



AN-1482 アプリケーション・ノート

TSN ネットワークの例

筆者: Volker E. Goller

はじめに

タイム・センシティブ・ネットワーキング (TSN) 評価用キットを使用すると、既存のイーサネット・デバイスを TSN ネットワークに接続できます。このようなネットワークでは、複数の **TSN 評価用キット** で純粋なライン・トポロジを構成するのが最も簡単です。

ただし、他のベンダーの TSN ソリューションでも、同じ機能セットに対応すれば、キットは連動します。現在、このキットは 802.1Qbv (スケジュールされたトラフィック) と 802.1AS (クロック同期) をサポートしています。

このキットには、3 つのイーサネット・ポートがあります (図 1 参照)。EtherNet/IP、PROFINET RT、ModbusTCP、BACnet IP、

その他の IP ベースのプロトコル (PROFINET IRT、EtherCAT、SERCOS、POWERLINK を除く) を実行するデバイスを含む、ほぼすべての標準イーサネット・デバイスをサポートしています。

このアプリケーション・ノートでは、アナログ・デバイセズ TSN 評価用キット (この文書では TSN キットと表記) のユーザーに、TSN ネットワークの設定と実行に必要なプロセスを説明することを目的としています。

このアプリケーション・ノートは、TSN キット技術文書を置き換えるものではありません。TSN Evaluation Kit Quick Start Guide および fido5100/fido5200 Real-Time Ethernet Multiprotocol (REM) Switch と一緒にこのアプリケーション・ノートを使用してください。

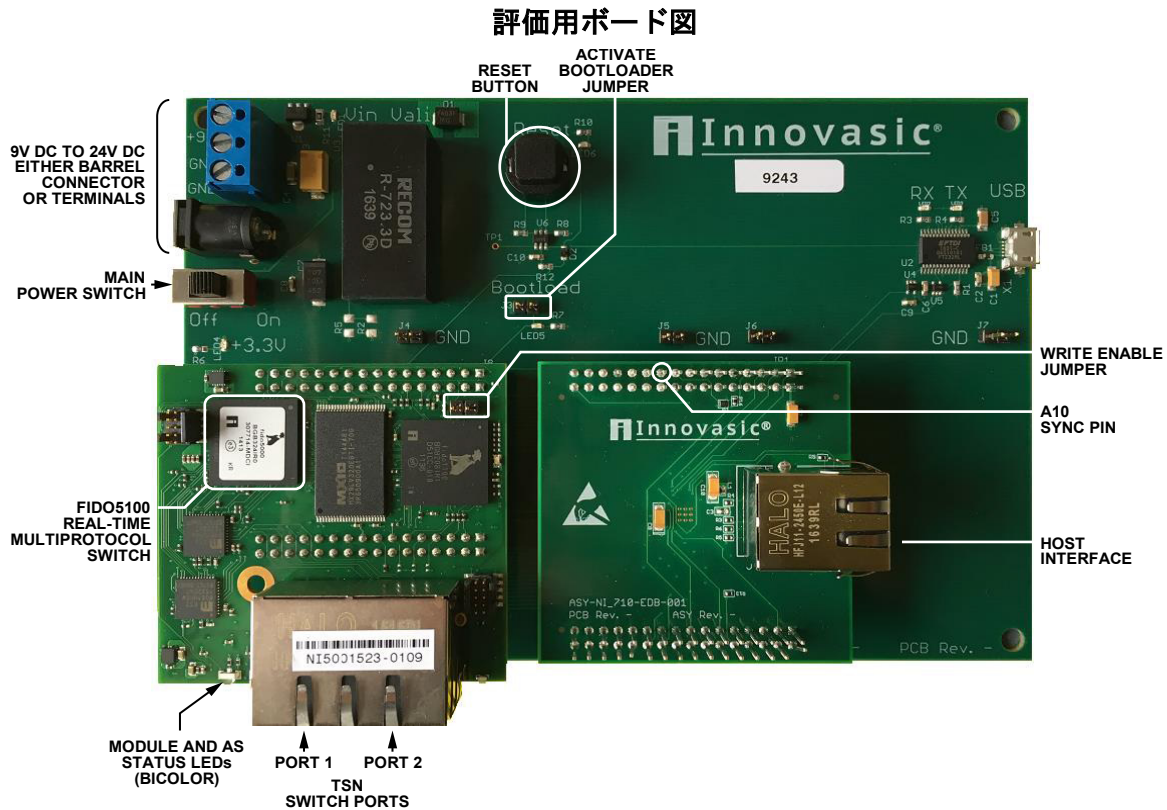


図 1. 評価用キット

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。※日本語版資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

目次

はじめに.....	1	Wireshark と TAP の使用.....	6
評価用ボード図	1	基本的なセットアップの完了と操作.....	6
改訂履歴.....	2	802.1AS のチェック	7
はじめに.....	3	TSN ストリームのセットアップ.....	8
評価用ボードのポート	3	802.1Qbv スケジュールの作成とセットアップ	10
電源.....	3	このデモのスケジュール	17
TSN キットの設定	3	まとめ.....	18
セットアップの例.....	4	参考資料.....	18
ホスト・ポート.....	5		

改訂履歴

10/2017—Revision 0: Initial Version

はじめに

PC をセットアップして TSN 評価用キットに接続するには、TSN Evaluation Kit Quick Start Guide の技術文書に従います。

評価用ボードのポート

ポートを設定するには、TSN イーサネット・ポートのいずれかに PC を接続します。ポートは 3 つあります。ホスト・ポート（プリント回路基板（PCB）の狭い面にある）に、既存のイーサネット・デバイスを接続する必要があります。デバイスのイーサネット・トラフィックは、スイッチ TSN ポートに転送されます（PCB の広い面にある）。TSN 機能を設定する前に、この転送を機能させる必要があります。

ホスト・ポートから設定 Web サイトにアクセスすることはできません。TSN キットの初期 IP アドレスは 192.168.1.1 です。

電源

キットに付属の電源を使用してデバイスを駆動します。代わりに、スクリュー端子を使用して給電することもできます。このボードは、9 V ～ 24 V DC の電圧範囲に対応するように設計されています。

スクリュー端子を使用する場合は、PCB のマークに合わせて接続してください。PCB はオフになります。

TSN キットの設定

次の例では、4 つの TSN キットがライン・トポロジで設定されます。つまり、すべての TSN キットは固有の MAC（メディア・アクセス制御）と固有の IP アドレスで設定されます。これらのアドレスは、TSN 評価用キットの **[Gateway Settings]** のメニューで設定されます。最初に書込み有効ジャンパを閉じて MAC アドレスへの書込みを有効にします。TSN キットは一度に 1 つずつセットアップする必要があります。

MAC アドレスと IP アドレスの下位 3 桁には、デバイスのシリアル番号の下位 3 桁を使用するよう推奨します。シリアル番号は常に TSN ポートのデュアル RJ45 コネクタ（RJ45 の位置については、図 1 を参照）に記載されています。下位 3 桁は 109 です。稀なケースでアドレスが競合する場合は、デバイスのシリアル番号を 4 桁以上使用します。こうすることで、複数のボード/IP アドレスの追跡に役立ちます。

ライン・トポロジで使用する場合は、IP アドレスの昇順または降順でボードを配置して、ユーザーにわかりやすくすることが最適です。これにより、ボードの変更の追跡に役立ちます。キットの設定に使用する PC で、ボードごとにブラウザのタブを別々に開き、物理的な順序が同じ外観になるように、キットにこれらのタブを接続します（図 2 参照）。

