参考資料

Technical White Paper

*車載レーダー アプリケーションにおける **TSN** と **MACsec***

概要

最新の自動車は、ドメインベースの電気的アーキテクチャから、ゾーン型および中央コンピューティング アーキテクチャへと移行しつつあります。こうしたアーキテクチャでは、複数のレーダー センサから取得したデータを中央プロセッサで統合し、センサ フュージョン、分散開口レーダー、先進運転支援などに使用します。この変化により、レーダー データを伝送するイーサネット リンクに新たな要件が生じています。リンクは、すべてのセンサが同時にデータを取得できるように、ナノ秒単位の高精度のタイム ベースを分配する必要があります。また、中央認識スタックが受信データを信頼できるように、そのデータを保護する必要があります。

このホワイト ペーパーでは、イーサネット物理層 (PHY) に組み込まれている 2 つの IEEE 規格が、車載レーダー アプリケーションでこれらのニーズにどのように対応するかについて説明します。IEEE 802.1as (gPTP) は時刻同期を提供し、IEEE 802.1ae (MACsec) はなりすまし、改ざん、盗聴などの攻撃に対する保護機能を提供します。

目次

1 概要.....2
2 IEEE 802.1as によるレーダーの時間同期.....2
3 MACsec によるレーダー データの保護.....3
4 MACsec と PTP の併用.....4
5 TSN および MACsec 対応 TI イーサネット PHY.....4
6 まとめ.....4
7 参考資料.....5

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 概要

現在道路を走行している自動車の大半は、ドメイン アーキテクチャを採用しています。このアーキテクチャでは、電子制御ユニット (ECU) および関連するケーブルが、パワートレイン、ボディ、インフォテインメント、ADAS といった機能ごとにグループ化されています。自動車業界では、車両内の物理的な位置に応じて機能をグループ化する、ゾーン アーキテクチャへの移行が進んでいます。ゾーン モジュールは、関連領域にあるセンサやアクチュエータを集約し、高速イーサネット バックボーン経由で中央の車載コンピューティング ノードに接続します。このアーキテクチャにより、ECU の数とワイヤ ハーネスの長さを削減できます。また、このアーキテクチャにより、自動車の各機能に対する Over-the-air (OTA) ソフトウェア更新も可能になります。これは、ソフトウェア定義車両 (SDV) の基盤となるものであり、より高いレベルの運転自動化に向けた道筋となります。

このアーキテクチャでは、中央コンピューティングは、イーサネット経由で接続された複数のレーダー センサ、カメラ、および他のセンサからのデータを統合します。これに伴い、次の 2 つの要件が生じます。

1. データはタイミングが合っている必要があります。中央プロセッサは、複数のレーダー、またはカメラや他のセンサからのデータを統合します。統合された結果は、すべての測定値が同じ時刻を示している場合にのみ正確です。これは、すべてのセンサが正確に共通のタイム ベースを共有していることに依存しています。このタイム ベースは、IEEE 802.1as によってイーサネット ネットワーク経由で分配されます。
2. データは信頼できるものでなければなりません。レーダー データは、自動車に配線されたイーサネット ケーブルを通って伝送されます。ブレーキ動作とステアリング操作の決定を下す中央認識スタックは、データが実際のセンサから取得されたものであり、伝送中に変更、リプレイ、または読み取られていないことを検証できる必要があります。IEEE 802.1AE MACsec は、リンク層でこの保護を提供します。

2 IEEE 802.1as によるレーダーの時間同期

レーダーで共有タイム ベースが必要な理由

時間エイリアシングを伴わないセンサ フュージョン:レーダーとカメラにはそれぞれ制限があります。カメラは暗さ、逆光、天候の影響を受けやすいのに対して、レーダーは角度分解能が低く、標識や車線標示を読み取ることができません。この 2 つを統合することで、それぞれの弱点を補えますが、これは両方の測定値が同じ瞬間を示している場合に限られます。30m/s で走行している車両を考えてみましょう。カメラが t = 0 でフレームをキャプチャし、レーダーが t = 10ms でフレームをキャプチャした場合、車両は 2 つの測定の間に 0.3m 移動しています。そのため、統合すると、同じ物体が 2 つの異なる位置に配置されてしまいます。共有時間ベースを使用すると、中央プロセッサは各測定値にタイムスタンプを付与して差異を補正することができます。または、システムが最初からセンサを同時にトリガできます。

