

# ホワイトラビットを使用した長距離同期

## はじめに：

White Rabbit (WR) は、同期イーサネットを使用した大規模な分散データ収集システムの同期に、数ナノ秒の正確さとピコ秒の精度を提供します。WR ネットワークは、測定データの高精度な時間タグ付けを可能にし大規模な設備でのトリガータイミングによるデータキャプチャを可能にします。この手法は、長距離でデジタル化 (A/D ボード) を同期するために使用できます。このホワイトペーパーでは、Seven Solutions 社の WR ハードウェアと Teledyne SP Devices (TSPD) 社の高性能デジタル化 (A/D ボード) を使用してこれを実現する方法について説明します。

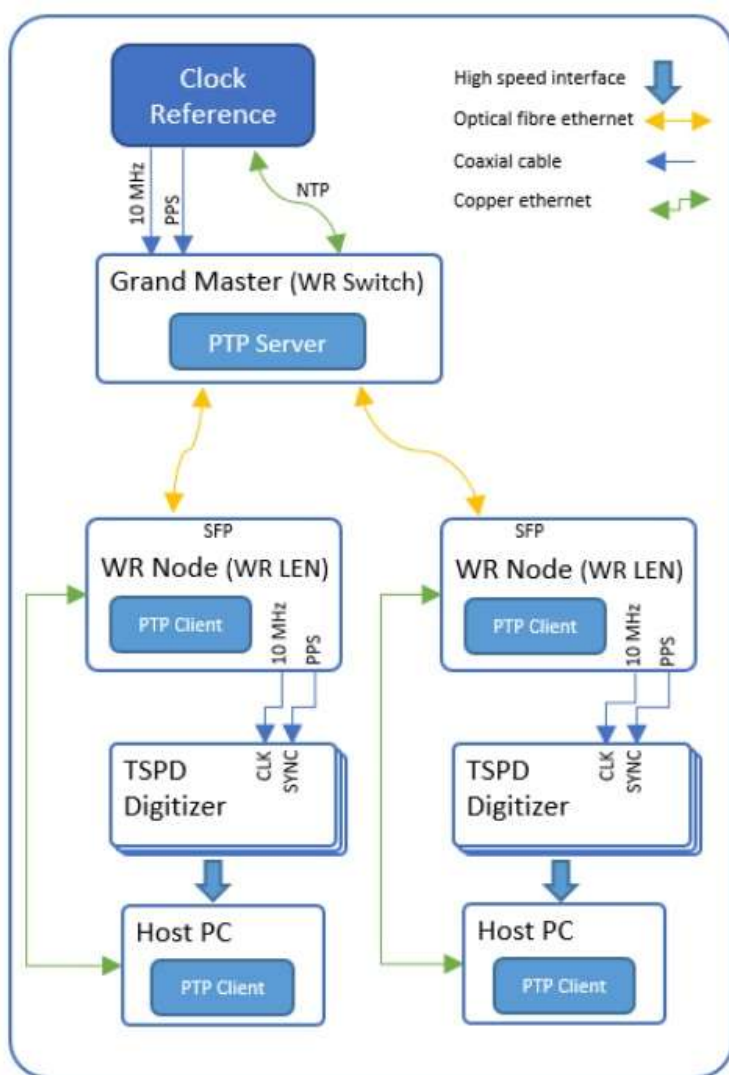


Figure 1 テスト用の White Rabbit ネットワークノード構成

長距離で接続されたデジタル化 (A/D ボード) ノードは、同期サンプリングを実行し異なるボード間でサンプルを関連付けることを可能にするために共通のクロックを必要とします。このような高精度の分配には、通常次の 3 つが含まれます。

- 一般的な基準クロック、通常は 10MHz。
- 毎秒最初のクロックエッジを示す 1 パルス/秒 (PPS) 信号。
- 日付と時刻。

White Rabbit は、光ファイバケーブルを介してノードを接続します。ケーブルの長さは数キロメートルで、ノード間はデジチェーンで接続できます。各ノードには 10MHz のクロックと PPS 出力信号がありますが、時刻は PTP を使用して配信されます。この方法は、市販のハードウェアと一般的な技術のみを使用しています。WR ネットワークは主にクロック分配に使用され、デジタル化 (A/D ボード) から大量のデータを転送するために使用することはできません。Figure 1 に示すように、各デジタル化 (A/D ボード) またはデジタル化クラスターにはホスト PC が必要です。

## デジタイザ (A/D ボード) の同期 :

TSPD 製デジタイザ (A/D ボード) によってキャプチャされた各データレコードには、ローカルタイムベースで高精度のタイムスタンプが付けられます。異なるデジタイザ間でタイムスタンプを比較できるようにするには、このローカルタイムベースとホワイトラビット時間の関係を見つける必要があります。この方法は、10MHz クロックと 1PPS 信号を使用して、既知の時間インスタンス  $t_{zero}$  でデジタイザ (A/D ボード) のタイムスタンプをリセットすることです。デジタイザ (A/D ボード) に接続されている各ホスト PC は、PTP を介して WR ネットワークと時刻と日付を同期させる必要があります。デジタイザ (A/D ボード) は、10MHz の基準クロックと PPS 信号を SYNC および CLK 入力に接続することによって同期されます。

