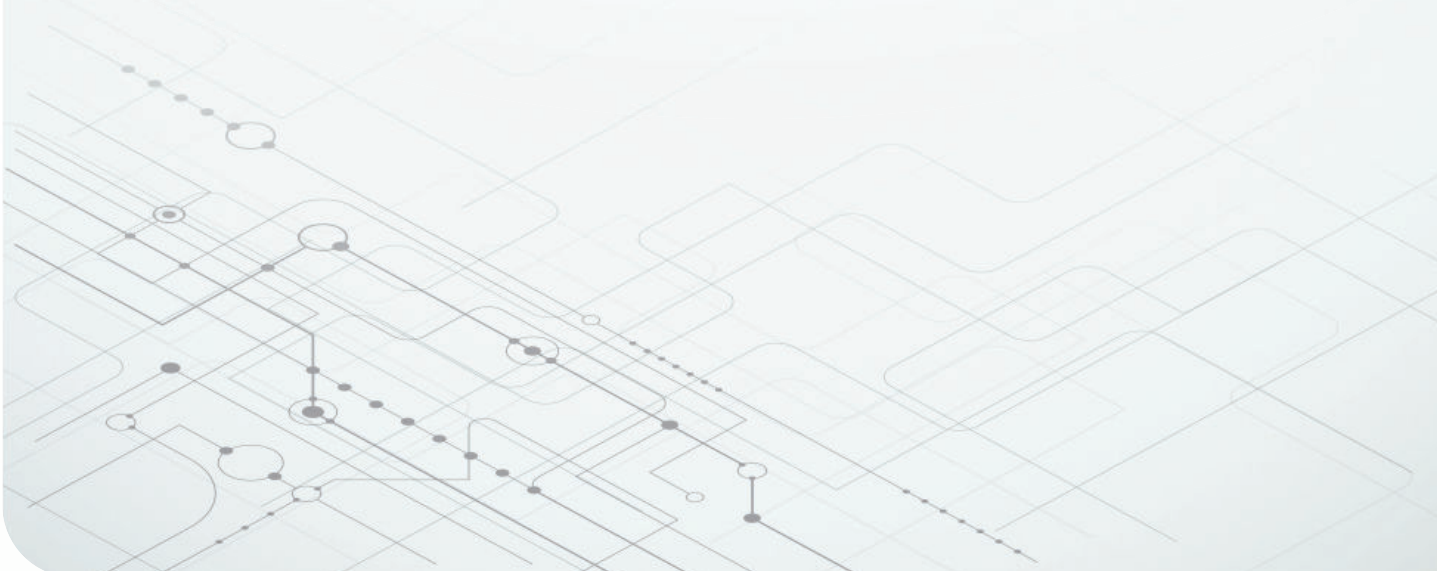


車載ゾーン アーキテクチャにおける TSN:イーサネット リング アーキテクチャ と AVB 分散オーディオの有効化



Madison Ecklund
Systems Manager
Body Electronics & Lighting

Kate Hawkins
Systems Engineer
Body Electronics & Lighting



概要



1

リアルタイム制御とタイム センシティブ データの有効化

TSN が車両のネットワークの信頼性をどのように向上させるかをご覧ください。



2

イーサネット リング アーキテクチャの実装

MCU ベースの様々なイーサネット リング設計を検証します。



3

AVB を使用してイーサネット バックボーンにオーディオ再生機能を追加

AVB 冗長性により、ゾーンを通過するデータを増やす仕組みをご覧ください。



4

ゾーン アーキテクチャ内でのオーディオ

車両が 4 種類のオーディオ データをどのように処理するかを理解します。

はじめに

自動車メーカー各社は、冗長性を実現するイーサネット リング アーキテクチャや、タイム センシティブ データを確実に配信するためのタイム センシティブ ネットワーク (TSN) やオーディオ ビデオ ブリッジング (AVB) などの新しいトレンドを取り入れて、車内の高速イーサネット バックボーンの進化に取り組んでいます。

業界では、安全性と時間的制約が極めて重要なデータを車両全体に伝送するために、より広帯域で高速な通信ネットワークを必要としています。次世代ゾーン アーキテクチャでは、冗長性を確保するためにイーサネット リング アーキテクチャを検討するとともに、オーディオを含む配線ハーネスを削減するために、イーサネット バックボーンにより多くのデータタイプを追加することが検討されています。

ゾーン アーキテクチャは、ゾーン制御モジュール (ZCM) を活用し、エッジ ノード通信ネットワークを介してさまざまなセンサーや電子制御ユニット (ECU) からのデータを転送します。これらの ZCM は、図 1 に示すように、バックボーン通信を介して統合されたセンサーデータを中央演算装置 (CCU) に転送します。