レーダー センサ間でのフレーム開始の同期:個々のクロックから動作する複数のレーダー センサは、これらのクロックの間にある 100 万分の 1 (ppm) の差によってドリフトするので、フレームが時間とともに相互にずれていきます。各センサの PHY が IEEE 802.1as の時刻から生成されたフレーム トリガを提供すると、すべてのレーダーは同じネットワーク時刻にチャープ シーケンスを開始します。この動作は、複数のセンサが 1 つのシステムとして機能する場合に便利です。中央 ECU はタイミングの差を補正することなくデータを統合できます。この機能は、分散開口レーダーに不可欠です。

分散開口レーダー:サテライト アーキテクチャの場合、中央 ECU は複数のセンサ ヘッドから取得したデータを統合します。さらなる発展形が分散開口レーダー (DAR) であり、この方式では 2 つ以上の小型レーダー ヘッドを連携して動作させ、はるかに大きい仮想開口部を持つレーダーとして機能させます。これにより、単一のヘッドでは実現できない、微細な角度分解能を実現できます。このためには、ヘッドをナノ秒単位の精度で同期する必要があります。これは、ソフトウェア ベースの同期で達成できるレベルをはるかに超えています。したがって、イーサネットのタイム ベースの品質は、レーダー システムの性能を直接左右する要因となります。分散開口レーダーの詳細については、ZEN-3P-DARSW を参照してください。

IEEE 802.1as の仕組み

IEEE 802.1as (gPTP) は、TSN (Time-Sensitive Networking) 規格の 1 つです。この規格により、イーサネット ネットワーク内のすべてのノードで共通のウォール クロックを共有することができます。1 つのノードがリーダーとして機能し、基準時刻を提供します。各フォロワー ノードは、リーダーとタイムスタンプ付きのメッセージを交換して、2 つのクロック間のずれを修正し、ローカル クロックの周波数ドリフトを修正するとともに、リンクのパス遅延を測定します。達成可能な精度は、タイ

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

ムスタンプ取得の精度によって決まります。gPTP アルゴリズムとタイムスタンプのハンドシェイクの詳細については、「イーサネット PHY によるタイム センシティブ ネットワーキング」を参照してください。

タイムスタンプの取得場所

パケットのタイムスタンプは、PTP ソフトウェア スタック、プロセッサの MAC、または PHY 内で取得できます。ケーブルとタイムスタンプの取得場所との間の変動遅延はすべて、タイミング誤差となります。そのため、タイムスタンプの取得場所がケーブルに近いほど、同期の精度が高くなります。ソフトウェア、フレーム スタート検出、およびハードウェア方式については、「イーサネット トランシーバにおける IEEE 1588 タイム スタンプ機能の実装方法」を参照してください。レーダーなどの ADAS センサでは、タイムスタンプの取得場所として、最高レベルの精度を達成できる PHY が最適です。この方式を使用すると、1 桁のナノ秒レベルの精度を実現できます。これは、分散開口レーダーのようなアプリケーションにおいて不可欠です。

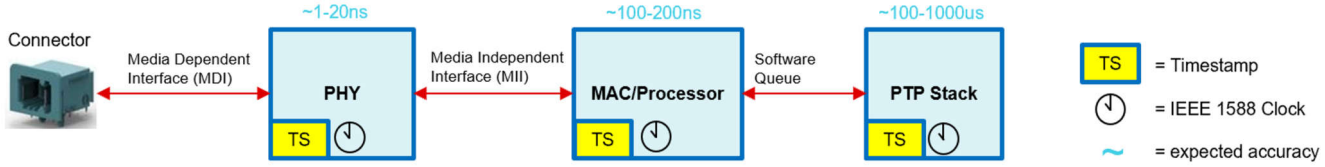


図 2-1. PTP タイムスタンプの取得場所

3 MACsec によるレーダー データの保護

レーダー リンクでセキュリティが必要な理由

先進運転支援システム (ADAS) 内のレーダー センサは安全性が重要です。これらのセンサから提供されるリアルタイムのデータに基づいて、車両は障害物を検出し、安全な車間距離を維持し、緊急ブレーキを作動します。車両がゾーンおよび中央コンピューティング アーキテクチャに移行するにつれて、このデータはイーサネットを経由してセンサから中央プロセッサに伝送されるようになります。つまり、データは車両に配線されたケーブルを通ることとなり、これらのケーブルは車両の底部または前部から物理的にアクセスされる可能性があります。

