最適なオシロスコープの選択

デジタルトリガの重要性とは

White paper | Version 01.00

ROHDE&SCHWARZ
Make ideas real

目次

1 概要 3

2 デジタルトリガの歴史 4

3 デジタルアーキテクチャーとアナログアーキテクチャーの比較 4

4 デジタルトリガの利点 5
4.1 優れたトリガ感度 5
4.2 ユーザーによるヒステリシス制御 6
4.3 さまざまなフィルター 7
4.4 トリガへのHDモードの適用 7
4.5 補間 8
4.6 トリガジッタの抑制 9

5 デジタルトリガとアナログトリガの見分け方 10

6 まとめ 10

ローデ・シュワルツの製品

- ▶ R&S®MXO 4シリーズ オシロスコープ
- ▶ R&S®MXO 5シリーズ オシロスコープ
- ▶ R&S®RTO6シリーズ オシロスコープ
- ▶ R&S®RTPシリーズ オシロスコープ

1 概要

オシロスコープのトリガ機能は、関連する重要なイベントを捕捉する正確なタイミングを決定するものです。オシロスコープを購入した後は、トリガ機能が重要な選択パラメータであることを見落としがちです。優れたトリガパラメータやトリガ機能を持つオシロスコープでは、開発チームがデバッグとテストをすばやく効果的に行うのに役立つエッジが利用できます。優れたトリガシステムを利用すると、見つけるのが難しいイベントの切り分けに要する時間が大幅に短縮されるため、エンジニアはデザインの改善に要する時間を最小限に抑えることができます。

エンジニアは、帯域幅、レコード長、サンプリングレートなどの主要な仕様をすぐに見つけて比較します。オシロスコープのトリガ機能の「有効性」と品質についての比較評価は、こうした仕様に比べて捉えどころがないかもしれません。従来のオシロスコープのトリガ機能は、アナログ回路に基づいたもので、信号はデータ経路とトリガ経路に分割されます。新しいオシロスコープのアーキテクチャーでは、単一経路を信号とトリガの両方で共有するようになっています。この単一経路のアプローチは、デジタルトリガと呼ばれます。デジタルトリガには、従来のアナログトリガアーキテクチャーにはない、さまざまな利点があります。

このアプリケーションノートでは、以下の内容について説明します。

- デジタルトリガアーキテクチャーとアナログトリガアーキテクチャーの比較
- デジタルトリガ機能を搭載したオシロスコープのユーザーから見た利点
- オシロスコープがデジタルトリガ／アナログトリガのどちらを搭載しているかを見分ける方法

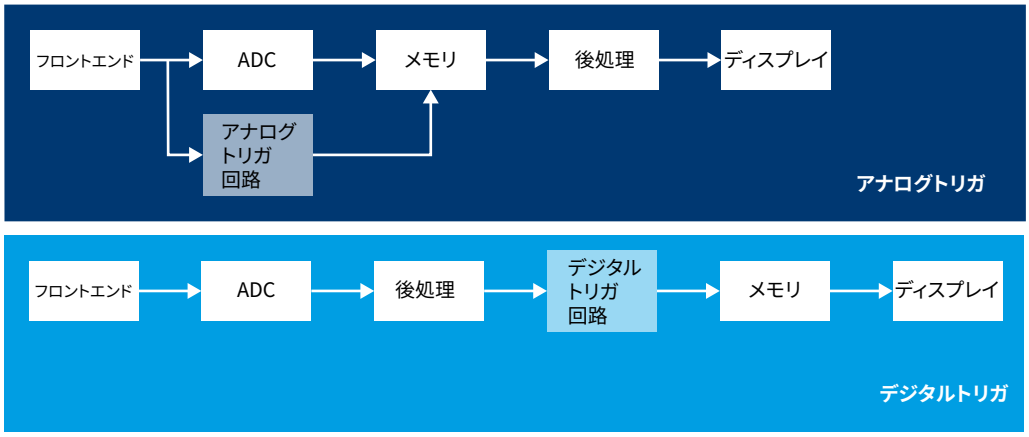
2 デジタルトリガの歴史

ローデ・シュワルツは、オシロスコープのデジタルトリガの最初の方式の特許を取得し、これらを初めて使用して、R&S®RTO1000 オシロスコープを導入しました。R&S®MXO シリーズ、R&S®RTO6およびR&S®RTP オシロスコープなどのローデ・シュワルツの新しいオシロスコープでは、デジタルトリガが基本機能として実装されています。