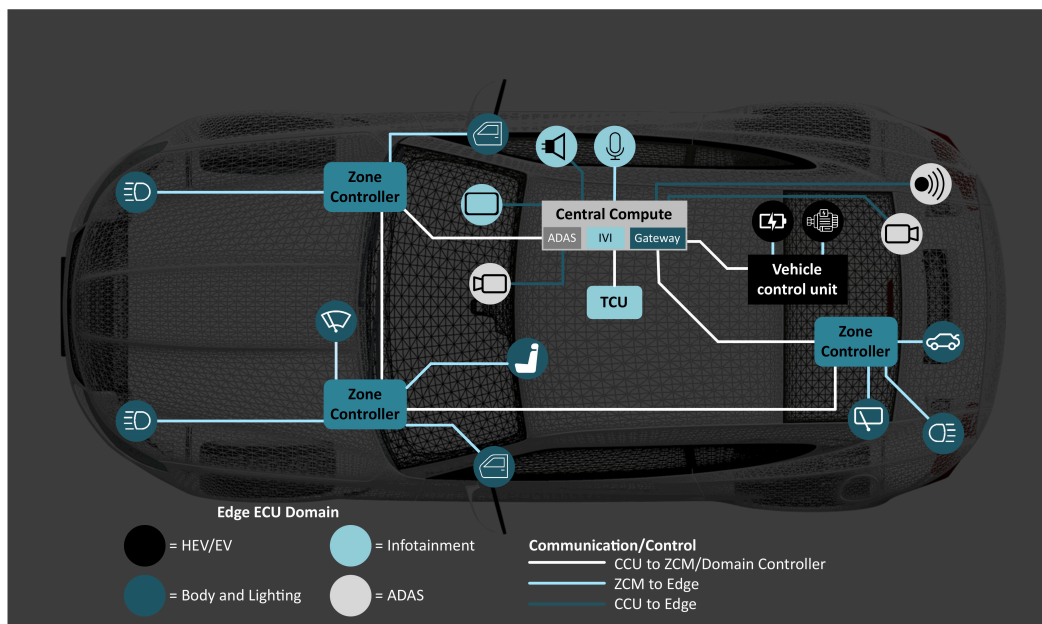


図1. ゾーンアーキテクチャ向け車載ネットワーク

イーサネットリングアーキテクチャは、既存の高帯域イーサネットバックボーンを基盤とし、リング内の各ノードを他の2つのノードに接続することで冗長性を実現します。データは時計回りと反時計回りの両方向に伝送できるため、イーサネットリンクが切断された場合でも、CCUはZCMとの通信を継続できます。

車両ネットワークの帯域幅を拡張することで、オーディオ、レーダー、カメラデータなどの追加データをイーサネットバックボーン経由で転送できるようになります。自動車メーカーは、ゾーンアーキテクチャへの移行にあたり、当初は主に車体機能をゾーンに統合していましたが、理想的なゾーンアーキテクチャは、クロスドメインアプリケーションを組み込むことです。オーディオは、オーディオデータに確定的なレイテンシを提供するAVB規格のため、主要なターゲットです。オーディオ再生をZCMに移行することで、イーサネット経由でオーディオデータを送信できるため、別途通信バスを用意する必要がなくなります。

リアルタイム制御とタイムセンシティブデータの有効化

TSNは、イーサネットネットワーク上でタイムセンシティブデータの同期を保証します。タイムセンシティブデータを追加し、車両ネットワーク上でリアルタイム制御を可能にすることで、CCUとゾーン間的高速通信リンクを維持するための信頼性要件が高まります。そのため、イーサネットリングアーキテクチャが提供する冗長性サポートは、Ethernet AVBを含むTSNアプリケーションに有益です。ただし、リングアーキテクチャはTSNの必須要件ではなく、その逆も同様です。

TSNの定義を含むプロトコルはいくつかあります

- IEEE (Institute for Electrical and Electronics Engineers: 米国電気電子学会) 802.1AS – gPTP (Generalized Precision Time Protocol: 一般化精密時間プロトコル) は、確定的なレイテンシ、パケット遅延変動の低減、パケット損失の低減を実現するデータ同期を提供します。
- IEEE 802.1Qbv – トラフィックスケジューリングの拡張。
- IEEE 802.1Qav – AVBのサポート。

TSN はイーサネットリングアーキテクチャには必須ではありませんが、低くかつ確定的なレイテンシの実現に役立ちます。IEEE 802.1AS は、ミリ秒からナノ秒単位の精度でデータ同期を行う方法を定義しています。この精度レベルは、パケット処理および伝送プロセス中のレイテンシを相殺するための調整とタイミング補償を適用することで、イーサネットリングアーキテクチャの利点になっています。さらに、IEEE 802.1Qbv はスケジュールされたトラフィック拡張機能をサポートしており、イーサネットバックボーンデータの優先順位付けと管理に役立ちます。

TSN は、径路遅延が変動する場合でも、車内のさまざまな場所で同期したオーディオ再生を保証するため、オーディオデータには不可欠です。IEEE 802.1Qav は、イーサネット経由でオーディオおよびビデオデータを送信するための AVB サポートを定義します。

イーサネットポロジ:リング型とスター型の比較

第一世代のゾーンアーキテクチャの多くはスター型ポロジを採用しており、ポイントツーポイントのイーサネットで CCU と各 ZCM を接続します。したがって、各 ZCM 間の通信は CCU を介して行われるか、右側の ZCM から左側の ZCM へのゾーン間直接通信のために、追加のポイントツーポイントイーサネット接続を介して行われます。一方、リング型ポロジでは、すべてのノードがループ状に接続され、データはループ内を時計回りと反時計回りの両方向に流れます。図 2 はリング型ポロジとスター型ポロジを比較しています。