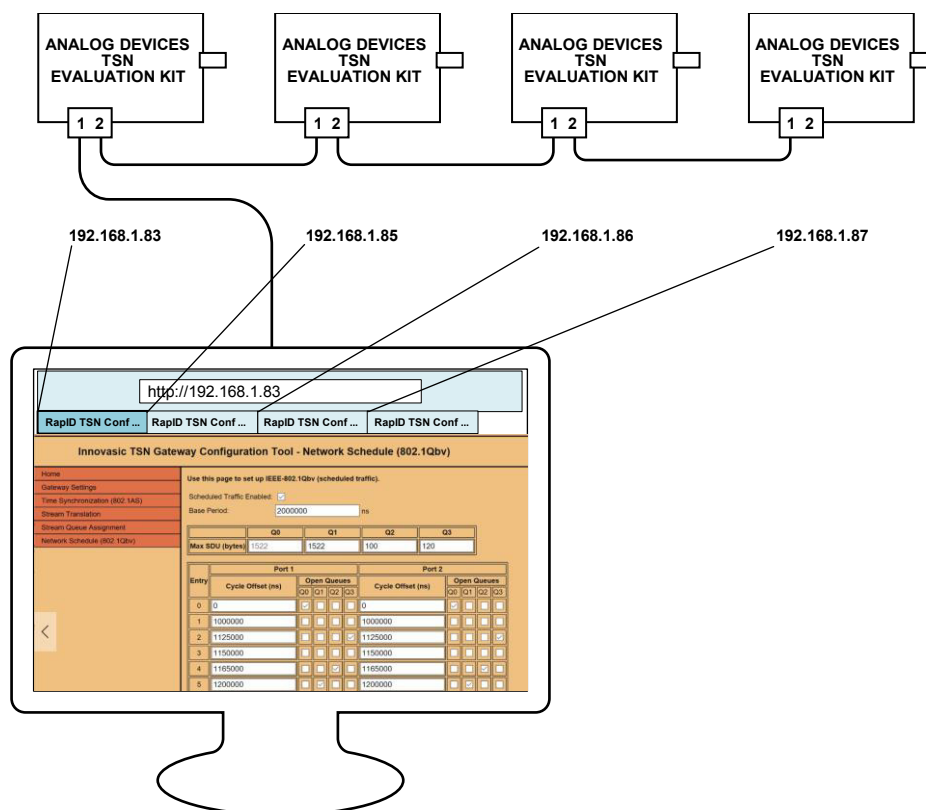


図 2. スケジュール設定ページのレイアウトに合わせてアドレスと TSN キット、ポートを整理する

セットアップの例

完全なセットアップを図 3 に示します。4 つの TSN キットはライン・トポロジに接続され、TSN セグメントを形成します。この段階で TSN は設定されず、標準のイーサネットが使用されます。境界ポート (TSN セグメントの終端で開いているポート) に、標準の非 TSN デバイスが接続されます。このデモでは、TSN セグメントの右側に Web カメラがあり、左側に Web カメラのビデオを表示するディスプレイまたは PC があります。

Web カメラのライブストリームを表示するには、デモの設定と同じ PC を使用して、ライブストリームを表示できます。この方法では、Web カメラ・ビデオを表示しながら、Web サーバーから TSN キットのセットアップを引き続き調整できます。

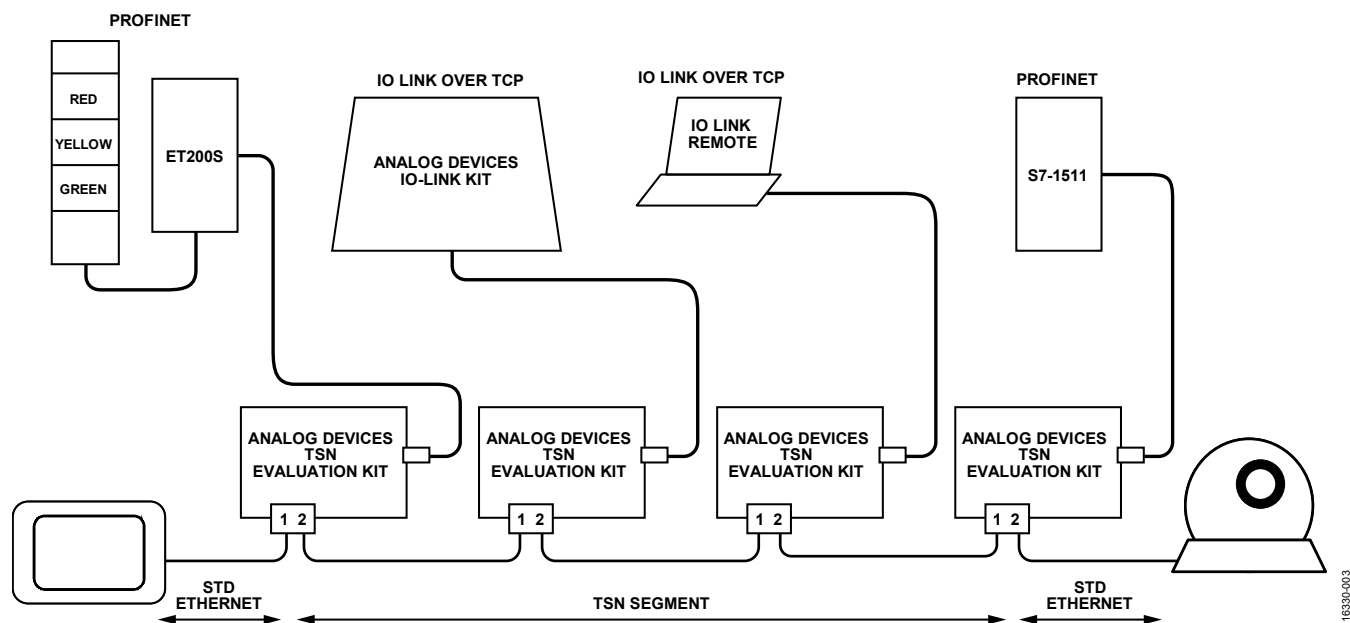


図 3. セットアップの例

ホスト・ポート

TSN キットを使用した TSN ネットワークのセットアップで重要な手順として、ホスト・ポートに接続されたデバイスの MAC アドレスをゲートウェイに認識させることがあります。このアドレスをホスト・ポートに割り当てることで、2 ポートの TSN スイッチは、ポートに接続されているデバイス宛てのパケットを特定できます。技術的には、スイッチの静的転送データベースにこの MAC アドレスが追加されます。

ホスト MAC の設定タスクを完了するには、ホスト・ポートに接続されているデバイスの MAC アドレスを確認する必要があります。PROFINET デバイスなどのオートメーション装置では、デバイスのハウジングに MAC が印刷されています（図 4 参照）。

特定したら、Web サーバーのゲートウェイ設定ページの **[client MAC]** フィールドにホストの MAC アドレスを入力する必要があります。



図 4. Siemens S7-1511 コントローラの MAC アドレス

Windows® システムでは、ネットワーク・アダプタ・ステータスから物理アドレスを取得できます。**[Local Area Connection Status]** ダイアログ・ボックスにある **[General]** タブで **[Details]** ボタンをクリックします。詳細については、図 5 を参照してください。

