参考文献

Technical White Paper

汽车雷达应用中的 TSN 和 MACsec

摘要

现代车辆正从基于域的电气架构转向区域架构和中央计算架构，其中来自多个雷达传感器的数据在中央处理器处合并，并用于传感器融合、分布式孔径雷达和高级驾驶辅助。这一转变对传输雷达数据的以太网链路提出了新的要求。该链路必须分发精确到纳秒的时基，使每个传感器在同一时刻捕获数据；同时该链路必须保护这些数据，使中央感知栈能够信任所接收的数据。

本白皮书阐述内置于以太网物理层 (PHY) 的两项 IEEE 标准如何在汽车雷达应用中满足这些需求。IEEE 802.1as (gPTP) 提供时间同步，而 IEEE 802.1ae (MACsec) 提供针对欺骗、篡改和窃听攻击的保护。

内容

1 简介.....2
2 基于 IEEE 802.1as 的雷达时间同步.....2
3 利用 MACsec 保护雷达数据安全.....3
4 将 MACsec 与 PTP 一起使用.....4
5 支持 TSN 和 MACsec 的 TI 以太网 PHY.....4
6 结语.....4
7 参考资料.....4

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: STDA052
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 简介

当今道路上的大多数车辆采用域架构，其中电子控制单元 (ECU) 及相关电缆按功能 (例如动力总成、车身、信息娱乐或 ADAS) 进行分组。行业正在向区域架构演进，其中功能按车辆中的物理位置分组。区域模块将相关区域中的传感器和执行器聚合在一起，并通过高速以太网主干连接到中央车辆计算节点。该架构减少了 ECU 数量并缩短了线束长度。该架构还支持对车辆功能进行无线 (OTA) 软件更新，这是软件定义车辆 (SDV) 的基础，也是迈向更高等级驾驶自动化的路径。

在该架构中，中央计算节点会合并来自多个雷达传感器以及摄像头和其他传感器的数据，这些传感器通过以太网连接。由此产生两项要求：

1. 数据必须在时间上对齐。中央处理器会融合来自多个雷达以及摄像头和其他传感器的数据。只有当每次测量描述的是同一时刻，融合结果才正确。这取决于所有传感器共享一个精确的通用时基，而该时基由 IEEE 802.1as 通过以太网分发。
2. 数据必须可信。雷达数据通过贯穿车辆的以太网线缆传输；做出制动和转向决策的中央感知栈必须能够验证数据来自真实传感器，并且在传输过程中未被篡改、重放或读取。IEEE 802.1AE MACsec 在链路层提供这种保护。

2 基于 IEEE 802.1as 的雷达时间同步

为什么雷达需要共享时基

无时间混叠的传感器融合：雷达和摄像头各有局限。摄像头对黑暗、眩光和天气敏感，而雷达角分辨率较低，无法读取标志或车道标线。将两者融合可以克服各自的局限，但前提是两次测量描述的是同一时刻。设想一辆以 30m/s 行驶的车辆。如果摄像头在 t = 0 时捕获一帧，而雷达在 t = 10ms 时捕获该帧，则车辆在两次测量之间已移动 0.3m，融合结果会将同一物体置于两个不同位置。共享时基使中央处理器能够为每次测量加时间戳并补偿差异，或者使系统在一开始就在同一时刻触发各传感器。

跨雷达传感器的帧起始对齐：各自使用独立时钟运行的雷达传感器会因这些时钟之间的百万分之一 (ppm) 差异而逐渐漂移，因此各帧会随时间相互滑动。当每个传感器中的 PHY 提供源自 IEEE 802.1AS 时间的帧触发时，每个雷达都在相同的网络时间启动线性调频脉冲序列。只要多个传感器要作为一个系统协同工作，这一操作就很有用，中央 ECU 可以合并数据，而无需补偿时序差异。该功能对于分布式孔径雷达至关重要。

分布式孔径雷达：在卫星架构中，中央 ECU 会合并来自多个传感器头的数据。更进一步的是分布式孔径雷达 (DAR)，其中两个或更多较小的雷达头作为一个具有更大虚拟孔径的雷达协同工作，从而提供比任何单个雷达头更精细的角分辨率。这要求各雷达头在时间上以纳秒级精度同步，远超基于软件的同步所能达到的水平。因此，以太网时基的质量是雷达系统的直接性能因素。有关分布式孔径雷达的更多信息，请参阅 ZEN-3P-DARSW。