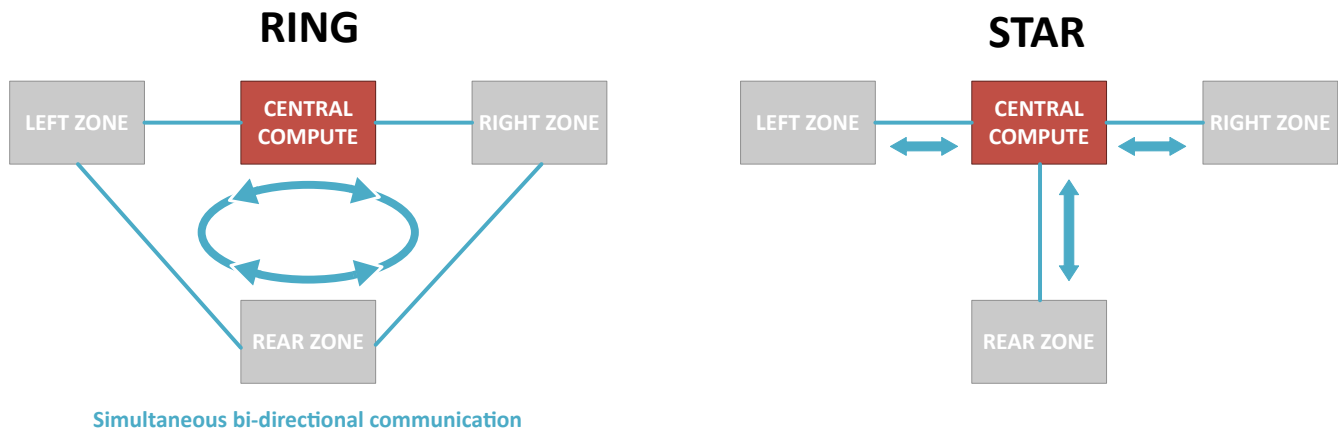
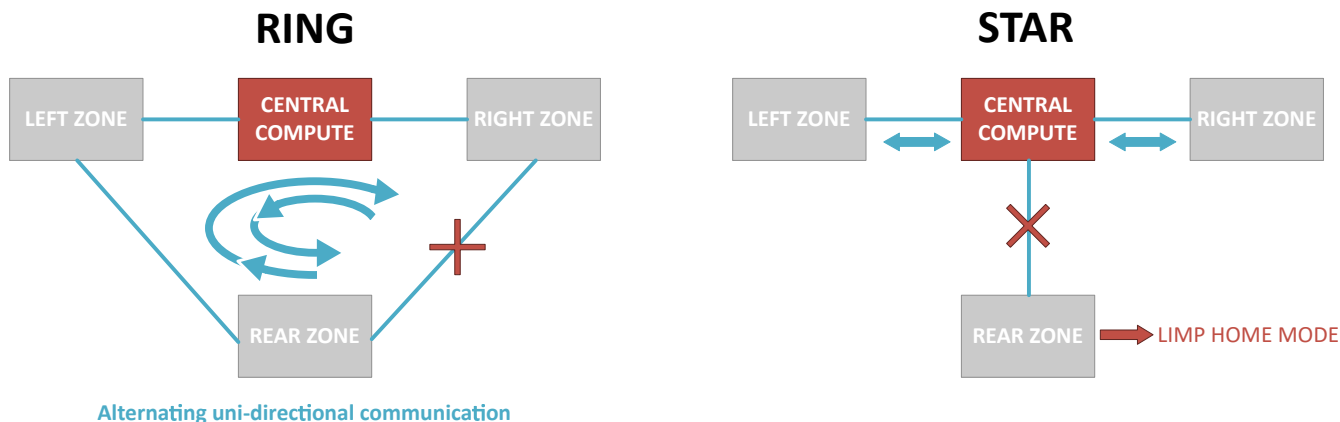


図 2. 通常動作時のリング型通経路信とスター型通信経路の比較

図 3 は、イーサネットリンクに障害が発生した場合の両トポロジーを示しています。リング型トポロジーは、単方向イーサネットを交互に使用することで、すべてのゾーンへの通信を維持します。さらに、両方向に同時にデータを送信することで切り替え時間を短縮します。そのため、一方の経路に障害が発生しても、データは遅延なく反対方向に流れ続けます。これは、ECU 間での安全性が重要なデータ伝送において不可欠です。スター型トポロジーネットワークでイーサネット接続が切断されると、ZCM とのすべての通信が直ちに停止し、保護モードに移行して、事前定義された安全状態にデフォルト設定されます。



Alternating uni-directional communication

図3. イーサネット接続が失われた場合のリング型通信経路とスター型通信経路の比較

イーサネットリングアーキテクチャは本質的に冗長性を備えています。スター型アーキテクチャでは、図4に示すように、同等の保護を実現するために追加の通信リンクが必要です。各ECUにイーサネットやコントローラエリアネットワーク(CAN)などの通信リンクを重複して追加すると、システムのコストと重量が増加します。

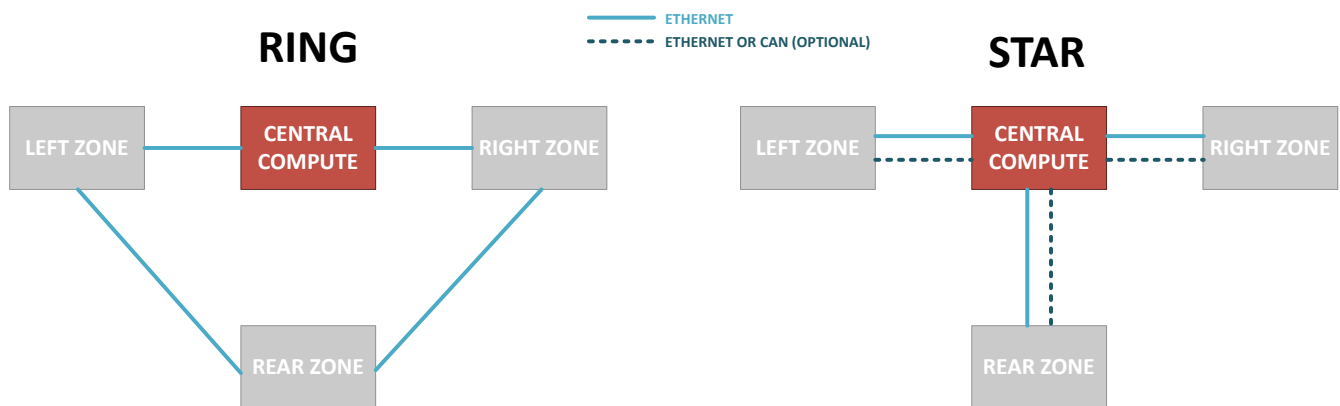
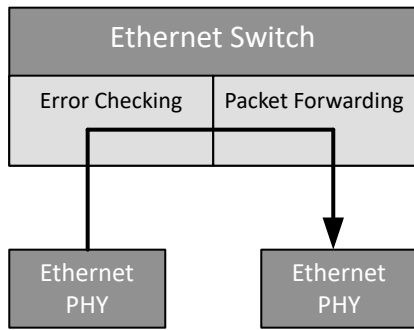