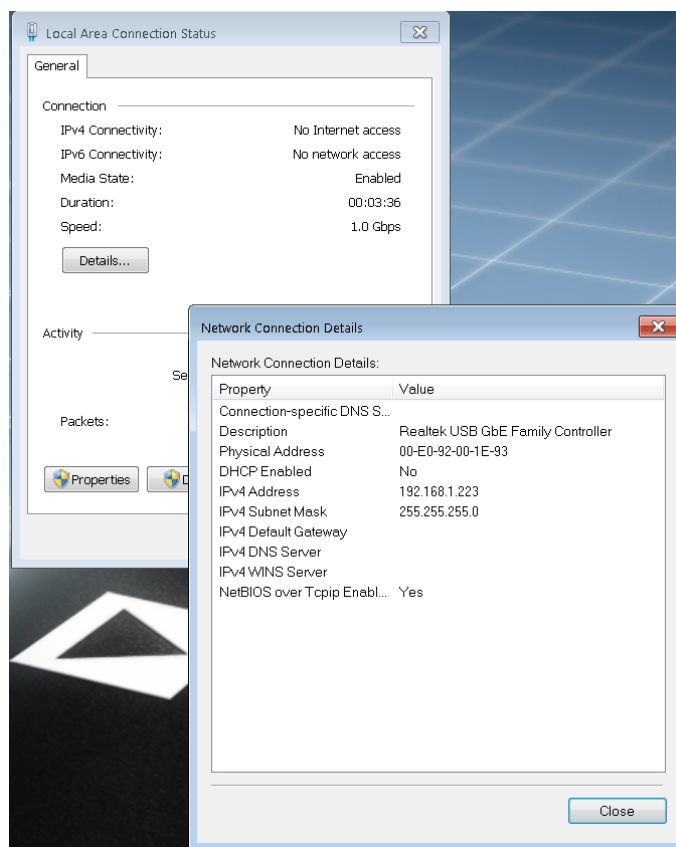


図 5. Windows アダプタの MAC アドレスを特定する

WIRESHARK と TAP の使用

MAC を使用できない場合は、Wireshark などのツールを使用して、デバイスで送受信されるパケットを観察するのが最も簡単です。デバイスが受信するパケットは、(マルチキャスト・メッセージまたはブロードキャスト・メッセージが使用されない限り) イーサネット・フレームの宛先 MAC アドレス・フィールドの MAC アドレスを含み、デバイスから送信されるパケットはイーサネット・フレームの発信元 MAC アドレス・フィールドのデバイスの MAC アドレスを含んでいます。

セットアップをデバッグするには、Wireshark を使用する必要があります。TSN 評価用キットをセットアップする前に Wireshark をインストールして理解しておくよう強く推奨します。

ただし、Wireshark では、パケットはイーサネット・ネットワークに充滿しないので、すべてのトラフィックが見えるわけではありません。その代わりに、各スイッチの転送データベースを使用して、宛先までのルーティング・パスが最短になる出口ポートを判断します。そのため、イーサネット・ワイヤのテスト・アクセス・ポイント (TAP) を取得することが推奨されます。

TAP は、受動型のイーサネット・コンポーネントで、自分でトラフィックを送信したり、遅延を発生することはなく、いずれかの方向に流れるすべてのパケットを監視します。多くのベンダーが TAP を提供しているので、「イーサネット TAP」または「イーサネット・テスト・アクセス・ポイント」でインターネットを検索すると、自作オプションを含む多くのオプションが返されます。この例では、2 つの接続を同時に TAP 操作することができ、高

分解能のクロック・ベース (8 ns) が組み込まれているので、KUNBUS TAP2100 が使用されます。2 つのチャンネルを同時に TAP 操作できるので、デバッグが容易になり、スイッチ前後の TAP によってスイッチがメッセージをフィルタリングし、メッセージを正しく TSN ストリームに変換しているかどうかを判断できます。

基本的なセットアップの完了と操作

図3で示すセットアップの例に従ってデモ用のすべてのボードとデバイスを配線する場合、図 2 に示す設定に従い、Web ブラウザを使用してすべての TSN キットにアクセスでき、すべてのホストの MAC アドレスがゲートウェイ設定に追加され、基本的なセットアップが完了します。TSN 以外でも、このセットアップを使用すれば他のイーサネット・レイヤ 2 セグメントと同じように動作します。

TSN の利点は、標準のイーサネットとレイヤ 3 ではなく、レイヤ 2 のスイッチ・トークの拡張であり、アドレスの競合を避けるために異なる IP サブネットのアドレスを使用できることにあります。

TSN を処理せずに、必要なすべての通信関係をそのままセットアップできます。

- S7-1511 と ET200S を接続するプロジェクトを作成します。IP サブネットは、192.168.0.xxx です。
- IP サブネット 192.168.10.xxx を使用して、IO Link のデモを接続します。
- IP サブネット 192.168.21.xxx を使用して Web カメラをセットアップして接続します。

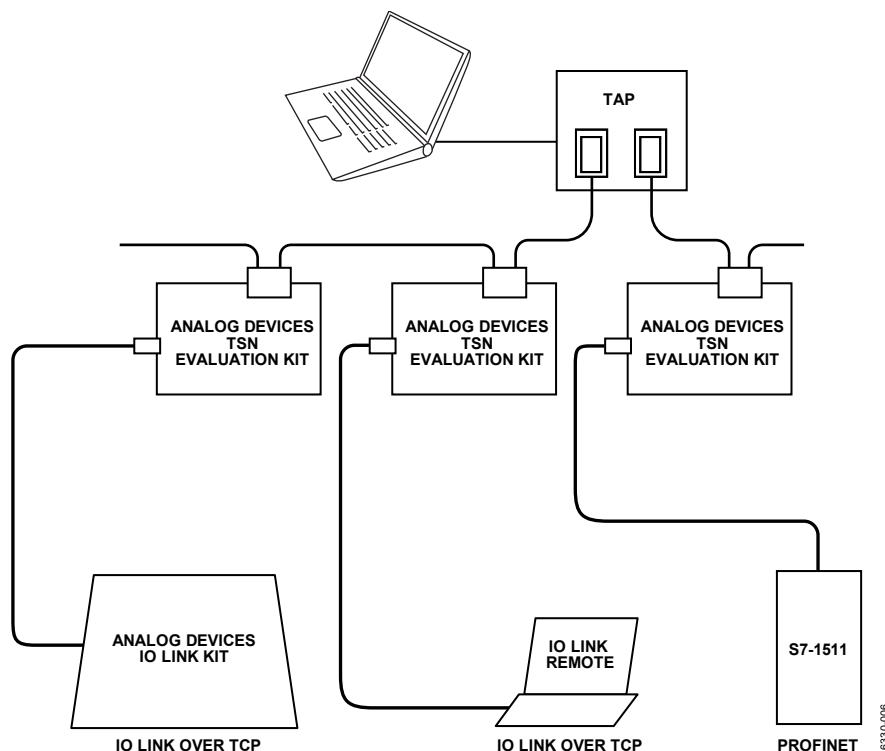


図 6. セットアップにおけるイーサネット・ワイヤ TAP

802.1AS のチェック

セットアップ後に、802.1AS の時間同期が動作します。いずれかのボードがグランドマスター・クロックの役割を果たします。これは 802.1AS ステータス LED が赤になることで特定されます(図 1 参照)。同期スレーブ・デバイスでは、クロック同期が確立されると 802.1 ステータス LED が緑に変わります。

TSN 評価用キット Web ページで AS のステータスをチェックし、AS がピア・ツー・ピア・クロックであることを理解してください。グランドマスターは、両方の TSN ポートに対してマスターの役割を果たしますが、他のキットはグランドマスターに対するスレーブの役割とグランドマスターからさらに遠いノードへのマ

スターの役割を報告します。[Port Role] ボックスは、ポートがスレーブ・モードかマスター・モードかを報告します。ゲートウェイがグランドマスターでない場合、1 つのポートがスレーブ・モードであることを報告し、他のポートがマスター・モードであることを報告します。ゲートウェイが TSN ネットワーク上でグランドマスターの場合は、両方のポートがマスター・モードであることを報告します。詳細については、TSN Evaluation Kit Quick Start Guide を参照してください。ピア・ツー・ピア・スキームを図 7 に示します。