3 デジタルアーキテクチャーとアナログアーキテクチャーの比較

使用されている大半のオシロスコープには、アナログトリガが搭載されています。アナログトリガアーキテクチャーを使用するオシロスコープでは、入力信号がデータ経路とトリガ用の経路に分割されます。トリガ回路はデータ経路から切り離されています。ユーザーは、オシロスコープのディスプレイでトリガ信号を確認できません。アナログトリガ回路では、この切り離された信号を評価します。オシロスコープでは、RF除去などの簡単なトリガ経路フィルターを追加してトリガ経路のノイズを除去できます。トリガ経路に適用されるフィルターは、信号経路に適用可能な広範で能力の高い後処理フィルターとは異なるものです。アナログトリガ回路はASICやFPGAで実装される場合もあれば、既製のコンポーネントで実装される場合もあります。

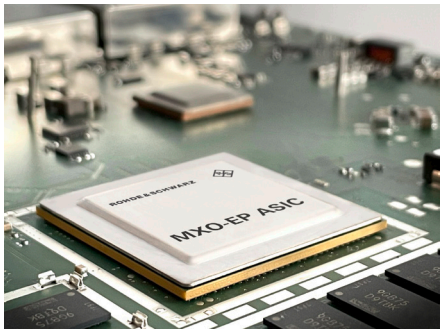
図1：アナログトリガ回路とデジタルトリガ回路の比較



特許取得済みのデジタルトリガアーキテクチャーを使用したオシロスコープでは、信号経路とトリガ経路が同じです。トリガイベントの評価は、オシロスコープのADCの後で行われます。トリガ信号はデータ経路の信号と同じであるため、ユーザーはオシロスコープのディスプレイでトリガ信号を確認できます。補間、帯域幅フィルタリング、ディエンベディングなどの捕捉後のフィルターはすべて、オシロスコープでトリガ条件の評価が行われる前に、リアルタイムで適用できます。

図2：R&S®MXO 4およびR&S®MXO 5 シリーズ オシロスコープ。MXO-EP (Extreme Performance) ASICに専用のデジタルトリガブロックが搭載されている

26 nm CMOS ASICには、3,600万超のゲートが搭載されており、200 Gビット／秒を処理できます。



4　デジタルトリガの利点

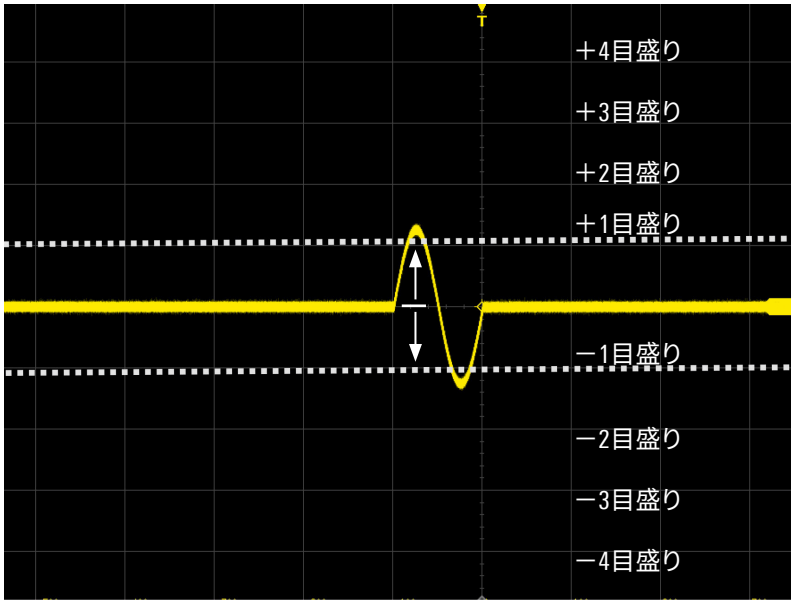
4.1　優れたトリガ感度

オシロスコープのトリガ感度は、オシロスコープがトリガイベントを正確に特定するのに必要な最小信号振幅で規定されます。オシロスコープメーカーによっては、オシロスコープのディスプレイを8または10の垂直軸目盛りに分割するグリッドマーカーがあります。オシロスコープの仕様書には、トリガ回路でトリガイベントを正しく識別できるようにするのに必要な信号振幅の垂直軸目盛りの数が示されます。