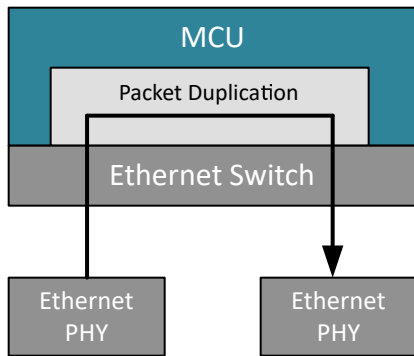
図4. リング型トポロジとスター型トポロジの冗長性の比較

イーサネットリングアーキテクチャの欠点の1つは、ECU間のノード数の増加によって発生する遅延の増加です。例えば、4ノードのイーサネットリングアーキテクチャでは、3ノードの場合よりもエンドツーエンドのレイテンシが大きくなります。このレイテンシの増加は、図5に示すように、各ECUのスイッチにおけるパケット残留レイテンシと、パケット複製のためのソフトウェアレイテンシ遅延によって発生します。



A

Packet Residual Delay:
The time it takes for an Ethernet packet to travel through the switch due to error checking and packet forwarding logic



B

SW Latency for Packet Duplication:
The time it takes for an Ethernet packet to be duplicated through software

図5. ソフトウェアにおけるパケット残存遅延とパケット重複

表1 は、追加レイテンシを計算します。

パケットの長さ	スイッチにおけるパケット残留遅延 (A)	パケット重複によるソフトウェアレイテンシ (B)
64 バイト	1.8μs	10μs
256 バイト	3.2μs	10μs
512 バイト	5.2μs	15μs
1,518 バイト	13.2μs	25μs

表1. ソフトウェアにおける残留パケットレイテンシとパケット重複によるイーサネットリングレイテンシ

表1 は、2,000 パケット / 秒 (PPS)、1Gbps イーサネット、400MHz CPU 動作 (コア 1 個、負荷率 60% 未満) を想定しています。

式1 は、イーサネットリングアーキテクチャのエンドツーエンドレイテンシを表します。

$$\text{EndtoEndLatency} = (2A) + (A \cdot \text{No. of nodes}) + B \quad (1)$$

A はスイッチにおけるパケット残留遅延、B はパケット複製のためのソフトウェアレイテンシです。

イーサネット リング アーキテクチャの実装

イーサネット リングの実装には、ノードごとにマイコン (MCU)、イーサネット スイッチ、および 2 つのイーサネット物理層 (PHY) が必要です。MCU はデータの 캡セル化と 캡セル化解除を行い、他のデータ パケットをイーサネット パケットに変換し、その逆も行います。イーサネットスイッチは、IEEE 802.1cb で定義されているパケット転送、複製、リング終端、重複パケット拒否のためのハードウェア オフロード サポートを提供します (ハードウェア サポートが利用できない場合はソフトウェア経由)。現在、[図 6](#) に示すように 3 つの異なる実装オプションが存在します。

- 外部イーサネットスイッチと外部イーサネット PHY を搭載した MCU。
- 統合型イーサネット スイッチと外部イーサネット PHY を搭載した MCU。
- 統合型イーサネット PHY を備えた外部イーサネット スイッチを搭載した MCU (外部 PHY と統合型 PHY を組み合わせて使用することも可能です)。

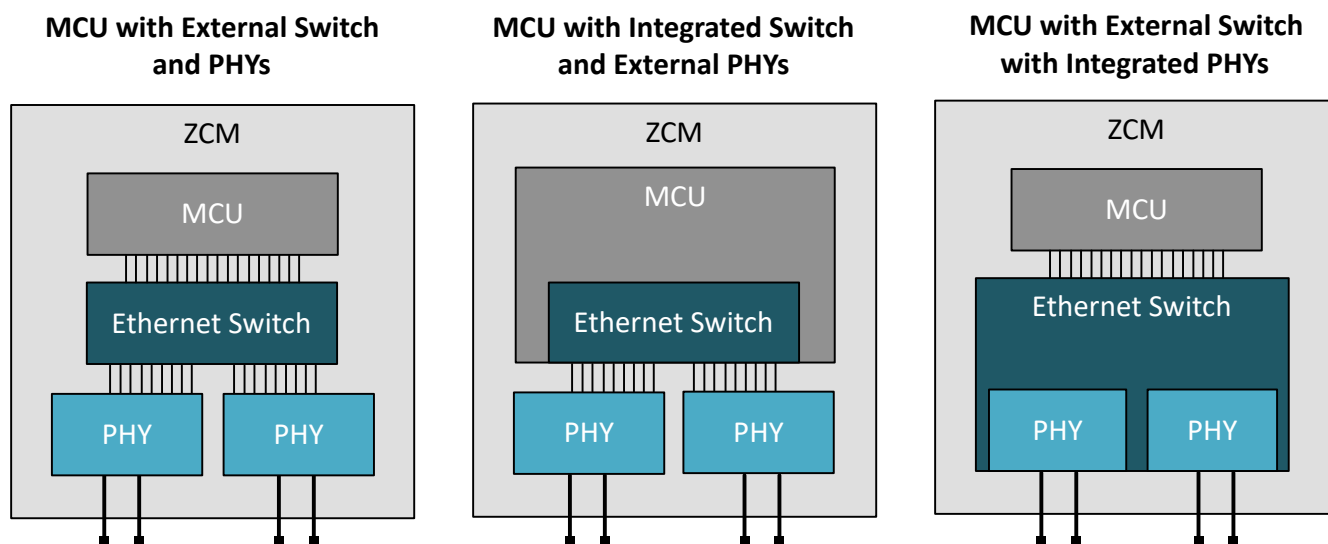


図 6. イーサネット リングのハードウェア実装オプション

各種のハードウェア実装の中から選択する際には、コスト、アプリケーション、レイテンシを考慮してください。統合型スイッチは、通常、外付けスイッチよりも安価です。ゾーン コントローラは、ZCM、CCU、レーダー モジュールなどの他の高速 ECU と通信するために、通常 5 つ以下のイーサネット接続のみを必要とします。多くのイーサネット スイッチは 8 つ以上のポートを備えているため、必要なポートが 5 つ以下の場合にはシステムコストが増加します。