802.1AS サービスでは、スケジュールが作成され有効になった後に、TAC サイクル中の特定の時点でキュー 3 を開く必要があります。

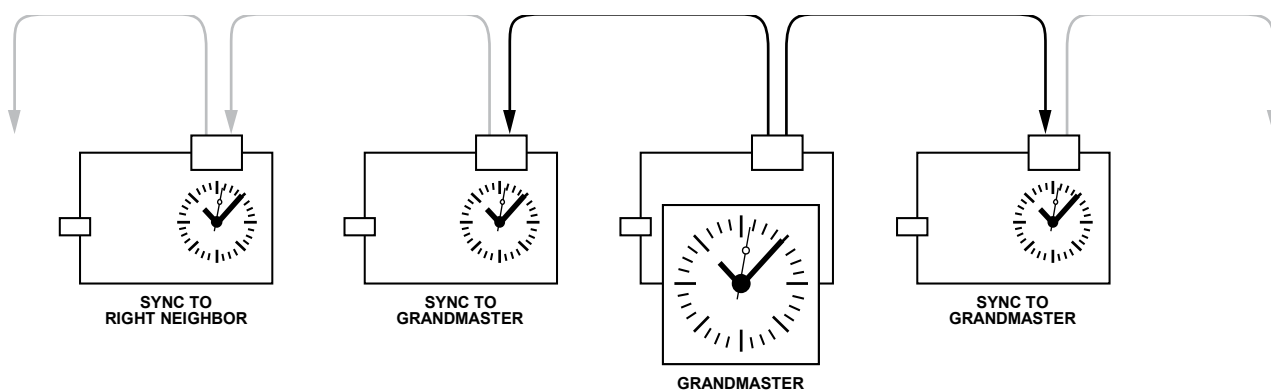


図 7. 802.1AS ピア・ツー・ピア同期

16330-007

グランドマスター機能の割り当て

スタートアップ時に、デバイスはベスト・マスター・クロック・アルゴリズム (BMCA) を使用してクロックのグランドマスターを選択します。多くの場合、この操作を実行すれば十分で、その後の注意は不要です。ただし、固定のグランドマスターが好ましいシナリオもあります。

【Time Synchronization】ページの【Local Master Priority1】および【Local Mater Priority2:】エントリを使用して、ベスト・マスター・アルゴリズムを操作すれば、グランドマスター・クロックの特定のボードを選択できます。図 8 に、調整された TSN キットの優先度 1 は 200 に設定されています（デフォルトの 248 よりも高くなります。つまり、このボードには、グランドマスター・クロックの役割が割り当てられます）。

The screenshot shows the 'Innovasic TSN Gateway Configuration Tool - Time Synchronization (802.1AS)' window. It has a sidebar with navigation links: Home, Gateway Settings, Time Synchronization (802.1AS), Stream Translation, Stream Queue Assignment, and Network Schedule (802.1Qbv). The main area is titled 'Use this page to monitor the status of IEEE-802.1AS time synchronization.' and contains several input fields and buttons for configuring time synchronization parameters. The 'Save' button is located at the bottom left of the configuration area.

図 8.TSN キットのグランドマスターの割り当て

TSN ストリームのセットアップ

TSN ストリーム ID は、ローカルで管理されるマルチキャスト・アドレスと 802.1Q VLAN タグで構成されます。この例のセットアップでは、表 1 に示す次のストリームが使用されます。

表 1. デモ用の MAC、PCP、VLAN 設定

Stream	TSN Multicast MAC	Priority Code Point (PCP)	VLAN ID (VID)
PROFINET			
S7-1511 to ET200S	F1:D0:F1:D0:01:05	4	0x0000
ET200S to S7-1511	F1:D0:F1:D0:01:01	4	0x0000
IO Link			
Master to Demo	F1:D0:F1:D0:00:05	2	0x0000
Demo to Master	F1:D0:F1:D0:00:01	2	0x0000

すべての TSN ノードが制御されている限り、MAC、PCP、VLAN の値を自由にセットアップできます。このセットアップでは、PROFINET サイクル通信の優先順位が高くなります。IO Link と PROFINET TSN ストリームは、MAC アドレスの下位から 2 番目のバイトによって個別に設定されますが、VLAN ID を同じ目的で使用できます。表 2 の次のリストに、このようなケースで有効なセットアップを記載しています。ストリームを図 9 に示します。

表 2. 代替の MAC、PCP、VLAN 設定

Stream	TSN Multicast MAC	Priority Code Point (PCP)	VLAN ID (VID)
PROFINET			
S7-1511 to ET200S	F1:D0:F1:D0:00:05	4	0x0001
ET200S to S7-1511	F1:D0:F1:D0:00:01	4	0x0001
IO Link			
Master to Demo	F1:D0:F1:D0:00:05	2	0x0002
Demo to Master	F1:D0:F1:D0:00:01	2	0x0002

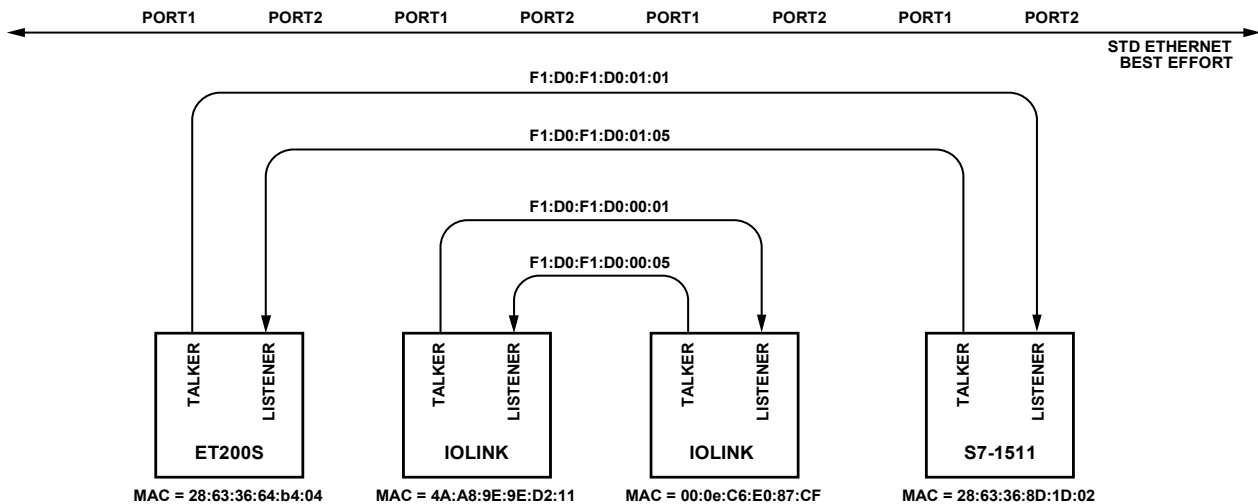


図 9. ストリーム

Use this page to set up talker and listener stream translation parameters.

Talker Methods (choose one):

- ☐ Destination MAC Address
- ☐ Destination MAC Address AND Priority Code Point (PCP) of VLAN tag
- ☐ Destination IP Address AND DSCP
- ☐ Destination IP Address AND Protocol AND Source Port
- ☒ Destination IP Address AND Protocol AND Destination Port

Talker Parameters:

Streams	On	Listener(s) Dest. IP Addr:	IP Prot:	Dest. Port:	TSN Dest. MAC Addr (multicast):	VLAN Priority:	VLAN ID:	Egress Port:
Stream 1:	☒	192.168.10.150	TCP	7	F1:D0:F1:D0:00:05	2	0x000	☐ Port 1 ☒ Port 2 ☐ Both Ports
Stream 2:	☐	0.0.0.0	UDP	0	F1:D0:F1:D0:00:02	0	0x000	☐ Port 1 ☐ Port 2 ☒ Both Ports
Stream 3:	☐	0.0.0.0	UDP	0	F1:D0:F1:D0:00:03	0	0x000	☐ Port 1 ☐ Port 2 ☒ Both Ports
Stream 4:	☐	0.0.0.0	UDP	0	F1:D0:F1:D0:00:04	0	0x000	☐ Port 1 ☐ Port 2 ☒ Both Ports

Listener Parameters:

Streams	On	TSN Dest. MAC Addr (multicast):	VLAN ID:	Listener Dest. MAC Addr:	VLAN tag:
Stream 1:	☒	F1:D0:F1:D0:00:01	0x000	00:0E:C6:E0:87:CF	☐ Do not change ☒ Remove ☐ Replace VLAN tag with:
Stream 2:	☐	F1:D0:F1:D0:00:06	0x000	00:00:00:00:00:00	☐ Do not change ☒ Remove ☐ Replace VLAN tag with:
Stream 3:	☐	F1:D0:F1:D0:00:07	0x000	00:00:00:00:00:00	☐ Do not change ☒ Remove ☐ Replace VLAN tag with:
Stream 4:	☐	F1:D0:F1:D0:00:08	0x000	00:00:00:00:00:00	☐ Do not change ☒ Remove ☐ Replace VLAN tag with:

図 10. IO Link デバイス・ストリームのセットアップ

IO Link と PROFINET のトラフィックには、大きな違いがあります。PROFINET トラフィックは、TSN ストリームへの変換が必要なトラフィックを特定するための手段（トーカー手段）として [Destination MAC Address AND Priority Code Point (PCP) of VLAN tag] を使用しますが、IO Link デモは TCP (Transmission Control Protocol) 接続を使用します。そのため、トーカー側では [Destination IP Address AND Protocol AND Source Port] を使用し、IO Link PC 側（リスナー側）では [Destination IP Address AND Protocol AND Destination Port] を使用します。大部分の TCP 接

続では、クライアント・ポート番号は異なる場合がありますが、サーバー側ポート・アドレスは通常は静的です。これはデフォルトのポートが 80 である Web サーバーと同様です (図 10 参照)。

PROFINET で [Destination MAC Address AND Priority Code Point (PCP) of VLAN tag] を使用すると、優先度の高いデータ・トラフィックを TSN ストリームに割り当てることができます。PROFINET では、VLAN PCP 6 を使用して、すべての優先順位がつけられたトラフィックがタグ付けされます (図 11 参照)。

Use this page to set up talker and listener stream translation parameters.

Talker Methods (choose one):

- ☐ Destination MAC Address
- ☐ Destination MAC Address AND Priority Code Point (PCP) of VLAN tag
- ☐ Destination IP Address AND DSCP
- ☒ Destination IP Address AND Protocol AND Source Port
- ☐ Destination IP Address AND Protocol AND Destination Port

Talker Parameters:

Streams	On	Listener(s) Dest. IP Addr:	IP Prot:	Source Port:	TSN Dest. MAC Addr (multicast):	VLAN Priority:	VLAN ID:	Egress Port:
Stream 1:	☒	192.168.10.10	TCP	7	F1:D0:F1:D0:00:01	2	0x000	☒ Port 1 ☐ Port 2 ☐ Both Ports
Stream 2:	☐	0.0.0.0	UDP	0	F1:D0:F1:D0:00:02	0	0x000	☐ Port 1 ☐ Port 2 ☒ Both Ports
Stream 3:	☐	0.0.0.0	UDP	0	F1:D0:F1:D0:00:03	0	0x000	☐ Port 1 ☐ Port 2 ☒ Both Ports
Stream 4:	☐	0.0.0.0	UDP	0	F1:D0:F1:D0:00:04	0	0x000	☐ Port 1 ☐ Port 2 ☒ Both Ports

Listener Parameters:

Streams	On	TSN Dest. MAC Addr (multicast):	VLAN ID:	Listener Dest. MAC Addr:	VLAN tag:
Stream 1:	☒	F1:D0:F1:D0:00:05	0x000	4A:A8:9E:9E:D2:11	☐ Do not change ☒ Remove ☐ Replace VLAN tag with:
Stream 2:	☐	F1:D0:F1:D0:00:06	0x000	00:00:00:00:00:00	☐ Do not change ☒ Remove ☐ Replace VLAN tag with:
Stream 3:	☐	F1:D0:F1:D0:00:07	0x000	00:00:00:00:00:00	☐ Do not change ☒ Remove ☐ Replace VLAN tag with:
Stream 4:	☐	F1:D0:F1:D0:00:08	0x000	00:00:00:00:00:00	☐ Do not change ☒ Remove ☐ Replace VLAN tag with:

図 11. PROFINET マスター・ストリームのセットアップ

802.1QBV スケジュールの作成とセットアップ

ハードウェアと通信がセットアップされ、802.1AS クロックが同期された後に、スケジュールを作成できます。ここで、イーサネットの基本を復習しましょう。

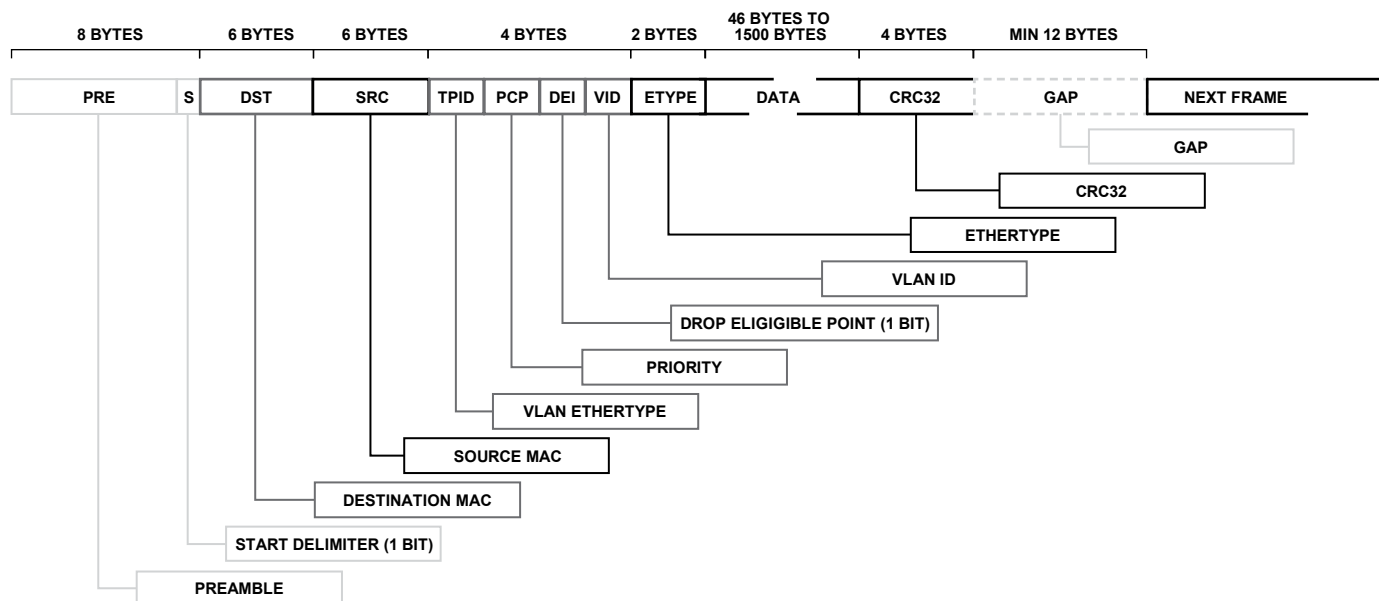
復習: イーサネット・フレームと TSN

ソフトウェアの観点では、イーサネット・フレームがレイヤ 2 ヘッダー（宛先と送信先アドレス、EtherType）で構成され、最大 1500 バイトのデータ（ジャンボ・フレームが使用されない限り）と CRC32 で構成されます。イーサネット・ヘッダーとデータ・フィールドは、コンピュータがフレームを受信するときにコンピュータのメイン・メモリにコピーされます。

さらに、ワイヤ上のイーサネット・フレームには、63 ビットのプリアンプルと 1 ビットの開始デリミタ、最低 12 バイトのライン・スライス・ギャップが含まれます（図 12 参照）。イーサネット・

フレームでは、最低でも 64 バイト（CRC を含む）が必要です。相対的に長いプリアンプルとサイレンス時間、および最低長は、旧式のイーサネット規格に基づいていますが、引き続き維持され、確保されています。一部の PHY では、プレアンプルを 16 ビットに短縮できますが、一般的な方法ではありません。

TSN ストリームは、標準のイーサネット・フレームに 4 バイトの VLAN タグを追加します。ストリームには、常に VLAN タグが含まれます。VLAN タグは、優先度（PCP）と VLAN ID で構成されます。VLAN ID は宛先 MAC と組み合わせて TSN ストリームを特定します。各 TSN ストリームは、1 台のトランスミッタ（トーカー）と複数のレシーバー（リスナー）を使用できます。これらの 4 バイトをフレーム長の計算に追加する必要があります（表 3 参照）。フレームがワイヤを占有する最低時間は、100 Mbps で 6.72 μ s です。完全な 1500 バイト・データ・フレームの時間は 123.36 μ s です。