例えば、垂直軸1 divのトリガ感度が規定されているオシロスコープを100 mV/divに設定した場合、オシロスコープで正確にトリガするには、エッジなどのトリガ信号は振幅が100 mV以上でなければなりません。8つの垂直軸目盛りを持つオシロスコープでは、1 divはフルスクリーン垂直軸の12.5 %となるため、1 divは125 mVの振幅に相当します。一部のオシロスコープでは、トリガ感度は単独の仕様ではなく、垂直軸スケール (V/div)、帯域幅、トリガタイプによって変化します。

図3：トリガ感度の定義

トリガ感度は、オシロスコープが信号をトリガイベントとして検出するのに必要な信号振幅に対して定義され、垂直軸目盛り数で表されます。

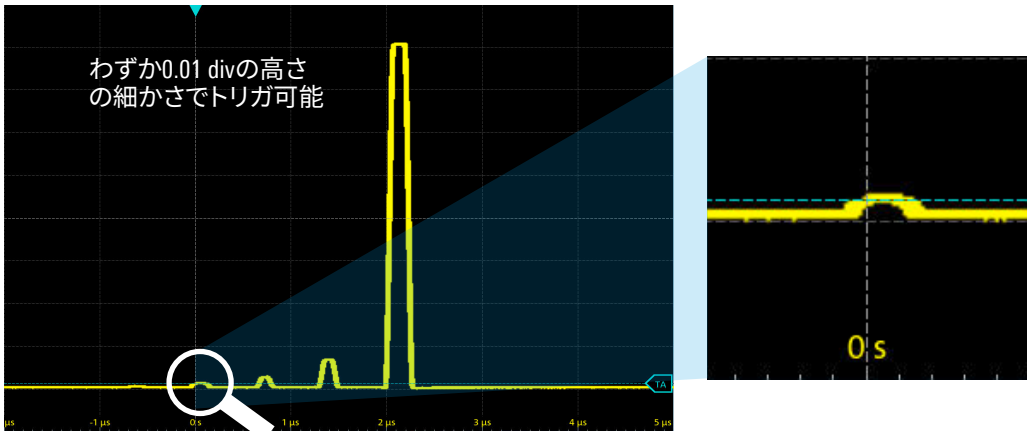


デジタルトリガは、アナログトリガよりも振幅の小さな信号でトリガできます。なぜ、これが重要なのでしょうか。トリガ感度が優れていると、ユーザーはトリガを使って大信号が存在する状態で小信号を分離できます。

ここで、例を使って説明します。R&S®MXO 4およびR&S®MXO 5 シリーズ オシロスコープのトリガ感度は0.0001 divです。このオシロスコープを10 mV/divに設定した場合、垂直軸全体の高さは100 mVになります。驚くことに、このオシロスコープは、100 mVの1/10,000、つまり10 µVの振幅の信号でトリガできます。振幅の小さな信号は、測定ノイズで波形が隠れてしまうことがあります。ローデ・シュワルツのオシロスコープのHDモードには、ノイズを減らすために帯域幅をトレードオフする方法が用意されており、こうした小さな信号振幅変化でのトリガを可能にするためトリガにHD信号が提供されます。

図4：業界最高の感度を備えたトリガ

R&S®MXO 4およびR&S®MXO 5 シリーズなどのオシロスコープでは、わずか0.0001 divのデジタルトリガ感度が利用できます。
このため、オシロスコープのディスプレイに同時に現れる大きな信号振幅に対して非常に小さな振幅でイベントを分離できます。