IEEE 802.1cb などの高度なプロトコルを処理するための専用ハードウェアを備えたイーサネット スイッチ (統合型または外付け型) は、ソフトウェア実装と比較してレイテンシを大幅に削減します。ソフトウェア実装では約 20 μ s のレイテンシが追加されます。IEEE 802.1Qbv 対応スイッチは、優先順位を考慮しトラフィック スケジューリングを強化することで、レイテンシをさらに最適化します。CPSW (Common Platform Switch: 共通プラットフォーム スイッチ)、IEEE 802.1Qbv および IEEE 802.1cb と同様の機能をサポートするさまざまな MCU を提供しています。

[図 7](#) に、テキサス インストルメンツの MCU AM263P4-Q1、統合 CPSW、および外部 イーサネット PHY を使用した イーサネット リング実装を示します。

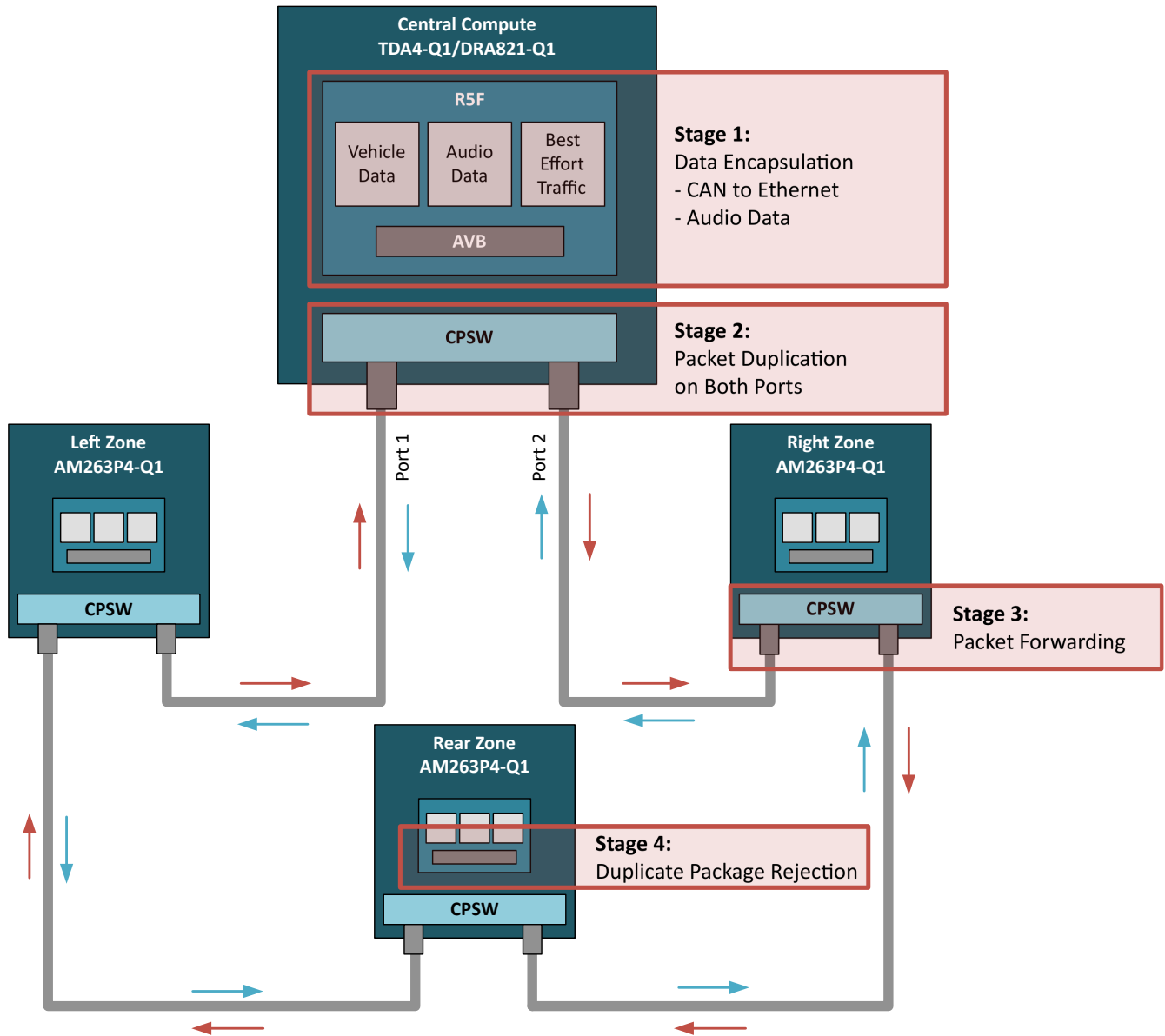


図 7. AM263P4-Q1 を使用したイーサネット リングの実装

イーサネット リングの実装プロセスは、ステージ 1 に示すように、MCU 内のデータカプセル化から始まります。このデータには、CAN、Local Interconnect Network (ローカル相互接続ネットワーク)、その他の車載インターフェースからの高優先度車両データ、オーディオデータ、ベスト エフォートトラフィックが含まれます。ステージ 2 では、システムは両方のイーサネット ポートでパケットを複製し、スイッチの機能に応じてソフトウェアまたはハードウェアを使用して、時計回りまたは反時計回りの方向にデータを送信します。AM263P4-Q1 は、これをハードウェアで実行できます。

ステージ 3 では、ノードが PHY の MAC アドレスと一致しない宛先メディアアクセス制御 (MAC) アドレスを持つデータを受信した場合、イーサネット スイッチはパケットをリング内の次のノードに転送します。ステージ 4 では、宛先ノードがソフトウェアまたはハードウェアによって重複パケットを破棄し、ZCM が両方向から到着する同一パケットを処理できないようにします。リング終端は重複パケット拒否と連携して機能し、リング内で冗長フレームが無限に循環するのを防ぎます。

テキサス インストルメンツの AM263P4-Q1 MCU は、CPSW がハードウェアでパケット複製を実装し、1Gbps イーサネットでエンドツーエンドのレイテンシを最大 69 μ s 削減するため、イーサネットリング アプリケーションに最適です。表 2 は、1 秒あたり 10,000 パケットと 1,500 バイトのペイロードを想定し、ソフトウェアとハードウェアのパケット複製に基づいて各ステージのレイテンシを比較します。