- STD ETHERNET FRAME ELEMENTS
- TSN STREAM ELEMENTS
- THESE ELEMENTS AFFECT TIMING BUT HAVE NO PROGRAMMER ACCESS

図 12. イーサネット・フレーム

表 3. イーサネット・フレームのタイミング

Rate (Mbps)	Rate (Mbps)	Byte Time (μs)	Layer2 (Byte)	Preamble (Byte)	Gap (Byte)	SDU, Minimum (Byte)	Slot, Minimum (Byte)	Slot Time, Minimum (μs)	Slot Time, Maximum (μs)
10	1.25	0.8	22	8	12	42	84	67.2	1233.6
100	12.5	0.08	22	8	12	42	84	6.72	123.36
1000	125	0.008	22	8	12	42	84	0.672	12.336

イーサネット・インフラストラクチャのタイミング

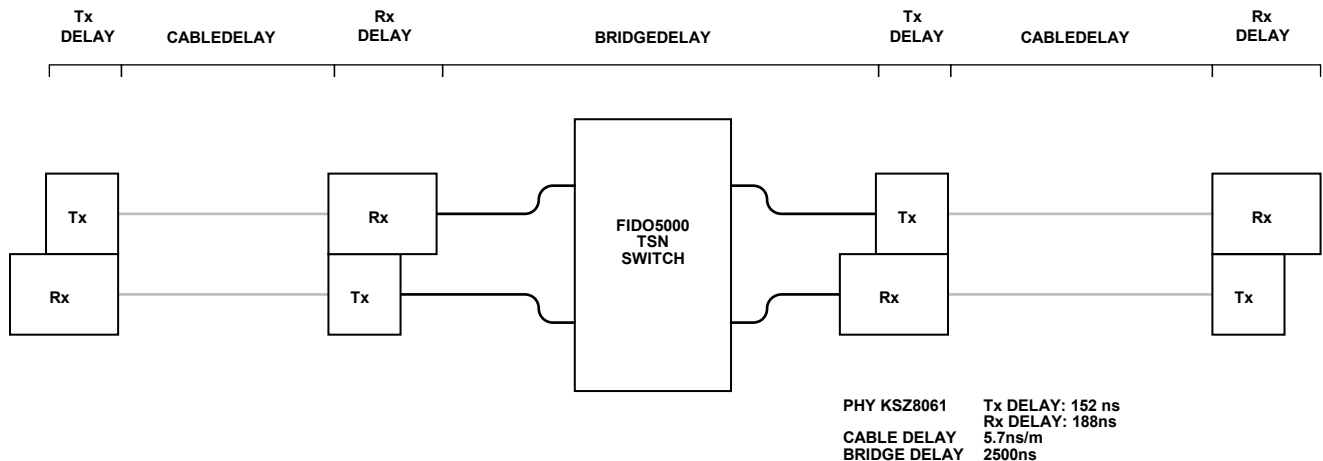


図 13. TSN 2 ポートの切替えタイミング・モード

イーサネット転送チャンネルのタイミング・モード

イーサネットはかなり高速ですが、転送チャンネルの遅延を考慮する必要があります。100 Mbps の全二重イーサネット環境では、次のパラメータを考慮します。

- PHY 遅延: Ethernet PHY では、データの内部プロセスによって発生した受信および転送中に遅延が発生します。通常、受信 (RX) 遅延は、転送 (TX) 遅延よりも長くなります。また、RX のタイミングによっては数ナノ秒の範囲でジッタが発生する場合があります。これらの遅延の範囲は数 100 ナノ秒で、PHY コンポーネントのパラメータです。各バイトが 80 ns を占有するので、PHY 遅延は、実際には、1 バイトから 4 バイトの遅延の範囲に収まります。
- ブリッジ遅延: イーサネット・スイッチでは、ブリッジ遅延 (メッセージがスイッチを移動する間に遅延する時間) が発生します。カッスルーが高速な 2 ポート・スイッチでは、ブリッジ遅延は小さくなります。2 ポート・スイッチは、8 バイトのプリアンブル、12 バイトの送信元宛先 MAC、4 バイトの VLAN タグを受信してから転送を決定する必要があります。これらの要件により、ブリッジ遅延は最低で 1.92 μ s になります (ブリッジ遅延がわずかに高くなる他の要因もあります)。

- ケーブル遅延: 通常の CAT5 ケーブルでは、1 m あたり 5.7 ns のケーブル遅延 (約 0.5 ビットの転送時間に相当) が発生します。テーブルトップのセットアップまたはケーブルが短いキャビネットでは、ケーブル遅延は PHY 遅延を 1 桁下回る大きさです。ただし、全長 100 m のイーサネット・ケーブルでは、ケーブル遅延にさらに 570 ns が追加されます (約 7 バイトに相当)。

物理距離が非常に長い (ケーブルが長い) またはノードが多いシステムで複雑なスケジュールを計算するには、これらの遅延をすべて考慮する必要があります。このテーブルトップのデモでは、信頼できる結果が得られるようスケジュールに 10,000 ns のマージンを追加します。

802.1Qbv スケジューラーの動作

IEEE では、Qbv に対して最大 8 つのキューを定義しています。これは、TAS (Time Aware Shaper) と呼ばれます。また、IEEE では、各サイクルのオフセットが 1 バイトになるよう、バイトの配列も定義しています。これらのバイト内のビットは、必要に応じてキューを有効または無効にします。サイクル内の各時間スライスで、バイトによってキューが有効かどうかを定義します。有効なキューでは、優先順位の高いキューが処理されます。スライスには、サイクル内で開始オフセットを含むことができることを理解してください。これらのオフセットは、ナノ秒単位で定義されます。サイクル時間もナノ秒単位で定義されます。

イーサネット・トランスミッタがアイドル状態の場合、すべての有効なキューのうち、最も優先度の高い有効なキューのイーサネット・フレームが取得されます。トランスミッタによるフレームの送信がビジー状態の場合、さらにフレームが取得されることはありません (つまり、他の転送キューはありません)。

TSN キットにおける TAS の実装は、4 つのキュー (ゲートオープン・イベント) と最大 16 個のオフセットに制限されます。

図 14 に、TAS スケジューラーのブロック図を示します。この図では、すべてのキューにイーサネット・フレームのキューがあり、4 つのオフセットが定義されます。0 ns、500 ns、1000 ns、2000 ns です。この例では、サイクル時間は 2500 ns になります。図 14 に、2000 ns のアクティブなオフセットを示します。この結果、キュー 2 とキュー 3 がブロックされ、キュー 0 とキュー 1 が有効になります。キュー 1 はキュー 0 よりも優先度が高いため、トランスミッタは、キュー 1 が空になるか、現在のスライスが完了するまで、キュー 1 から次のフレームを取得します。現在のスライスが完了したら、オフセット 0 の次のスライスのキュー 0 が有効になりますが、優先度の高いキュー 3 にメッセージが追加されるので、次に送信されるフレームはキュー 3 から選択されます。