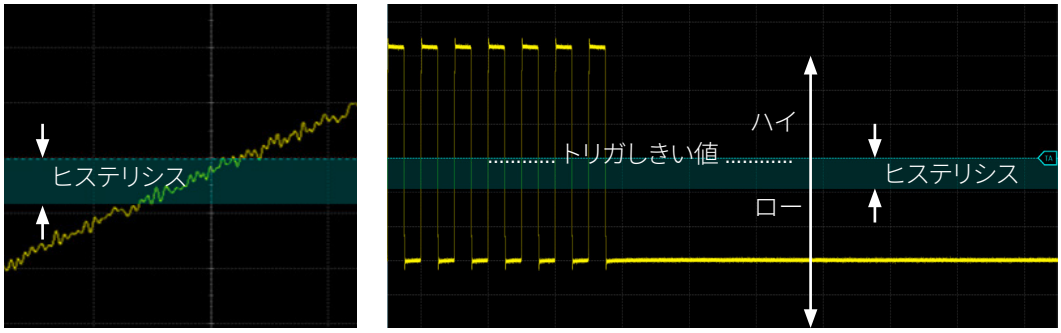


4.2　ユーザーによるヒステリシス制御

ユーザーはトリガしきい値を指定し、ノブを回すか、ダイアログでトリガレベルを入力して、この値を制御できます。信号がこのしきい値を通過したときに、オシロスコープがこの変化をトリガイベントとして認識するには、信号がしきい値レベルを一定の振幅だけ上回る必要があります。トリガヒステリシスは、指定のトリガレベルを超える部分の振幅量です。

図5：トリガヒステリシスによる高いトリガ柔軟性

オシロスコープのすべてのトリガソースには、ローからハイへの遷移を決めるしきい値の設定があります。
エッジのようなトリガタイプでは、ヒステリシスによってトリガイベントとして認識されるのに必要な信号が遷移する
最小振幅量が決まります。ヒステリシスは、オシロスコープが測定ノイズや信号ノイズでトリガしないようにするのに便利です。

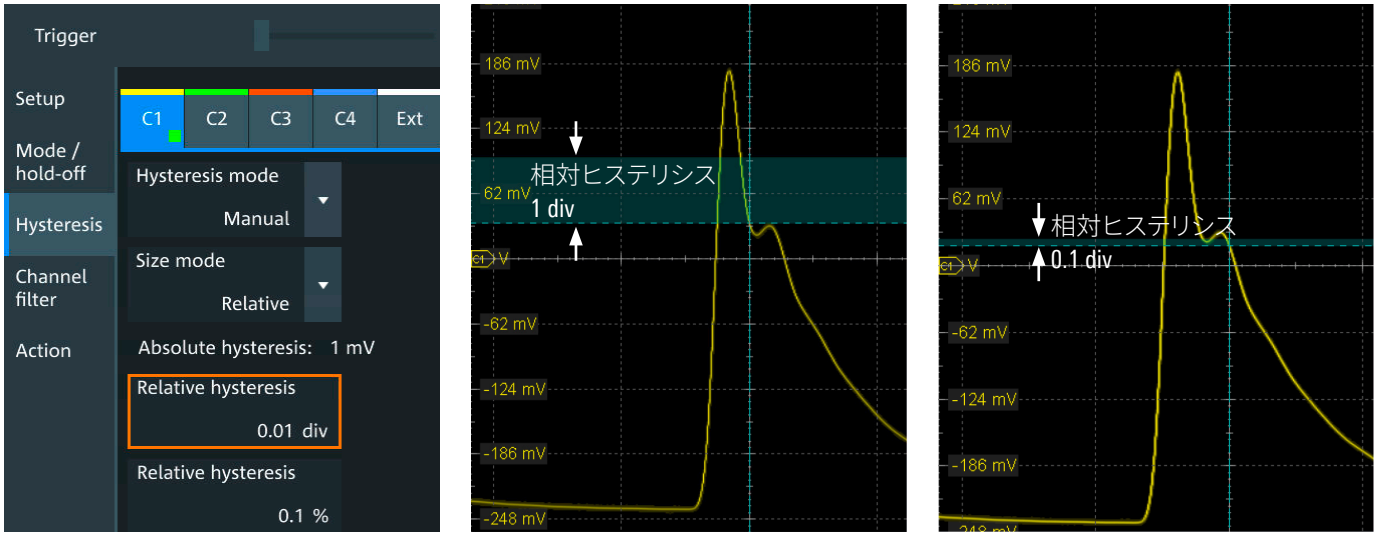


アナログトリガを備えたオシロスコープの場合、ヒステリシスはメーカーによって内部で設定されているため、一般にユーザーが調整することはできません。また、いくつかのプリセット値が用意されている場合もあります（RF除去）。新しいデジタルトリガを備えたオシロスコープの場合は、アナログトリガと同等の設定値でヒステリシスの振幅量を自動設定できます。さらに、デジタルトリガのヒステリシス値を、ユーザーが決めた相対値や絶対値に合わせて調整することもでき

ます。ユーザー調整可能なヒステリシスを利用すると、ノイズによる間違ったトリガを解消するために高い値を設定したり、信号振幅のわずかな変化でトリガするように小さな値を設定したりすることができます。