段階	ソフトウェアまたはハードウェア	ソフトウェアのステージ 2 でのレイテンシー		ハードウェアのステージ 2 でのレイテンシ	
		平均的	最大	平均的	最大
ステージ 1	ソフトウェア	23 μ s	122 μ s	23 μ s	122 μ s
ステージ 2	ソフトウェアまたはハードウェア	16μs	79μs	10μs	
ステージ 3	ハードウェア	10 μ s			
ステージ 4	ソフトウェア	25 μ s			

表 2. ソフトウェアとハードウェアのパケット重複によるレイテンシ

AVB によるイーサネット バックボーンへのオーディオ再生機能の追加

AVB にはリング アーキテクチャは必要ではありませんが、リング アーキテクチャが提供する冗長性により、より多くのデータが ZCM を安全に通過できるようになります。AVB は TSN に先行し、特にオーディオ アプリケーションに重点を置いていましたが、その後、より広範な TSN データタイプに対応するために TSN に拡張されました。現在、AVB は、オーディオ パケットをイーサネット経由で送信することで、ゾーン全体にオーディオ再生を分散させるオーディオ専用の TSN アプリケーションを意味指します。主要な AVB プロトコルは次のとおりです。

- IEEE 802.1BA – アーキテクチャとプロファイルのための AVB フレームワーク。
- IEEE 802.1Qav – 時間依存ネットワーク向けの AVB トラフィック スケジューリング。
- IEEE 1722 – AVB トランスポート プロトコル。

オーディオ再生では、設定されたサンプル レートでオーディオ データをオーディオ アンプに配信する必要があります。複数のゾーンで同時にオーディオを再生するには、位相ずれに関連するオーディオ忠実度の問題を回避するために、各ゾーンで時間調整を維持する必要があります。AVB は、イーサネット ネットワークにおけるさまざまなパケット レイテンシを補正することで、ZCM 間で一貫したタイミングを合されたオーディオの再生を可能にします。

ゾーン アーキテクチャ内でのオーディオ

車両は通常、4 種類のオーディオ データを処理します。

- ハンズフリー通話用のマイクによる音声キャプチャ。
- アクティブ ノイズ キャンセレーション (ANC) 用の道路センサーまたはマイクによるノイズ キャプチャ。
- インフォテインメントおよび ANC 用の車内スピーカーでのオーディオ再生。
- ハイブリッド車および電気自動車の音響車両警報システム用車外スピーカーでのオーディオ再生。

現在の一般的なオーディオ ソリューションは、車内全体にデータを送信するために、専用のオーディオバスまたはアナログ信号を使用しています。イーサネット AVB は、既存のイーサネット バックボーンを使用して CCU からゾーンにオーディオ再生データを送信することで、配線を削減する非専用ソリューションです。車内スピーカーでのオーディオ再生は、イーサネット バスでの使用に初めて採用されたオーディオデータで、図 8 は実装方法を示しています。