すべてのキューが同時に有効になる場合、TAS は従来の QoS (サービス品質) 優先キューと同様に機能し、最も優先度の高いキューが最初に処理されます。

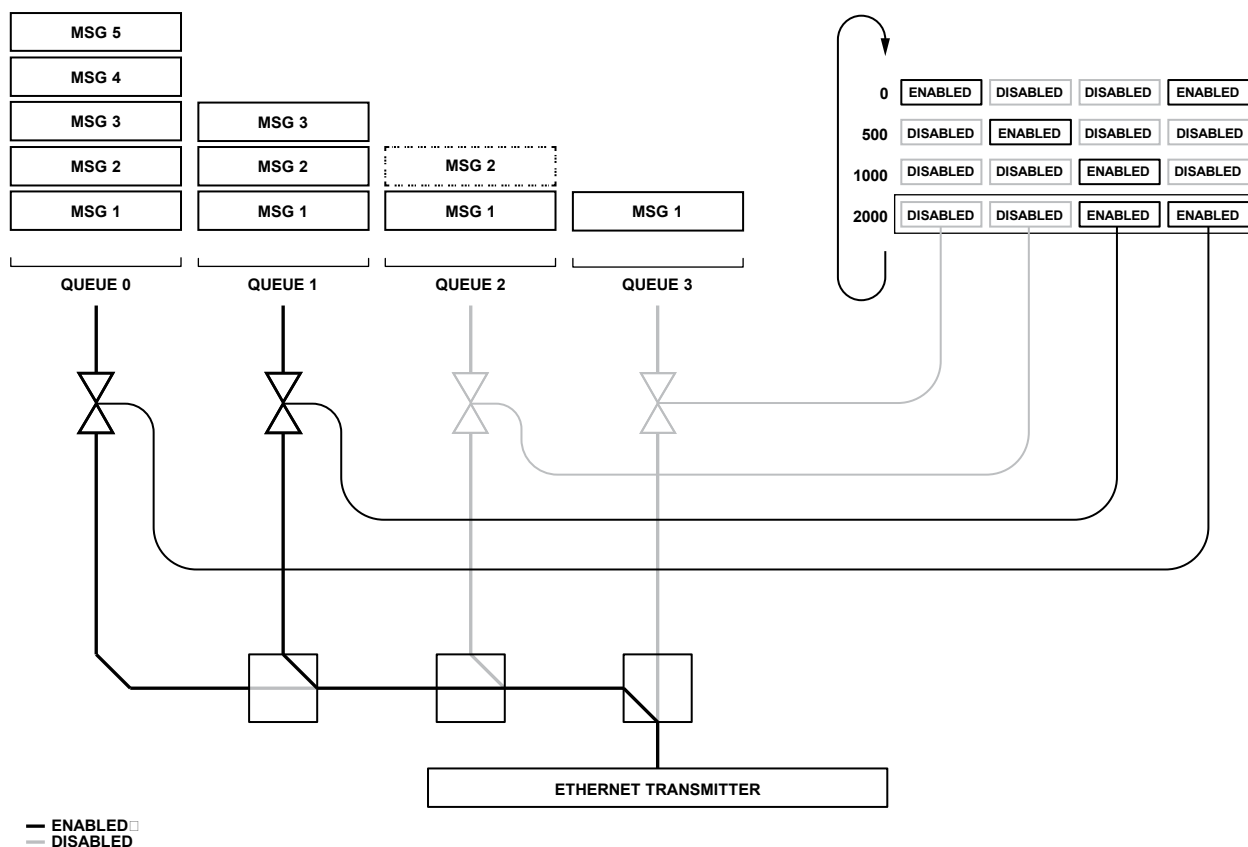


図 14. 802.1Qbv スケジューラー

16330-014

ガード・バンド

スケジュールを使用して帯域幅をガードする場合、優先度の高いゲートが開いて、トランスミッタがアイドル状態になることが必要です。トランスミッタがアイドル状態でない場合、優先度が低く、フレームの長いトラフィックをブロックするか、少なくとも優先度の高いトラフィックを遅延させることができます。トランスミッタがアイドル状態であることを確保し、即座に優先度の高いトラフィックを送信できるように、ガード・バンドを挿入します。ガード・バンドがアクティブな間、トランスミッタが次のフレームを取得することを阻止します。

効果を発揮するには、特定のキューで想定される最も長いメッセージが完了してから次のゲートが開くように、ガード・バンドを長くする必要があります。キューに追加できる最も長いフレームのサイズは、パラメータ、最大サービス・データ・ユニット (maxSDU) で定義されます (バイト単位)。

TSN キットは自動的にガード・バンドに対応するので、すべてのキューを無効にして手動でガード・バンドを作成する必要はありません。

図 15 に、シンプルな例を示します。 t_0 で、スケジューラーが初めて有効になります。その時間の前、 t_0 の左で、すべてのゲートが開きます。転送ゲートが初めて有効になると、トランスミッタはキュー 0 からフレームを取得できます (この例では Q0、一度に開くゲートは 1 つ)。ガード・バンド時間 (図 15 を参照) は、キュー 3 のオープン・イベントの前のガード・バンドで、Q3 ゲート・イベントが発生するまでに、完全な 1522 SDU サイズ・フレームを安全に送信するのに十分な幅を備えています。

Q3 が開くと、Q3 は短いフレームのみを転送するように設定されているので、両方の期間は大幅に短くなります。maxSDU は、わずか 200 バイトです。

キュー 0 の maxSDU は、1522 で固定なので、設定 Web サーバーの Web トラフィックは廃棄されずに、キュー 0 を通過できます。

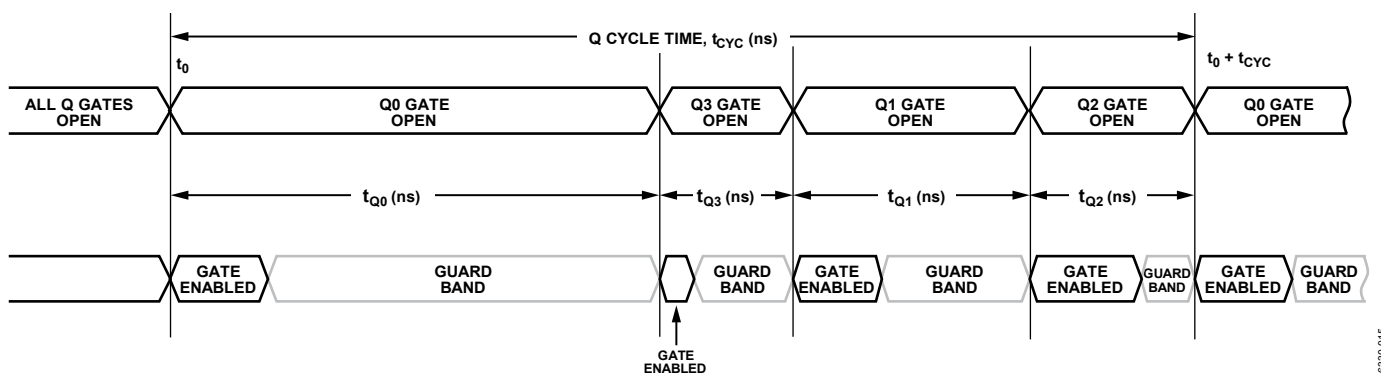


図 15. スケジュールのタイミング、スタートアップ、ガード・バンド

イーサネット・フレーム・サイズ、フレーム・レート、非同期

フレーム・サイズは、キューごとに定義する必要があるため、指定されたキューに配置されるプロトコルを熟知する必要があります。巡回通信では、トラフィックの長さやレートは簡単に計算できます。ただし、可変のパッケージ・サイズを使用するプロトコル（TCP 経由のプロトコルなど）では、最も厳しいケースの値が必要になります。例えば、ModbusTCP は巡回通信に使用できますが、TCP はデータ・パケットの他に非常に短いハンドシェイク・パケットを使用します。さらに、Modbus はデバイスにアクセスするためのコマンドに対応します。これらのコマンドの一部は、他のコマンドよりも長くなります。ModbusTCP をスケジュールに配置するには、maxSDU で最も厳しいケースの推定が必要です。

PROFINET RT では、巡回データのストリームを排他的に定義でき、ストリームに余分なフレームは数個だけ必要であるか、全く不要です。そのため、maxSDU の推定がより正確になります。TSN キットは、PROFINET RT と同期しませんが（PROFINET RT プロトコルには、その手段はありません）。PROFINET の巡回通信は、独自のクロックで実行されます。各フレームが PROFINET サイクル時間内に転送されるように、TAS サイクル時間は、

PROFINET のサイクル時間よりも短く（速く）する必要があります。2 分の 1 がベスト・プラクティスです。

効果的で厳密なスケジュールの作成が簡単でない理由は、次のとおりです。

- フレーム・サイズが変化する。スケジュールには、最も頻繁なケースよりも厳しい条件を考慮する必要があります。
- その他のフレームが送信されるので（ハンドシェイク、稀なコマンドなど）、フレーム・レートが変化する。
- アプリケーション・サイクルは、TAS サイクルと同期しない（オーバーサンプリングが必須）。
- サイクル時間が異なるストリームが 1 つのワイヤに共存する必要があります。このような問題を解決するため、遅い TSN スケジュールを使用して、TSN サイクル内で高速のトラフィックに対してゲートを複数回開くことができます。例については、図 16 を参照してください。