同期は次の方法で実行されます。

1. WR ノードのスレーブ出力をデジタイザ (A/D ボード) のクロックリファレンスと同期入力に接続します。
2. PTP を使用して、ホスト PC のクロックを White Rabbit に同期します。
3. 10MHz クロックに同期した PPS のデジタイザタイムスタンプをリセットします。
4. PC の時計をサンプリングして最も近い秒単位 ( $t_{zero}$ ) に丸めます。

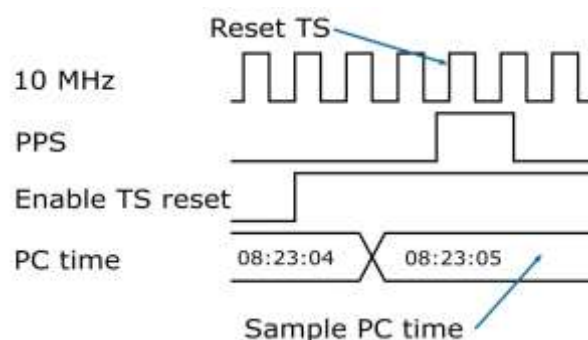


Figure 2 デジタイザのタイムスタンプリセットタイミング

手順の例を Figure 2 に示します。ホスト PC はタイムスタンプのリセットを開始し、リセットが完了するまで待機します。次に、PC 時間がサンプリングされ最も近い秒単位に丸められます。ここで説明している方法は、次の A/D ボードで使用できます。

- ADQ14
- ADQ7 (※精度は 400ps に制限されています)
- ADQ8

## 複数のデジタイザ (A/D ボード) を備えたシャーシ :

Figure 1 の WR ノードは、PXIe または MTCA.4 フォーマットのシャーシにインストールされたデジタイザ (A/D ボード) のセット、または複数の PCIe ボードまたは USB ボックスデジタイザのいずれかを利用した PC で構成することもできます。1 台の PC と 1 台の WR モジュールが複数のデジタイザ (A/D ボード) に対応します。

このテストは、USB ボックスおよび PCIe ボードのフロントパネル接続を使用して実行されました。PXIe および MTCA.4 の場合、フロントパネルのケーブル接続を回避するために、代わりにバックプレーン信号を使用することが重要な場合があります。PXIe には適切なバックプレーン信号クロックと PXITRIG、MTCA.4 には TCLK と MLVDS バス。これについては、さらに調査する必要があります。

## データ収集：

同期後、通常の方法でデータをトリガーにより取得できます。前述の同期手順により、デジタイザ（A/D ボード）のタイムスタンプと絶対時間の間には既知の関係があります。タイムスタンプと絶対時間の間の変換は、タイムスタンプに  $t_{zero}$  を追加することによって行われます。

## 同期パフォーマンステスト：

同期パフォーマンステストは、Figure 1 で説明されているセットアップを使用して測定されました。このテストでは、2つのADQ14 デジタイザ（A/D ボード）と、各デジタイザ（A/D ボード）のトリガー入力に接続された信号発生器を使用しました。同期パフォーマンス測定値は、2つのデジタイザ（A/D ボード）のトリガータイムスタンプ間の絶対時間差として定義されました。

2枚のボードは同じ長さのケーブルでトリガー信号に接続されており、理想的な条件下ではトリガーのタイムスタンプ差は2つの測定値間で異ならないはずですが。

デジタイザ（A/D ボード）間の同期は、100レコードをキャプチャし、平均タイムスタンプの差を計算することによって測定され、WR ノードとデジタイザの両方が各測定の間で再起動されました。

Figure 3 は、結果のヒストグラムを示しています。これらの測定値は、18 ピコ秒の同期精度（標準偏差）と225 ピコ秒の精度（オフセット）を示しています。これらの結果は、他の文献に示されている結果とよく一致しており、精度は似ていますがデジタイザ（A/D ボード）によって発生するジッタのために精度がわずかに劣っています。オフセットは再起動間で一定であったため、キャリブレーションができました。