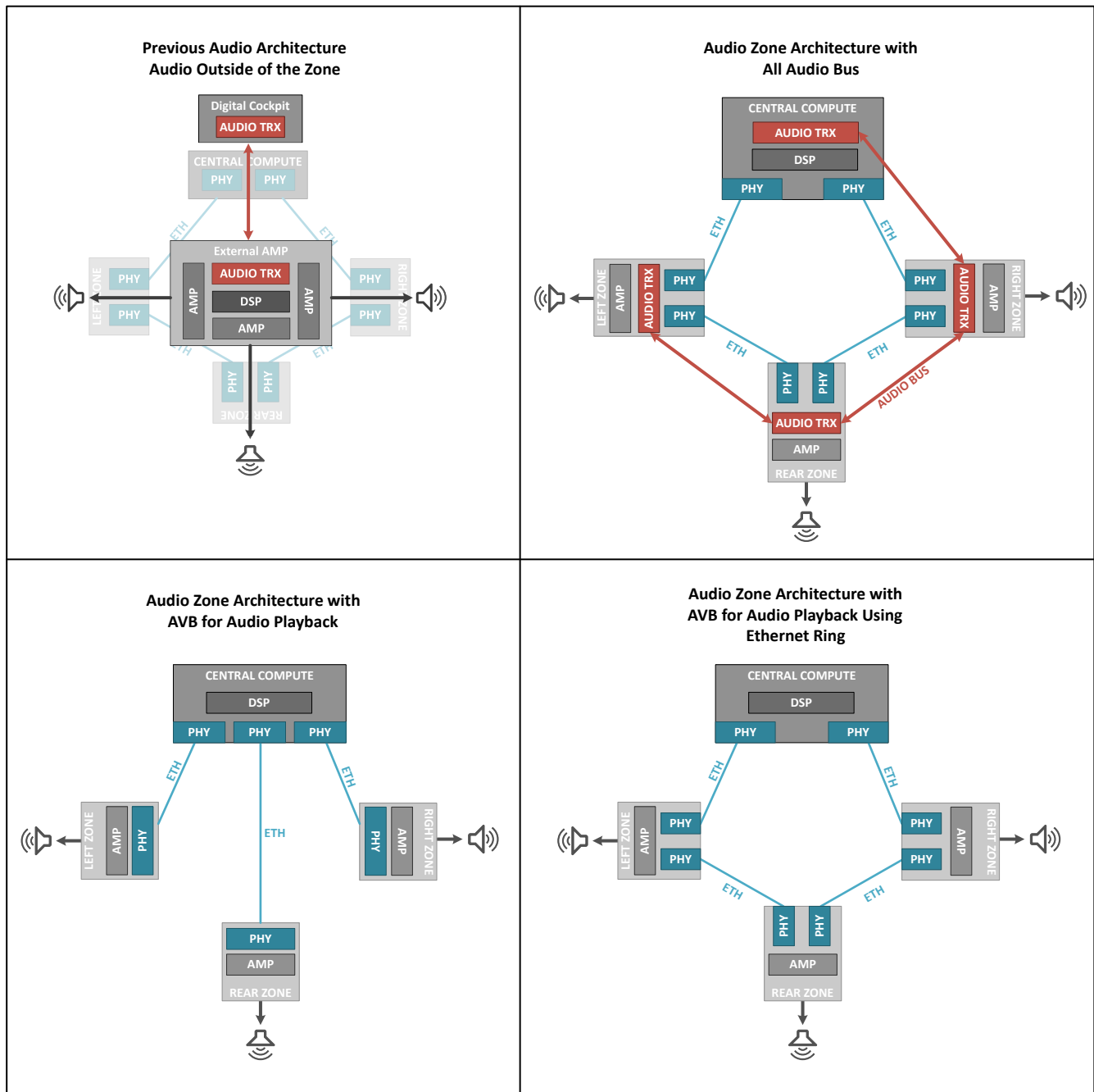


図 8. 4 種類のオーディオ再生ソリューションの可能性

図 8 の最初の例は、車両アーキテクチャに依存しない従来のオーディオ バス ネットワークを表しています。すべてのサウンド キャプチャ データは、デジタル オーディオ バスを介して伝送されます。CCU またはデジタル コックピット ECU がインフォテインメント オーディオ データを処理し、外部アンプ モジュールがデジタル信号処理とスピーカー出力を管理します。このアーキテクチャの主な欠点は、外部アンプモジュールからスピーカーまでの配線が長くなることです。

図 8 の 2 番目の図は、独立したオーディオ バスを使用したゾーン アーキテクチャにおけるオーディオ実装を示しています。サウンド キャプチャ データは、引き続きデジタル オーディオ バスを介して CCU に送信され、そこでデジタル信号処理が行われます。その後、オーディオ再生データは CCU からデジタル オーディオ バスを介して ZCM に送信され、増幅されてスピーカーに出力され

ます。このアプローチでは、オーディオ アンプの位置によってスピーカーの配線長が短縮されますが、オーディオ バスははるかに複雑になります。

図 8 の 3 番目と 4 番目の図は、AVB オーディオ再生の実装を示しています。デジタル信号処理は引き続き CCU で行われますが、オーディオ再生はイーサネットを介して伝送されます。これはスター型とリング型のトポロジーで機能しますが、リング型トポロジーではオーディオ データの冗長性が向上します。このアプローチは、スピーカー ケーブルを短く保ちながらオーディオ バスを簡素化します。

ZCM への AVB の実装

イーサネット ネットワークには通常、MCU、イーサネット スイッチ、イーサネット PHY が含まれ、多くの場合これらが統合されています。これらのコンポーネントは、以下の方法でメディアクロック同期 (図 9) を実現します。

- イーサネット MAC。
- イーサネット PHY。
- IEEE802.1AS (gPTP)。
- IEEE1722 メディア クロック リカバリ。
- メディア クロック生成。

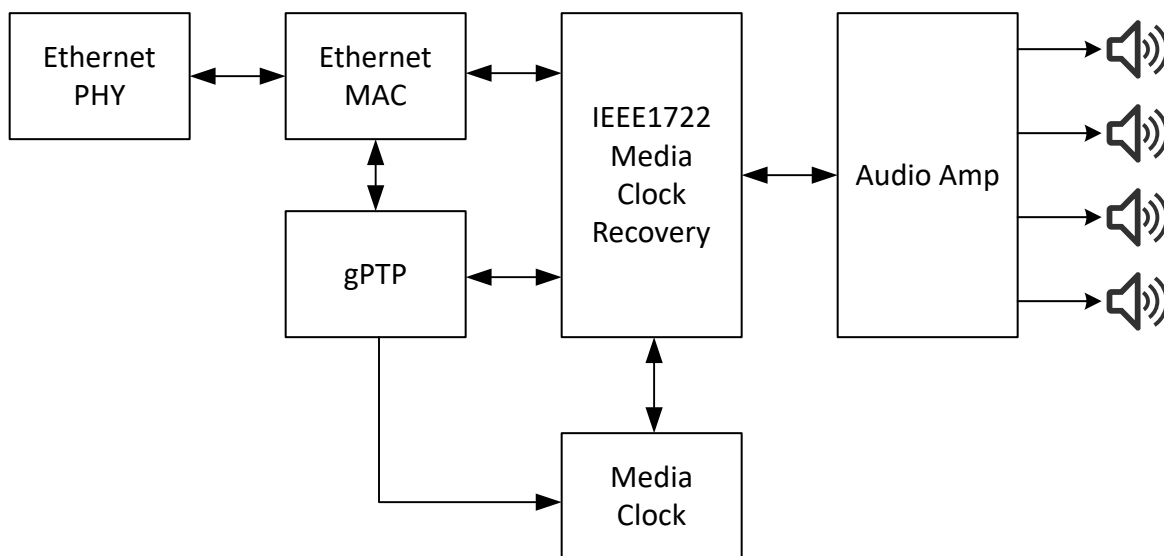


図 9. メディア クロック同期ソリューションの図

イーサネット PHY は、イーサネット パケットの送受信を担います。イーサネット MAC は、パケットをカプセル化およびカプセル化解除によってデータ転送を管理します。gPTP プロトコルは、すべてのネットワーク デバイス間でローカル クロックを同期させ、一貫したタイムベースを維持します。IEEE 1722 メディア クロック リカバリは、イーサネット パケットに埋め込まれたタイミング情報を使用して、オーディオ メディア クロック (フレーム同期と呼ばれるオーディオ サンプル クロック (FSYNC) とオーディオ データシリアルライザ ビット クロック (SCLK)) を調整します。

