

革新的なトリガ機能のご紹介

トリガを使いこなしてデバッグ効率を高めよう！

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



目次

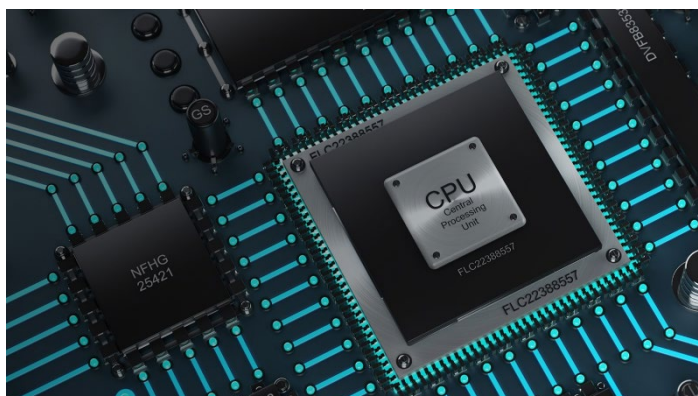
1 トリガ機能の必要性	3
2 高度なトリガシステムで信号を確実に捕捉	4
2.1 アナログトリガシステムのデメリットとは	4
2.2 デジタルトリガシステムのメリットとは	7
2.3 デジタルトリガの実測例	8
3 各種トリガ機能のご紹介	9
3.1 グリッチトリガ機能	9
3.2 パルス幅トリガ機能	10
3.3 ラントトリガ機能	12
3.4 タイムアウトトリガ機能	13
3.5 パターントリガ機能	15
3.6 シリアルパターントリガ機能	18
3.7 ゾーントリガ機能	21
4 まとめ	24
5 参考文献	25

1 トリガ機能の必要性

このホワイトペーパーでは、オシロスコープに搭載されているトリガ機能を使いこなしてデバッグ効率を高めるための手法について説明します。

初めに、トリガ機能の必要性について説明したいと思います。デジタル回路のデバッグにおいて、回路は約 99.9 %以上の時間は正常に動作しています。ところが、0.1 %あるいはそれ以下の割合でシステムクラッシュする可能性があります。こうした 0.1 %程度しか発生しない不具合現象をオシロスコープの画面に制止させ、その前後あるいは他のチャンネルで何が発生しているのかを確認してデバックするために使用するのがトリガ機能です。つまり、0.1 %程度しか発生しない不具合現象に素早くトリガを掛けることができれば、デバッグ効率が飛躍的に高まることは想像に難くありません。

一般に、トリガ機能と言えば、エッジトリガが主に使用されておりますが、複雑かつ稀にしか生じない不具合現象を補足するために、さまざまな種類のトリガ機能が用意されています。はじめに、トリガシステムについての説明を行います。トリガシステムは、アナログトリガシステムとデジタルトリガシステムの2種類のシステムが存在します。そして、そのシステム上で動作する各種トリガ機能についての解説および具体的な使用法について紹介します。



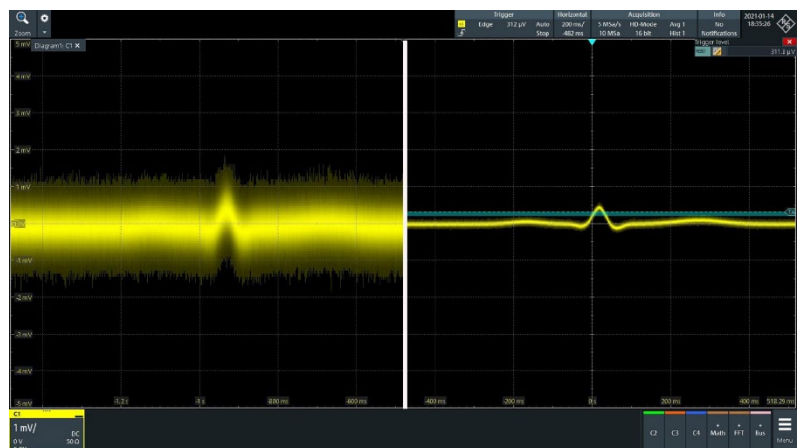
2 高度なトリガシステムで信号を確実に捕捉

ここからは具体的なトリガシステムについて、アナログトリガシステムとデジタルトリガシステムの両方について説明します。

2.1 アナログトリガシステムのデメリットとは

従来のオシロスコープには、アナログトリガシステムが採用されています。しかしながら、このシステムには残念ながらいくつかの欠点があります。一つはトリガ感度という仕様があり、測定信号がトリガ感度の範囲を超えない限りトリガを掛けることができません。