図6：デジタルトリガでのユーザーによるトリガヒステリシスの制御

このような柔軟性により、ユーザーはアナログトリガでは簡単に分離できない波形のさまざまな部分でトリガできます。

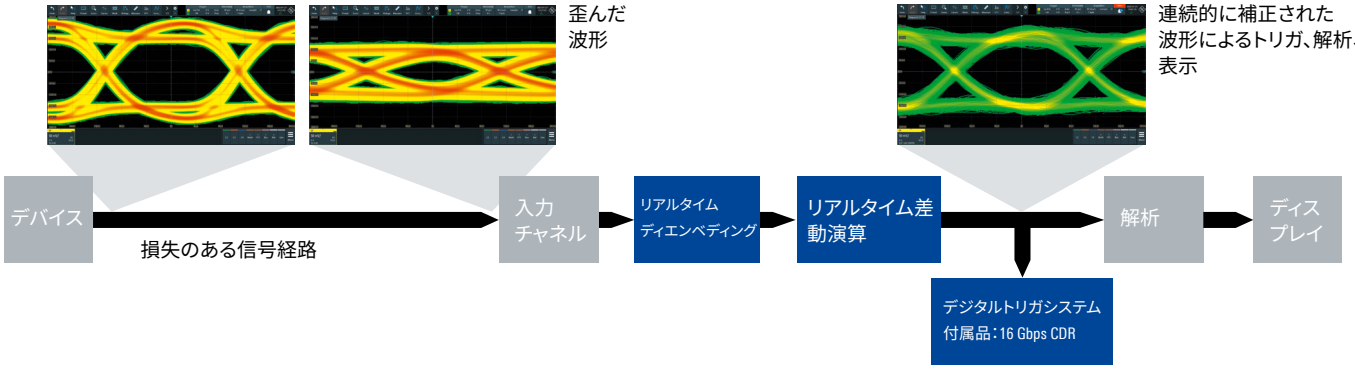


4.3 さまざまなフィルター

市販されているオシロスコープには、信号を表示するためのさまざまなフィルターが用意されています。例えば、帯域制限フィルターなどです。帯域制限フィルターは、アナログハードウェアで実装される場合、（通常FPGAで）DSPアルゴリズムを使って実装される場合、ソフトウェアで実装される場合があります。アナログトリガアーキテクチャーを使用するオシロスコープの場合、信号経路のフィルターはトリガ回路からは認識されません。デジタルトリガアーキテクチャーを使用するオシロスコープの場合、フィルターはデジタルトリガ、表示／解析対象の信号、またはその両方に適用できます。これには、オシロスコープに表示される内容とオシロスコープのトリガによる評価が完全に一致するという利点があります。

図7：アナログトリガを備えたオシロスコープは表示される信号だけにディエンベディングを適用し、トリガには適用しない

R&S®RTP オシロスコープでは、トリガの前にリアルタイムディエンベディングが適用されるため、オシロスコープはディスプレイに表示されるのと同じディエンベディング済みの信号でトリガできます。



4.4 トリガへのHDモードの適用

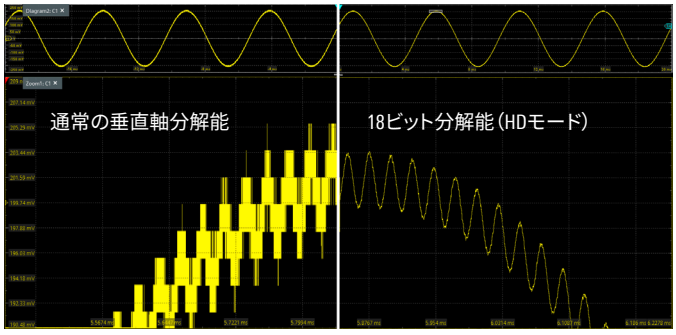
振幅の小さな信号では、オシロスコープのノイズによって表示対象の信号やトリガ対象の信号が隠れてしまうことがあります。オシロスコープでは、固有のシステム測定ノイズに振幅が埋もれてしまう小信号でトリガすることは不可能です。ほとんどのオシロスコープには、帯域幅と垂直軸分解能をトレードオフできる捕捉モードが用意されています。このモードは、高分解能モード、eResモード、HDモードなどの名称で呼ばれます。高分解能の場合、移動ボックスカーフィルター

によって隣接するサンプルが平均化されて実効サンプリングレートが低下しますが、垂直軸分解能は向上します。アナログトリガを備えたオシロスコープの場合、高分解能は信号経路のみに適用され、トリガ経路には適用されません。