図 10 に、AVB 実装における可能なコンポーネント構成を示します。

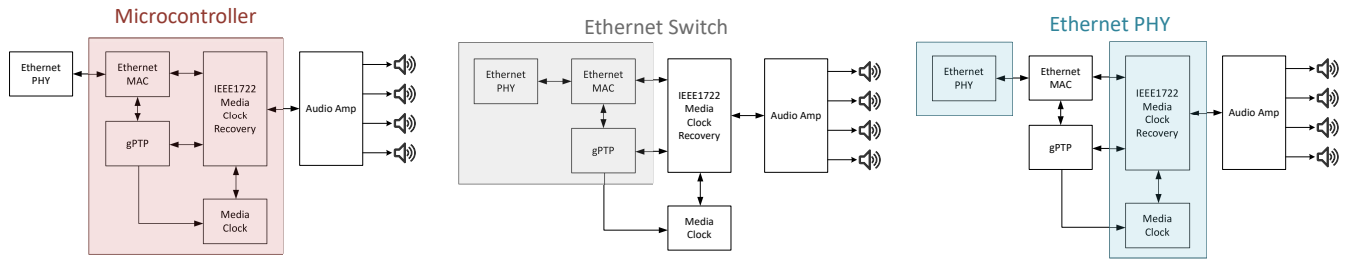


図 10. MCU、イーサネット スイッチ、イーサネット PHY におけるメディア クロック同期の実現

テキサス インストルメンツのソリューションは、メディア クロック リカバリ機能を内蔵した DP83TG721-Q1 を使用し、入カイーサネット ストリームに基づいてローカル メディア クロックを再同期します。PHY は、オーディオ サンプル レート用のメディア クロック (FSYNC) とビット クロック (SCLK) をハードウェアで生成します。PHY ハードウェアは、オーディオ パケットのプレゼンテーション タイム処理も管理します。AM263P4-Q1 MCU は、プログラマブル リアルタイム ユニットの介して I²S オーディオ データをエミュレートし、TAS6754-Q1 オーディオアンプと通信します。図 11 にこのソリューションをに示します。

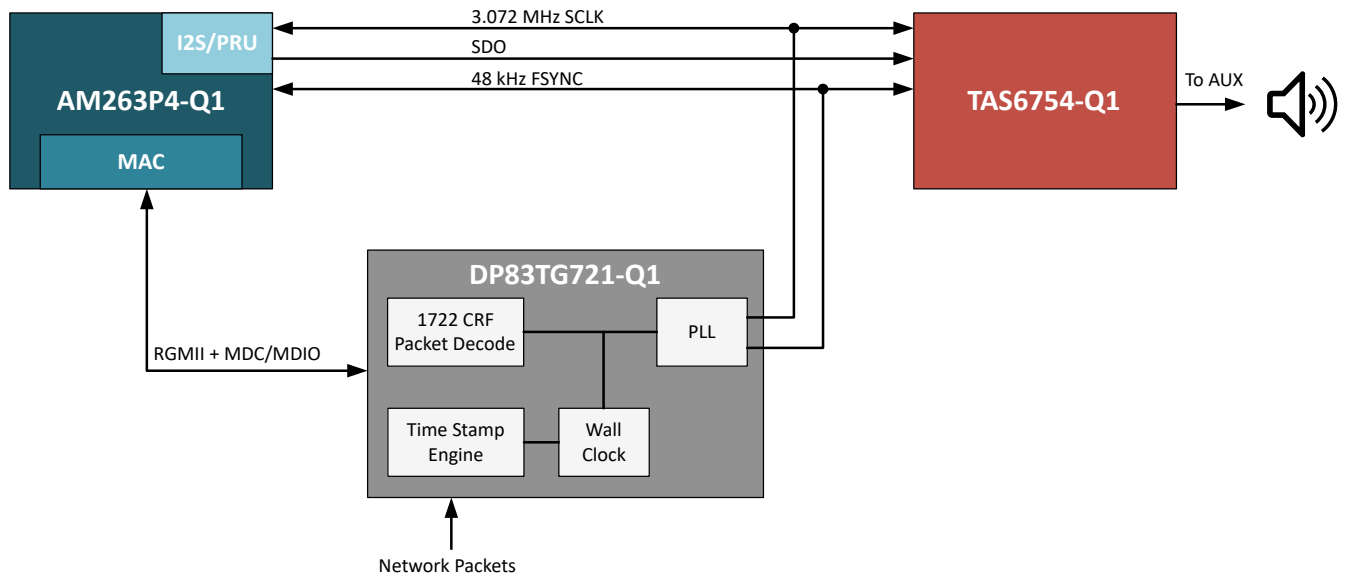


図 11. AM263P4-Q1、DP83TG721-Q1、TAS6754-Q1 を使用した AVB ソリューション

表 3 に、イーサネットリングアーキテクチャと AVB のプロトコルを一覧表示します。

プロトコル	説明
IEEE802.1AS	ローカル クロックとグランドマスター クロック (gPTP) の同期を定義します
IEEE802.1Qav	TSN 向け AVB スタックとトラフィック スケジューリング
IEEE1588	タイム スタンプ付きメッセージの双方向交換 精度時間プロトコル 最適なマスター クロック アルゴリズム
IEEE802.1Qbv	トラフィック スケジューリングの拡張
IEEE802.1cb	パケット複製 パケット転送 重複パッケージの拒否 リング終端
IEEE1722	メディア クロック リカバリのための AVB トランスポート プロトコル

表 3. イーサネット リング アーキテクチャと AVB のプロトコルの一覧

まとめ

自動車メーカーが集中型アーキテクチャに移行するにつれ、信頼性、効率性、拡張性に優れたネットワーク アーキテクチャの重要性が高まっています。イーサネット リング アーキテクチャを実装することで、ZCM と CCU 間の冗長データ ストリームが提供され、車両の信頼性が向上します。さらに、TSN は、AVB 経由のオーディオを含む多様なデータ ストリームをイーサネット バックボーンに統合することを可能にし、ネットワーク配線コストを最適化します。

その他の資料

- TSN とその他のアプリケーションの詳細については、テクニカルホワイトペーパー「[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](#)」をご覧ください。
- [Arm Cortex-R MCU](#) ページと、[イーサネット ICs](#) ページの車載イーサネット PHY オプションをご覧ください。
- ビデオ「[車載イーサネット リング ネットワークのデモ](#)」をご覧ください。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

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、

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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月