さらに、このトリガ感度は測定帯域が広がるほど低くなるため、高速デジタル信号のような早い立ち上がりを持つような信号や、ノイズのような高周波成分を含む信号をトリガするためには、より高いレベルの入力信号が必要となります。つまり、低電圧電源で駆動するような回路のデバッグにおいては、トリガ感度の不足により不具合信号やノイズに対してトリガを掛けることができない、という致命的な問題を引き起こす可能性があります。



以下の図では、オシロスコープの画面上にトリガ感度の範囲を青色の帯で示しています。図 1 の例では、測定信号がこのトリガ感度の範囲を下から上に横切っているポイントでトリガがかかっていることが分かります。このように、トリガ感度よりも高いレベルの信号であれば、トリガを掛けることができます。

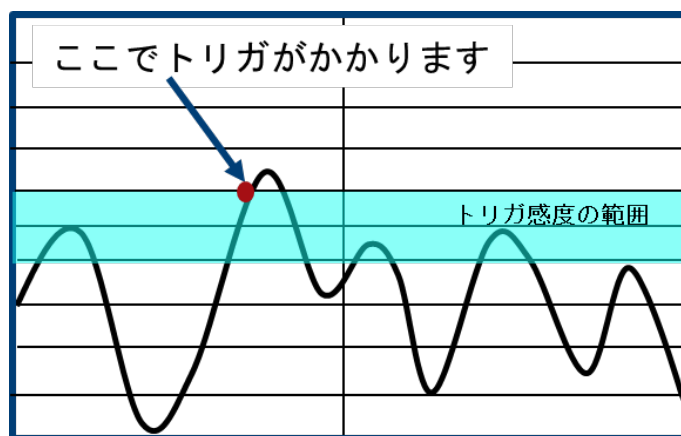


図 1 トリガ感度よりも高いレベルの信号

これに対して図 2 の例では、測定信号のレベルが低いためトリガ感度の範囲を下から上に（あるいは上から下に）横切らないため、トリガが掛かりません。繰り返しますが、このようにトリガ感度よりも低いレベルの信号に対しては、残念ながらアナログトリガ回路は機能しないことを理解しておくことが重要です。

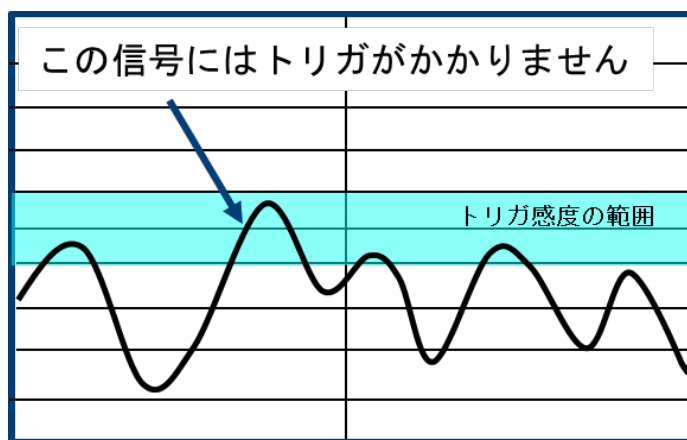


図 2 トリガ感度よりも低いレベルの信号

さらに、図 3 の左側にアナログトリガシステムの概念図を示します。この図を見ていただくとわかるように、測定信号とトリガ信号の経路が異なるため、トリガ信号と測定波形のタイミングにズレが生じます。このため、図の右側に示すように測定波形を画面に表示させた場合、このズレがトリガジッタとなります。これは、特に高速デジタル信号の評価においては致命的であり、評価しているデバイスのジッタ量をさらに増大させる原因にもなります。こうした問題に対応するために、タイミング補正回路を設けてタイミングのズレを補正しジッタ量を低減させる処理をおこなっていますが、残念ながらこうした追加処理により波形の更新速度が遅くなるというデメリットが生じます。波形の更新速度が遅くなることで、今度は稀にしか生じないような不具合波形を観測できなくなり、デバッグ用途としてオシロスコープの機能を十分に果たせなくなります。