同時に、現代の車両は、テレマティクス、OTA 更新システム、診断インターフェイスを介して外部と接続されています。これらの接続により、悪意のある攻撃者が利用できる攻撃対象領域が増加します。車内ネットワークにアクセスできた攻撃者は、物理的であれ、遠隔であれ、レーダー データ ストリームを標的にすることができます。

レーダー データに対する脅威

セーフティ クリティカルなデータを伝送するレーダー リンクは、標的となる可能性があります。次の表に、主な攻撃の種類、これらの攻撃による影響、および MACsec が潜在的な各攻撃にどのように対処するかを示します。

表 3-1. レーダー データの脅威と緩和策

脅威	説明	影響	MACsec の保護メカニズム
なりすまし	レーダーではないデバイスから、偽の物体検出フレームを挿入する攻撃	意図しない緊急ブレーキ	認証付き鍵合意。すべてのフレームには、鍵所有者だけが生成できる ICV があります。
リプレイ	「障害物なし」のストリームを記録し、後でそのストリームをリプレイする攻撃	実際の障害物がマスクされる	SecTAG 内のパケット番号。古い番号または番号に重複のあるフレームは破棄されます。
中間者攻撃	障害物ありを障害物なしに、または障害物なしを障害物ありに変更するためにフレームを傍受し、ビットを変更する攻撃	実際の障害物がマスクされる	各フレームでの ICV 完全性チェック。改ざんされたフレームはチェックで不合格となり、破棄されます。
盗聴	ストリームを取得し、センサの機能、分解能、波形をリバース エンジニアリングする攻撃	知的財産の流出	ペイロード暗号化

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

PHY 内の MACsec

IEEE 802.1AE で定義された MACsec は、データ リンク層であるレイヤ 2 で動作します。送信側は、各フレームにセキュリティ タグ (SecTAG) を追加し、完全性チェック値 (ICV) を付加するとともに、ペイロードを暗号化します。受信側は、SecTAG と ICV を検証し、チェックが不合格の場合はフレームを破棄し、合格の場合はフレームを復号します。送信側と受信側は、IEEE 802.1X で定義された MACsec 鍵合意 (MKA) プロトコルに基づいて鍵を確立します。MACsec の動作、フレーム形式、および主要な用語の詳細な説明については、「MACsec を活用した車載イーサネット データの機密性と完全性の強化」を参照してください。

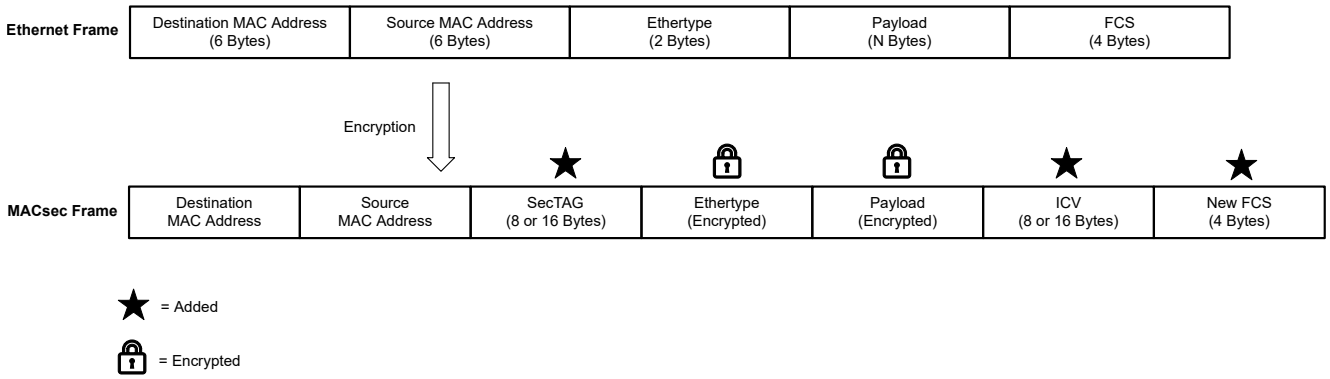


図 3-1. MACsec イーサネット フレーム

4 MACsec と PTP の併用

MACsec と IEEE 802.1AS を同じリンク上で使用できるため、レーダー リンクで安全なデータと正確なタイム ベースの両方を確保できます。DP83TC817-Q1 と DP83TC818-Q1 は、IEEE 802.1as ハードウェア タイムスタンプ機能と IEEE 802.1ae MACsec を 1 つの PHY 内に統合しています。MACsec は必要ないもののタイミング処理が必要なリンク向けに、DP83TC815-Q1、DP83TC816-Q1、DP83TG721-Q1 は IEEE 802.1as ハードウェア タイムスタンプ機能を提供します。