R&S®MXO 4およびR&S®MXO 5 シリーズのようなデジタルトリガを備えたオシロスコープの場合は、HD（高分解能）モードで、DSPベースのフィルターを適用して帯域幅と垂直軸分解能をトレードオフすることができます。HDモードでは、最大18ビットのトリガ分解能を実現でき、帯域幅削減によるノイズ抑制も利用できます。このため、システム測定ノイズを大幅に減らし、トリガ感度を先ほど説明したものよりも高い値に高めることができます。R&S®MXO 4およびR&S®MXO 5 シリーズのHDモードは、トリガ分解能を18ビットに高めることで1 kHzにまで対応できます。

図8：HDモードとローデ・シュワルツのデジタルトリガの併用

アナログトリガを備えたオシロスコープと異なり、ローデ・シュワルツのデジタルトリガアーキテクチャーでは、表示される信号やトリガに対してHDモードをリアルタイムで適用できます。



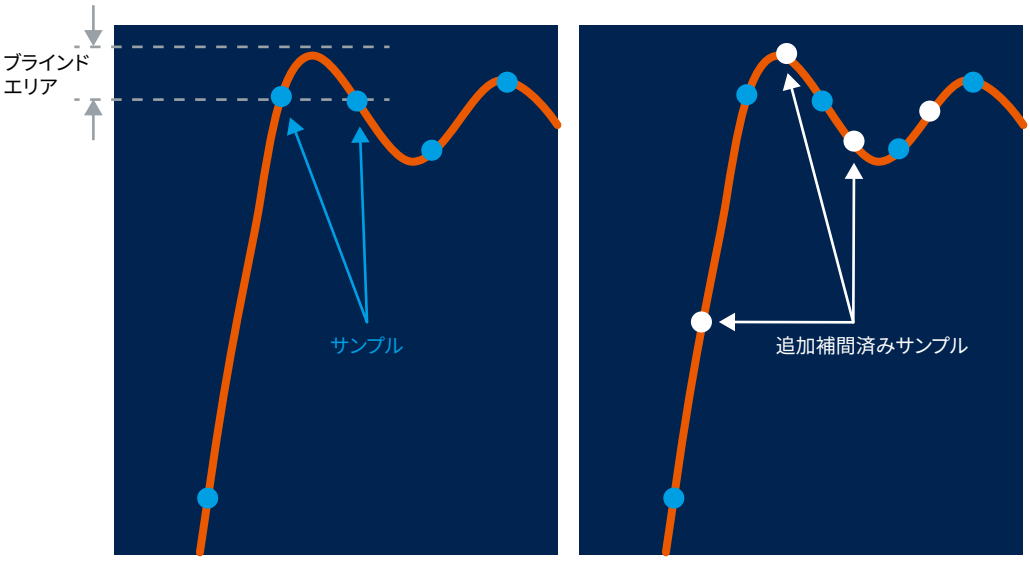
4.5　補間

アナログトリガ回路を備えたアーキテクチャーでは、ユーザー信号の一部がトリガ経路に分割されます。このトリガ経路はアナログです。そのため、一般に、これらのアナログ回路では、しきい値範囲の増分単位が粗くなります。例えば、しきい値の設定値が100 mVの単位に制限されます。

デジタルトリガの場合は、設定された垂直軸範囲、つまりオシロスコープのディスプレイに収まる範囲で、ユーザーが任意のしきい値を選択できます。これは、デジタルトリガアーキテクチャーでは、ADCの後で信号の評価が行われるためです。情報がデジタルであるため、サンプリングされたポイント間の補間に基づいてトリガを決定することもできます。

図9：デジタルトリガは補間を利用してより正確なトリガレベル値を実現

デジタルトリガでは、サンプルポイント間の補間を利用してトリガの死角になる領域を解消できます。このため、トリガ感度を0.0001 divにまで高めることができます。