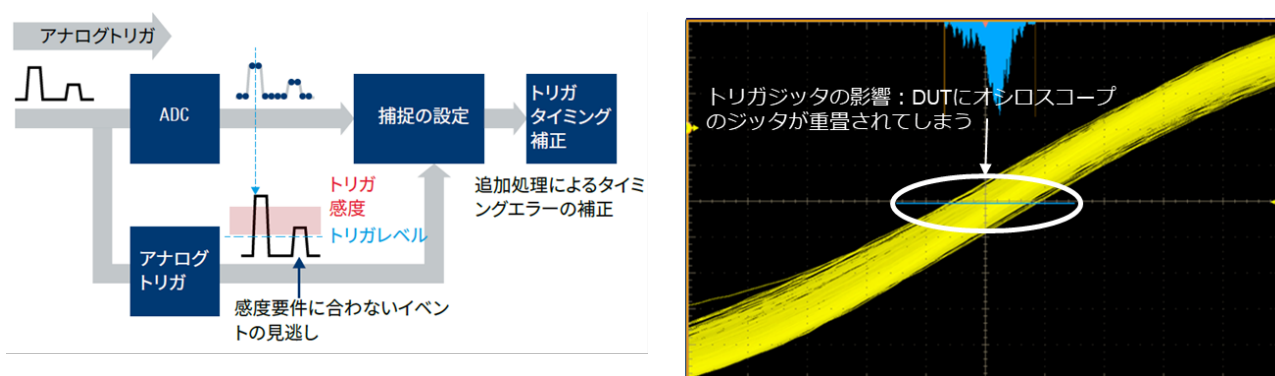


図 3 アナログトリガシステム

2.2 デジタルトリガシステムのメリットとは

次に、デジタルトリガシステムのメリットを説明します。デジタルトリガシステムは、業界で唯一、ローデ・シュワルツのオシロスコープだけが搭載しているトリガシステムで、ローデ・シュワルツが特許を持っています。図4に示すように、アナログトリガシステムとは異なり、デジタルトリガシステムは測定信号とトリガ信号の経路が共通です。そのため、トリガジッタはわずか1 psec 程度しか生じません。さらに、トリガタイミングの補正も不要なため、波形更新速度の低下が生じないので高速デジタル回路等のデバッグツールとしては最適な機能となっています。

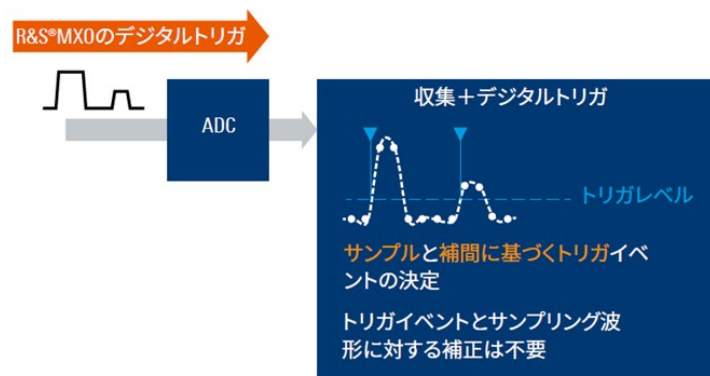


図4 デジタルトリガシステム

さらに、トリガ感度という概念がないため、設定したトリガレベル（図5では青線の部分）を信号が通過すれば確実にトリガがかかります。さらに、ハードウェアトリガと同様にシングルショット、つまり単発信号も捕捉することができます。