5 TSN および MACsec 対応 TI イーサネット PHY

TI は、次の表に示すように、100Mbps と 1000Mbps の両方に対応する IEEE 802.1as ハードウェア タイムスタンプ機能と IEEE 802.1ae MACsec を備えたシングル ペア イーサネット PHY を提供しています。

表 5-1. TI 製品

デバイス	速度	IEEE 802.1as	MACsec	AVB クロック
DP83TC815-Q1	100Mbps	対応	非対応	非対応
DP83TC816-Q1	100Mbps	対応	非対応	対応
DP83TC817-Q1	100Mbps	対応	対応	非対応
DP83TC818-Q1	100Mbps	対応	対応	対応
DP83TG721-Q1	1Gbps	対応	非対応	対応

6 まとめ

ゾーンおよび中央コンピューティングへの移行により、イーサネット リンクはレーダー測定チェーンの一部になります。ナノ秒単位の精度を持つ共有のタイム ベースにより、車両は時間エイリアシングなしで他のセンサとレーダーを統合し、同じネットワーク時間で複数のレーダーのフレームを開始できるほか、分散開口レーダーを実現できます。PHY でのタイムスタンプでは、MAC、プロセッサ、およびオペレーティング システムのレイテンシの変動が除外されるため、最も高い精度が得られます。

同じリンクを保護する必要があります。MACsec は、ライン レートでの認証、リプレイ保護、完全性の確保、暗号化を提供します。これらの機能は、レーダー ストリームのなりすまし、リプレイ、改ざん、盗聴に対処します。DP83TC817-Q1 と DP83TC818-Q1 は、IEEE 802.1as と MACsec を 1 つの PHY で統合しているため、100BASE-T1 レーダー リンクは時間同期とセキュリティの両方を確保できます。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

7 参考資料

1. テキサス・インスツルメンツ、「車載用途で最新のサテライト レーダー アーキテクチャを導入する準備はできていますか？」、技術記事。
2. テキサス・インスツルメンツ、「DP83TC815-Q1 100Base-T1 車載用イーサネット PHY トランシーバ、IEEE802.1AS および TC10 スリープ - ウェーク付」、データシート。
3. テキサス・インスツルメンツ、「DP83TC816-Q1 100Base-T1 車載用イーサネット PHY トランシーバ、IEEE802.1AS、AVB クロックおよび TC10 スリープ - ウェーク付」、データシート。
4. テキサス・インスツルメンツ、「DP83TC817S-Q1、IEEE802.1AE MACsec、IEEE802.1AS および TC10 スリープウェイク対応、高精度でセキュアな 100BASE-T1 車載用イーサネット」、データシート。
5. テキサス・インスツルメンツ、「DP83TC818S-Q1、AVB クロック生成機能、IEEE802.1AE MACsec、IEEE802.1AS および TC10 スリープウェイク対応、高精度でセキュアな 100BASE-T1 車載用イーサネット」、データシート。
6. テキサス・インスツルメンツ、「DP83TG721x-Q1、高度な TSN および AVB 対応 1000BASE-T1 車載イーサネット PHY」、データシート。
7. テキサス・インスツルメンツ、「MACsec を活用した車載イーサネット データの機密性と完全性の強化」、技術ホワイト ペーパー。
8. テキサス・インスツルメンツ、「ハードウェア同期機能を搭載したイーサネット PHY は車載レーダーの距離延長に貢献」、技術記事。
9. テキサス・インスツルメンツ、「イーサネット トランシーバにおける IEEE 1588 タイム スタンプ機能の実装方法」、技術記事。
10. テキサス・インスツルメンツ、「ゾーン アーキテクチャによって実現する完全なソフトウェア定義の自動車」、ホワイト ペーパー。
11. テキサス・インスツルメンツ、「イーサネット PHY によるタイム センシティブ ネットワーキング」、技術ホワイト ペーパー。
12. Zendar、「ZEN-3P-DARSW - Zendar の分散開口レーダー | コヒーレント センサ ネットワークを採用した高分解能レーダー」、ツール。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、 TI の販売条件 、 TI の総合的な品質ガイドライン 、 ti.com または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。 TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月