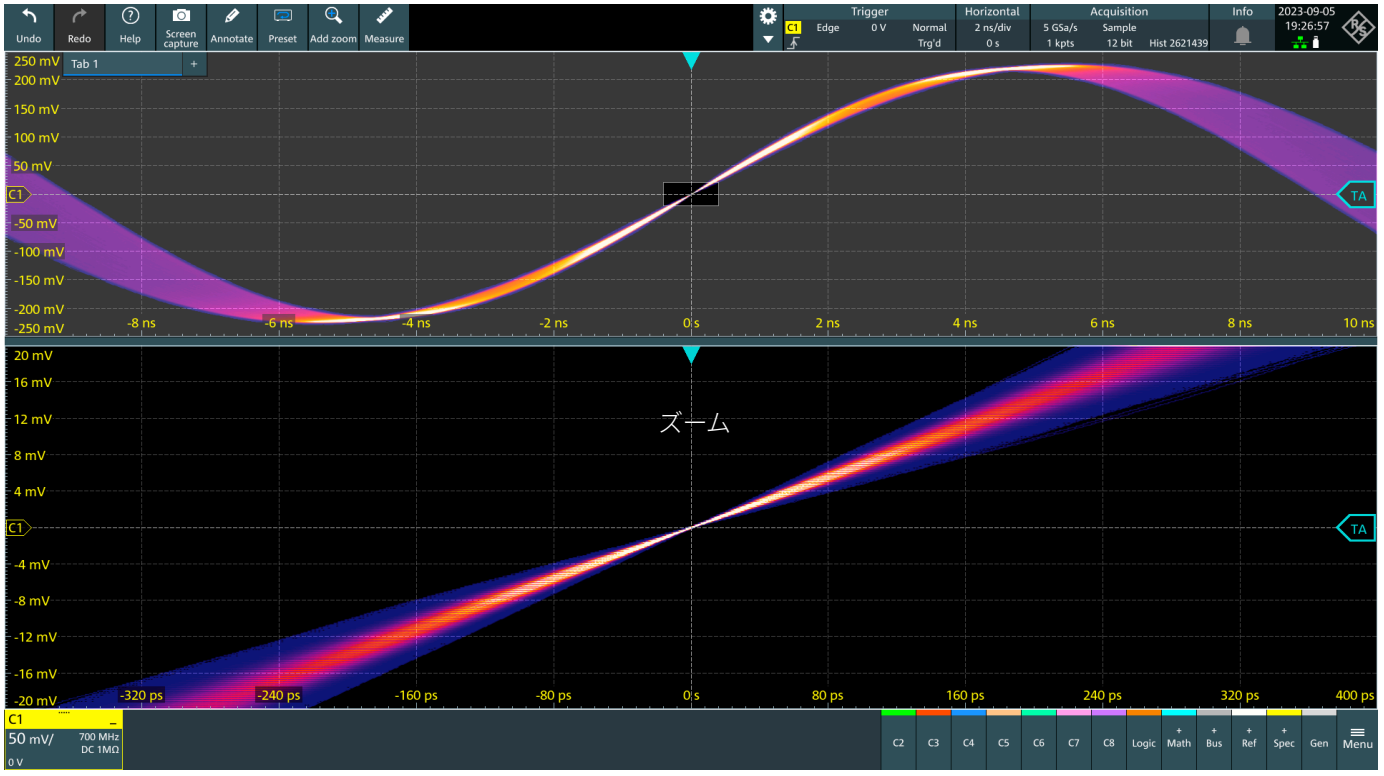


4.6　トリガジッタの抑制

アナログトリガを搭載したオシロスコープは、デジタルトリガを備えたオシロスコープよりもトリガジッタの影響を受けやすくなります。アナログトリガの場合、トリガ経路と信号経路は異なります。トリガ経路でトリガイベントが検出されたときに、オシロスコープでは関連する信号経路で正確な時間を特定する必要があります。連続して捕捉を行っていると、ユーザーはある程度のトリガジッタがあることに気付くはずです。一部のオシロスコープメーカーは、トリガジッタをソフトウェアベースで補正する機能を提供しています。この機能はトリガジッタを最小化するのに非常に効果的ですが、規定の処理サイクルが必要であるため、トリガ再アーミング時間とオシロスコープの全体的な更新速度が遅くなります。

図10：デジタルトリガを搭載したオシロスコープではトリガジッタが最小限に抑えられる

R&S®MXO 4およびR&S®MXO 5 シリーズの場合、トリガジッタは< 1 psでクラス最小レベルです。



5　デジタルトリガとアナログトリガの見分け方

ほとんどのオシロスコープのトリガはアナログトリガです。仕様書に記載されていない場合は、古いアナログトリガが搭載されていると考えられます。特定のオシロスコープにデジタルトリガまたはアナログトリガのどちらが搭載されているかは、オシロスコープメーカーに確認してください。また、オシロスコープの仕様書に記載されたいつくかの項目から、デジタルトリガかアナログトリガかを推測することもできます。