IEEE 802.1as 的工作原理

IEEE 802.1AS (gPTP) 是*时间敏感网络* (TSN) 标准之一。该标准使以太网网络中的每个节点共享一个通用壁钟时间。一个节点充当主节点并提供参考时间。每个从节点与主节点交换带时间戳的消息，以校正两个时钟之间的偏移、校正本地时钟的频率漂移，并测量链路的路径延迟。可达到的精度取决于时间戳捕获的精确程度。有关 gPTP 算法和时间戳握手协议的更多信息、请参阅“*基于以太网 PHY 的时间敏感网络*”。

时间戳位置

数据包可以在 PTP 软件栈中、在处理器 MAC 中或在 PHY 中加时间戳。从线缆到加时间戳位置之间的任何可变延迟都会成为定时误差，因此加时间戳的位置越靠近线缆，同步就越精确。*如何在以太网收发器中实现 IEEE 1588 时间戳* 中介绍了软件、帧起始检测和硬件方法。对于雷达等 ADAS 传感器，PHY 是加时间戳的最佳位置，因为这样可以达到最高精度。使用该方法可达到几纳秒级精度，这对分布式孔径雷达等应用至关重要。

English Document: STDA052
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

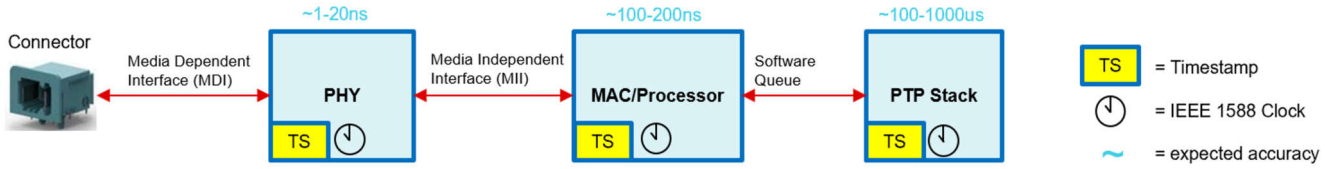


图 2-1. PTP 时间戳位置

3 利用 MACsec 保护雷达数据安全

为什么雷达链路需要安全性

高级驾驶辅助系统 (ADAS) 中的雷达传感器是安全关键型部件。这些传感器提供车辆用于检测障碍物、保持安全跟车距离和触发紧急制动的实时数据。随着车辆向区域和中央计算架构演进，这些数据通过以太网从传感器传输到中央处理器，这意味着数据要经过贯穿车辆的电缆，而这些电缆在车辆底部或前部可能被物理接触。

同时，现代车辆通过远程信息处理、OTA 更新系统和诊断接口与外界连接。这些连接扩大了恶意行为者可利用的攻击面。攻击者一旦通过物理或远程方式接入车内网络，就可以针对雷达数据流发起攻击。

对雷达数据的威胁

传输安全关键型数据的雷达链路是潜在攻击目标。下表描述了主要攻击类型、这些攻击的后果，以及 MACsec 如何应对每种潜在攻击。

表 3-1. 雷达数据的威胁与缓解措施

威胁	说明	后果	MACsec 保护机制
欺骗	从并非雷达的设备注入虚假的*检测到物体*帧	意外紧急刹车	认证密钥协商。每帧携带只有密钥持有者才能生成的 ICV。
重放	录制一段*道路畅通*的数据流，并在稍后重放该数据流	真实障碍物被掩盖	SecTAG 中的数据包编号。编号过旧或重复的帧会被丢弃。
中间人	截获帧并修改比特，将*障碍物*改为*畅通*，或反之	真实障碍物被掩盖	对每帧进行 ICV 完整性校验。被修改的帧无法通过校验并被丢弃。
窃听	捕获数据流以对传感器功能、分辨率或波形进行逆向工程	知识产权损失	有效载荷加密

PHY 中的 MACsec

IEEE 802.1AE 中定义的 MACsec 在第 2 层（数据链路层）运行。发送方为每一帧添加安全标签 (SecTAG)，附加完整性校验值 (ICV)，并对有效载荷进行加密。接收方验证 SecTAG 和 ICV，若校验失败则丢弃该帧，若通过则解密该帧。两端通过 IEEE 802.1X 定义的 MACsec 密钥协商 (MKA) 协议建立密钥。有关 MACsec 工作原理、帧格式和关键术语的完整说明，请参阅利用 MACsec 增强汽车以太网数据的机密性和完整性。