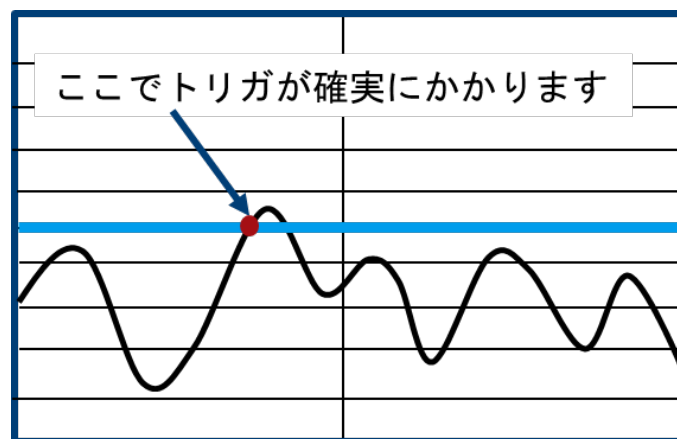


図5 デジタルトリガシステムによる波形の捕捉

2.3 デジタルトリガの実測例

ここからは、デジタルトリガシステムを使用した実測例を示します。図6に示すように、この信号は大きな信号の後に続けて、レベルが段階的に低くなっている3つの信号がオシロスコープに入力されています。そしてこれらの信号は、縦軸 1 div. (100 mV) スケール以内にある非常に小さな信号です。

通常、アナログトリガシステムのトリガ感度は周波数帯域にも依存しますが、1 div. あるいはそれ以上の範囲が必要となるため、この小さな信号に対してトリガをかけることができません。これに対してデジタルトリガシステムは、わずか 0.01 div. の高さの信号に対してトリガをかけることが可能となります。これは、他社製品と比較して最大 10,000 倍も高い感度を実現していることになります。



図6 デジタルトリガによる測定例

3 各種トリガ機能のご紹介

ここまでは、トリガシステムに関する説明をしてきましたが、これ以降は具体的なトリガ機能の説明となります。トリガ機能の特長や使い方を理解することで、直面している問題に対する最適なトリガ機能の選択が行えるようになるため、デバッグ効率を向上させることができます。

3.1 グリッチトリガ機能

グリッチトリガを説明する前に、グリッチ信号とは何かということを理解することは重要です。グリッチ信号とは、デジタル信号に含まれる異常パルスのことを指します。デジタル伝送等において、こうしたグリッチが発生すると、グリッチ信号が誤ったデータビットとして伝送される可能性があり、システムエラーのデバッグに有効なトリガ機能です。

図 7 にグリッチトリガの設定例を示します。指定されたパルス幅（Width、ここでは 30 ns）より、短いまたは長い幅（Range、ここでは Shorter）で、パルス極性（Polarity、ここでは Positive）を検出し、トリガレベル（Level、ここでは 1.69 V）で測定する設定としています。

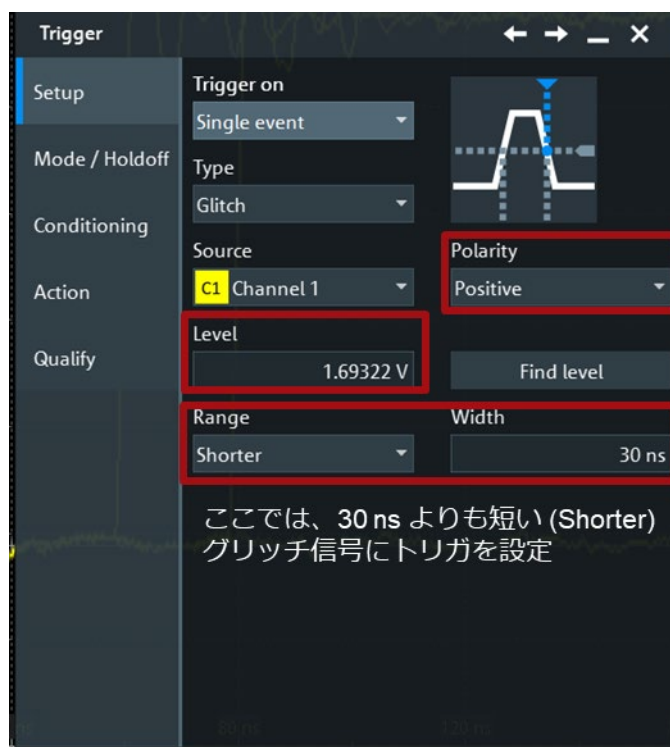


図 7 グリッチトリガの設定例

図 8 にグリッチトリガを使用した実際の測定例を示します。前述のように、30 ns 以下で正パルスのグリッチ信号に対してトリガを設定することで、デジタル信号内に存在する特定のグリッチ（ここでは白枠で囲まれている 30 ns 以下の正パルス）をトリガで捕捉していることが分かります。