- トリガ感度：トリガ感度が0.1 divよりも小さい場合、このオシロスコープはデジタルトリガアーキテクチャーです。アナログトリガでは、この感度を実現できません。
- ユーザーによるヒステリシス制御：ユーザーがさまざまな大きさのヒステリシス値を設定できる場合（例：5 div～0.01 div）、このオシロスコープにはデジタルトリガが搭載されています。アナログトリガでは、ユーザーはいつかのプリセット条件を選択できますが、ヒステリシス制御を細かく設定することはできません。
- トリガ再アーミング時間：（専用モードではなく）ノーマルモードで最小トリガ再アーミング時間が数十～数百ナノ秒程度である場合、このオシロスコープはデジタルトリガアーキテクチャーであると考えられます。

6　まとめ

デジタルトリガ回路には、従来のアナログトリガ技術にはないさまざまな利点があります。デジタルトリガの特性を理解しておくと、オシロスコープを選ぶ際に、これらの利点の重要性を見極めやすくなります。

ローデ・シュワルツは、デジタルトリガ機能を組み込んだASICテクノロジーへの投資を行ってきました。デジタルトリガ機能を備えたローデ・シュワルツのオシロスコープには、以下のものがあります。

- R&S®MXO 4 シリーズ オシロスコープ：新世代のR&S®MXO オシロスコープの最初の製品です。それぞれの製品には、デジタルトリガ機能を含むMXO-EP（Extreme Performance）ASICテクノロジーが搭載されており、同クラスで最も感度の高いトリガ機能を備えています。
- R&S®MXO 5シリーズ オシロスコープ：8チャネルオシロスコープで最も感度の高いトリガ機能を備えた製品です。それぞれの製品には、デジタルトリガ機能を含むMXO-EP（Extreme Performance）ASICテクノロジーが搭載されています。
- R&S®RTO6 オシロスコープ：ローデ・シュワルツが開発したデジタルトリガ機能を含むASICを搭載した製品です。0.0001 divという業界最高レベルのトリガ感度が各モデルの標準構成となっています。
- R&S®RTP オシロスコープ：R&S®RTO6と同じデジタルトリガASICを搭載した製品で、同様に業界最高レベルのトリガ感度を備えています。R&S®RTPのデジタルトリガは、フル帯域幅（最大16 GHz）で実行されます。また、ディエンベディング済みの信号に対するトリガなど、他にもさまざまなトリガ機能を備えています。

図11：ローデ・シュワルツはオシロスコープのデジタルトリガを他社に先駆けて開発

すべてのR&S®MXO シリーズ、R&S®RTO6、R&S®RTP オシロスコープには、デジタルトリガ機能が搭載されています。

パラメータ	R&S®MXO 4シリーズ	R&S®MXO 5シリーズ	R&S®RTO6シリーズ	R&S®RTPシリーズ
デジタルトリガ内蔵	•			
ユーザー選択可能なトリガヒステリシス	•			
最小トリガ感度	0.0001 div			
最小トリガ再アーミング時間（ランモード、20 ns/div）	21 ns		2.5 µs	3.5 µs
トリガジッタ	＜1 ps			＜80 fs

ローデ・シュワルツ
ローデ・シュワルツはテクノロジーグループとして、電子計測、テクノロジーシステム、ネットワーク／サイバーセキュリティの分野の最先端ソリューションを提供することで、安全でつながり合った世界の実現を先導する役割を果たしています。創業から90年を超えるこのグループは、全世界の産業界と政府機関のお客様にとっての信頼できるパートナーです。本社をドイツのミュンヘンに構え、独立した企業として、70か国以上で独自の販売／サービスネットワークを展開しています。

www.rohde-schwarz.com/jp

ローデ・シュワルツ カスタマーサポート
www.rohde-schwarz.com/support

R&S® は、ドイツRohde&Schwarz の商標または登録商標です。
掲載されている記事・図表などの無断転載を禁止します。
PD 3609.0008.56 | Version 01.00 | 12月 2023 (sk) | White paper
最適なオシロスコープの選択: デジタルトリガの重要性とは
おことわりなしに掲載内容の一部を変更させていただくことがあります。
あらかじめご了承ください。
© 2023 Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG | 81671 Munich, Germany

3609000856
3609.0008.56 01.00 PDP/PDW 1 ja