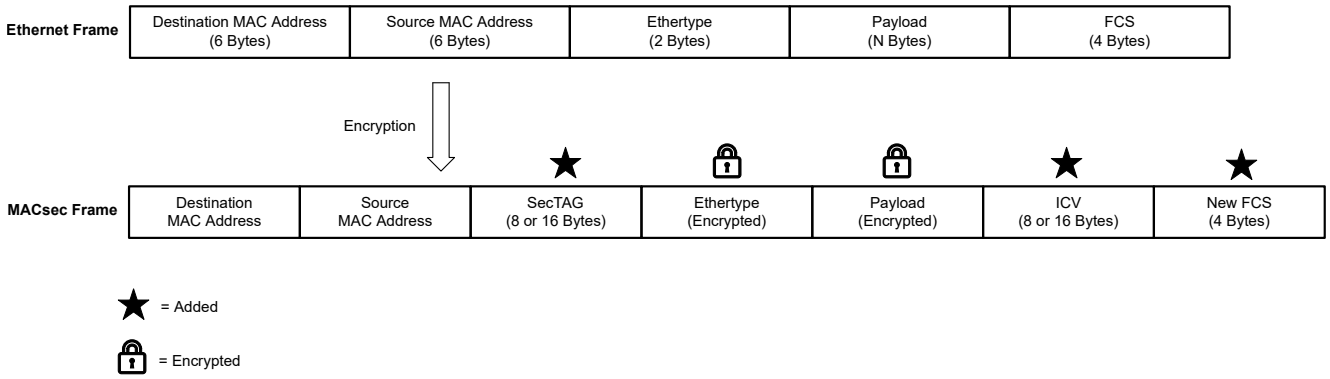


图 3-1. MACsec 以太网帧

English Document: STDA052
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 将 MACsec 与 PTP 一起使用

MACsec 和 IEEE 802.1AS 可以在同一链路上同时使用，从而让雷达链路既具备安全的数据，又具备精确的时基。DP83TC817-Q1 和 DP83TC818-Q1 将 IEEE 802.1as 硬件时间戳和 IEEE 802.1ae MACsec 集成在一个 PHY 中。对于需要时序但不需要 MACsec 的链路，DP83TC815-Q1、DP83TC816-Q1 和 DP83TG721-Q1 提供 IEEE 802.1as 硬件时间戳。

5 支持 TSN 和 MACsec 的 TI 以太网 PHY

TI 提供支持 IEEE 802.1as 硬件时间戳和 IEEE 802.1ae MACsec 的单对以太网 PHY，涵盖 100Mbps 和 1000Mbps，如下表所列。

表 5-1. TI 产品

器件	速度	IEEE 802.1as	MACsec	AVB 时钟
DP83TC815-Q1	100Mbps	是	否	否
DP83TC816-Q1	100Mbps	是	否	是
DP83TC817-Q1	100Mbps	是	是	否
DP83TC818-Q1	100Mbps	是	是	是
DP83TG721-Q1	1Gbps	是	否	是

6 结语

向区域架构和中央计算的转变，使以太网链路成为雷达测量链的一部分。精确到纳秒的共享时基使车辆能够将雷达与其他传感器融合而不产生时间混叠，使多个雷达的帧在同一网络时间启动，并支持分布式孔径雷达。在 PHY 中加时间戳可获得最佳精度，因为该位置排除了 MAC、处理器和操作系统的延迟变化。

同一条链路必须受到保护。MACsec 以线路速率提供认证、重放保护、完整性和加密，可应对雷达数据流的欺骗、重放、篡改和窃听。DP83TC817-Q1 和 DP83TC818-Q1 将 IEEE 802.1as 和 MACsec 组合在一个 PHY 中，使 100BASE-T1 雷达链路既能实现时间同步又能保障安全。

7 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，*您准备好迎接新兴汽车雷达卫星架构了吗？*，技术文章。
2. 德州仪器 (TI)，*DP83TC815-Q1 100Base-T1 汽车级以太网 PHY 收发器，具有 IEEE802.1AS 和 TC10 睡眠唤醒功能*，数据表。
3. 德州仪器 (TI)，*DP83TC816-Q1 100Base-T1 汽车级以太网 PHY 收发器，具有 IEEE802.1AS、AVB 时钟和 TC10 睡眠唤醒功能*，数据表。
4. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 德州仪器 (TI)，*利用 MACsec 增强汽车以太网数据的机密性和完整性*，技术白皮书。
8. 德州仪器 (TI)，*带硬件同步功能的以太网 PHY 扩大了汽车雷达的覆盖范围*，技术文章。
9. 德州仪器 (TI)，*如何在以太网收发器中实现 IEEE 1588 时间戳*，技术文章。
10. 德州仪器 (TI)，*区域架构如何为完全由软件定义的车辆铺平道路*，白皮书。
11. 德州仪器 (TI)，*基于以太网 PHY 的时间敏感网络*，技术白皮书。
12. Zendar，*ZEN-3P-DARSW - Zendar 分布式孔径雷达 | 具有相干传感器网络的高分辨率雷达*，工具。

English Document: STDA052
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 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。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月