感型应用的定时和同步》
2. 德州仪器 (TI) : [IEEE 1588 边界时钟和透明时钟的实现 \(使用 DP83640\)](#)
3. 德州仪器 (TI) : [DP83TG721x-Q1 具有高级 TSN 和 AVB 的 1000BASE-T1 汽车以太网 PHY 数据表](#)
4. 德州仪器 (TI) : [DP83TC818S-Q1 具有 AVB 时钟生成、IEEE802.1AE MACsec、IEEE802.1AS 和 TC10 睡眠唤醒功能的精密安全型 100BASE-T1 汽车以太网数据表](#)
5. 德州仪器 (TI) : [DP83TC817S-Q1 具有 IEEE802.1AE MACsec、IEEE802.1AS 和 TC10 睡眠唤醒功能的精密安全型 100BASE-T1 汽车以太网数据表](#)
6. 德州仪器 (TI) : [如何在以太网收发器中实现 IEEE 1588 时间戳](#)

重要通知和免责声明

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司