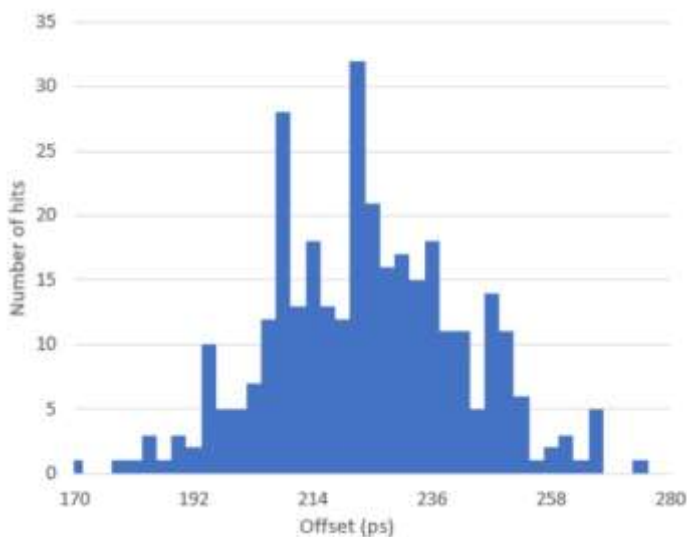


Figure 3 デジタイザ間のオフセットヒストグラム

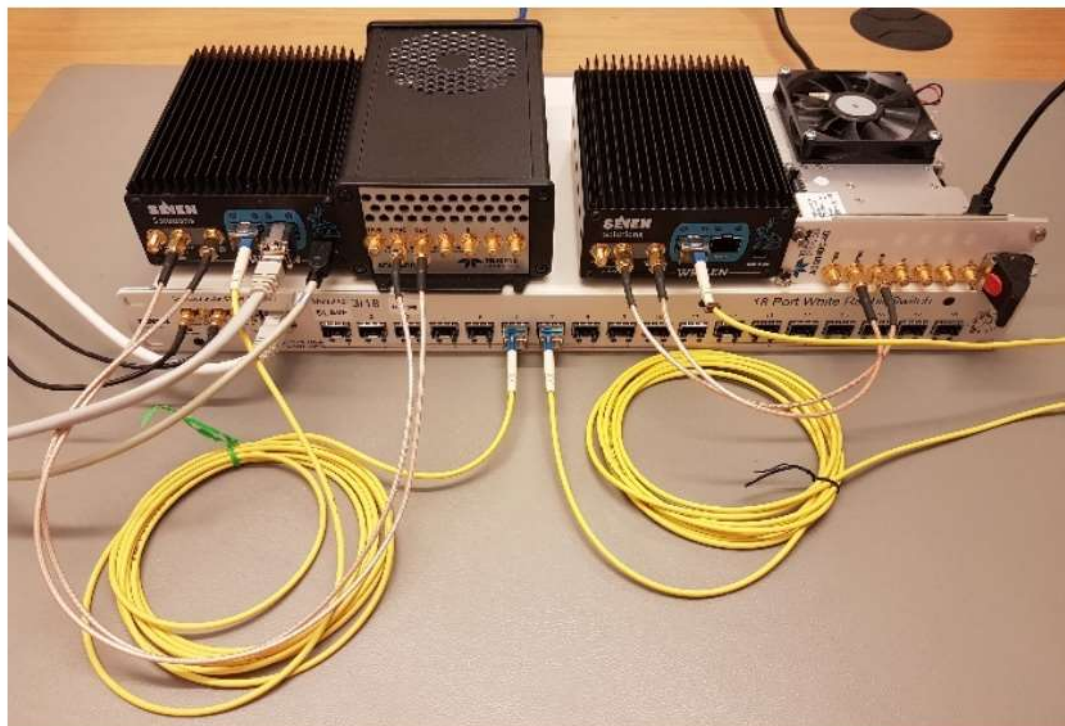


Figure 4 テストセットアップ

テストに使用されたハードウェア構成（Figure 4 参照）：

- 2個のADQ14 デジタイザ（Teledyne SP Devices 製）  
<https://www.spdevices.com/products/hardware/14-bit-digitizers/adq14>
- 1個のWR スイッチ（Seven Solution 製）  
<https://sevensols.es/index.php/index/timing-products/white-rabbit-switch/>
- 2個のWRLEN（Seven Solution 製）  
<https://sevensols.es/index.php/index/timing-products/wr-len/>
- 2個の1GbSFPRJ45 モジュール
- 光ファイバーおよび同軸ケーブル
- 信号発生器
- スプリッター



## Teledyne SP Devices 社について

Teledyne SP Devices は、世界をリードするモジュール式データ集録および信号生成機器を設計および製造しています。当社の製品は、特許取得済みのキャリブレーションロジック、最新のデータコンバータ、および FPGA テクノロジーを利用して、高いサンプリングレートと分解能の比類のない組み合わせを実現しています。製品には、さまざまなアプリケーション固有の機能と組み込みのリアルタイム信号処理があります。これにより、お客様はパフォーマンスのボトルネックを克服し、製品化までの時間を短縮し、幅広いアプリケーション分野でシステムレベルの利点を得ることができます。SP Devices の製品は、分析機器、リモートセンシング、科学機器、医療用画像など、さまざまな業界で採用されています。Teledyne SP Devices 社の詳細については、<https://spdevices.com/>を参照してください。