TAS スケジューラ内でアプリケーションを同期できます。TSN キットの CPU モジュールのピン A10 で TAS 同期パルス（サイクルが開始または完了したとき）を使用できます。アプリケーションは、この信号を使用して TAS サイクルを同期できます。その結果、オーバーサンプリングは不要になります。

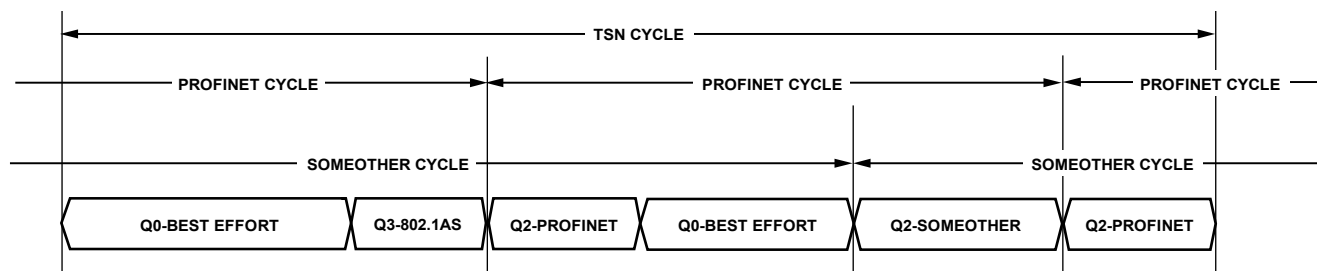


図 16. 異なるサイクル時間をサポートするスケジュール。PROFINET は「他の」トラフィックの 2 倍の回数でスケジュールされる

16330-016

最後に、TSN キットのブロック図（図 17 を参照）を考察する必要があります。各イーサネット・ポートは TAS スケジューラーを備えています。いずれかのイーサネット・ポートでフレームが受信されると、TSN キットは既知の TSN ストリーム ID をチェックします。TSN ストリームが特定されると、逆のストリーム変換が適用され、フレームがホスト・ポートに送信されます。特定されない場合、または一致する IP アドレスがないベスト・エフォート型のトラフィックの場合、このフレームは「他のポート」の転送用の TAS キューに追加されます。

PROFINET IRT では、TSN が使用できるようになる前でも、スケジュールされたトラフィックが使用されます。この簡単な転送は、絶対フォワーダと呼ばれます。転送されないトラフィックだけが特定され、転送されるフレームの送信時間は、受信時間に比例します（ブリッジの遅延を可算）。これは、PROFINET 命名法の絶対フォワーダと対照的です。

絶対フォワーダは、最初に宛先ポートを検索し、（スケジュール内の）絶対時間でフレームを送信します。この絶対時間では、ブリッジの遅延とルックアップ時間を考慮する必要があります。そのため、絶対フォワーダは、相対フォワーダよりも少し遅くなり、少し複雑になります。絶対フォワーダのアプリケーションの 1 つとして、マルチポート・スイッチが挙げられます。この場合、出口ポートのルックアップが発生する必要があります。

ホスト・ポートからフレームが受信されると、定義されるストリーム変換フィルタに従ってチェックされます。変換されない場合、トラフィックは TAS のベスト・エフォート型のキューに追加されます。スイッチの動的転送データベースによって適切なポートが選択されますが、ストリーム変換が発生する場合は、フレームが出力されるポートから定義できます。そのため、ストリーム変換設定ページでは、目的の出口ポートに、ポート 1、ポート 2、両方のポート同時を選択できます。

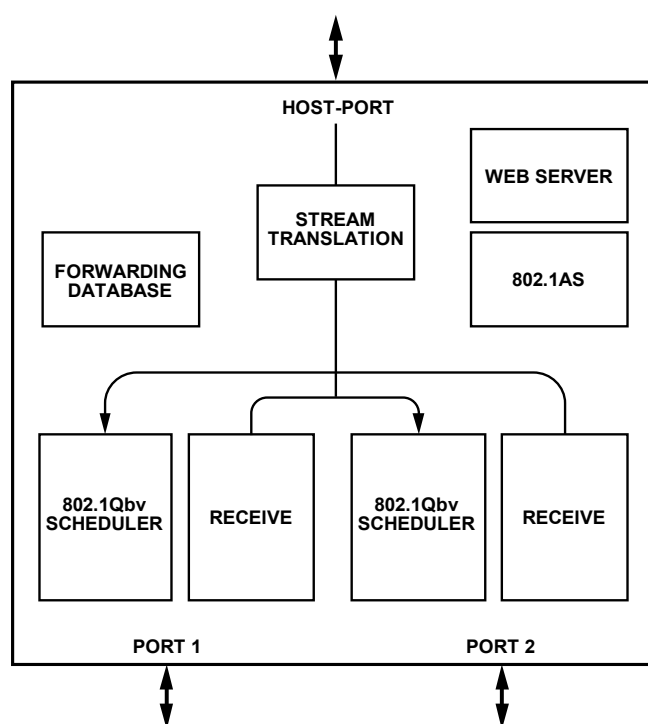


図 17. TSN キットのブロック図

16330-017

このデモのスケジュール

このデモでは、2 ms の TAS サイクルを選択し、ベスト・エフォート型のトラフィックに割り当てられた帯域幅 (1 ms) よりも 50 % 広い帯域幅を割り当てます。トラフィックのタイミングを表 5 に記載します。

このデモの TSN セグメントの右端と左端では、TSN セグメントに向かうトラフィックはスケジュールのみです。結果のスケジュールは、各ポートで同じです (表 4 参照)。

表 4. ポート・スケジュールの結果

PORT 1	Scheduled
0	Q0, best effort
1,000,000 ns	Q3
1,011,400 ns	Q2
1,029,400 ns	Q1
1,117,760 ns	Q0, best effort
= 1,882,240 ns	Total for Q0

表 5. トラフィックとタイミング

Stream	Queue	Protocol	maxSDU	Rate	Slot Time	Margin
Best Effort	0	http, video stream	1522	N/A ¹	1,882,240 ns	N/A ¹
F1:D0: F1:D0:00:01	1	TCP, IO Link	1000	<<<TAS	81,600 ns	6670 ns
F1:D0: F1:D0:00:05	1	TCP, IO Link	1000	<<<TAS	81,600 ns	6670 ns
F1:D0: F1:D0:01:01	2	PROFINET IO	80	4 ms	8000 ns	10,000 ns
F1:D0: F1:D0:01:05	2	PROFINET IO	80	4 ms	8000 ns	10,000 ns
802.1AS	3	PTP	110 ²	2 ms	10,400 ns	1000 ns

¹ N/A は該当なしを意味します。

² この例では、110 は PTP フレームの長さです。ただし、大規模なネットワークでは、follow_up メッセージ内の TLV が大幅に大きくなります。この場合、実際のサイズまたは最も厳しいケースのサイズを適用する必要があります。

まとめ

TSN の設定プロトコルである 802.1Qcc が一般的に利用できるようになると、スケジュールを手動で計算する必要がなくなり、Web サーバーを使用してボードを設定する方法について問題がなくなります。ただし、スケジュールされたネットワークの影響と利点を理解することがこの技術の最初のステップです。スケジュールされたネットワークの性能をデバッグして理解するには、このレベルの理解が必要になります。収集された知識は、TSN がフィールドで完全に実装されたときに役立ちます。

アナログ・デバイセズの TSN 評価用キットは、現実世界の TSN の体験を収集するうえで便利かつ低コストな方法です。

参考資料

TSN Evaluation Kit Quick Start Guide、アナログ・デバイセズ

IEEE TSN 規格: 802.1AS、802.1Q、802.1Qbv