図 8 グリッチトリガによる測定例

3.2 パルス幅トリガ機能

ここではパルス幅トリガについて説明します。パルス幅トリガとは、指定された時間よりも短い、または長い時間のパルスを検出することができるトリガ機能です。そして、パルスの極性は正および負、あるいは両方の設定が可能で、幅はトリガレベルで測定されます。グリッチトリガよりも正確にパルスを定義できる点が特徴となります。

図 9 にパルス幅トリガの設定例を示します。指定されたパルス幅（Width、ここでは 200 ns）より、短いまたは長い幅（Range、ここでは Within）で、パルス極性（Polarity、ここでは Positive）で検出し、トリガレベル（Level、ここでは 1.67 V）で測定する設定としています。グリッチトリガよりも正確にパルス幅を定義できる（±Delta、ここでは 100 ns）の設定ができます。また、グリッチ信号と同様に、定義されていないパルス幅を持つ信号によるシステムエラーのデバッグに有効なトリガ機能です。

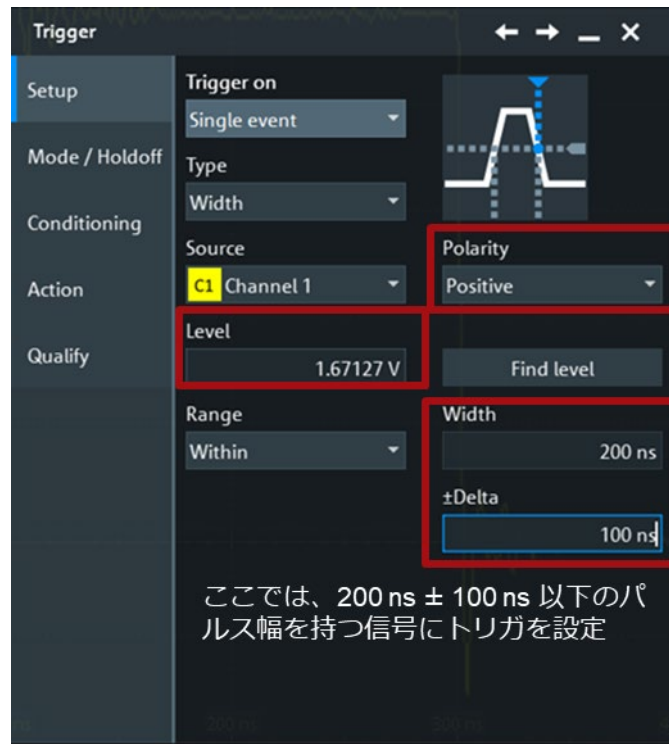


図 9 パルス幅トリガの設定例

図 10 にパルス幅トリガを使用した実際の測定例を示します。前述のように、 $200\text{ ns} \pm 100\text{ ns}$ 以下のパルス幅を持つ信号にトリガを設定することで、デジタル信号内に存在する $100\text{ ns} \sim 300\text{ ns}$ の範囲パルス（ここでは白枠で囲まれている 100 ns および 300 ns の正パルス）をトリガで捕捉していることが分かります。



図 10 パルス幅トリガの測定例

3.3 ラントトリガ機能

ラントトリガを説明する前に、ラント信号とは何かということを理解することは重要です。ラント信号とは、デジタル通信信号で決められているハイレベルあるいはローレベルのスレッシュホールドに到達しないで遷移するパルスを指します。こうした信号がシステム内に存在するとハイレベルの1に判定されたり、ローレベルの0に判定されたりするため、システムエラーの原因となります。

図 11 にラントトリガの設定例を示します。これまでのトリガ機能とは異なり、2つのトリガレベル（Upper / Lower level、ここでは 1.35V / 432 mV）を設定する必要があります。これは、1つ目のトリガレベルを超えるが、2つ目のトリガレベルを超えない信号（ハイにもローに遷移しない信号）を検出するための条件として必要になります。さらに、指定されたラント幅（Runt width、ここでは 30 ns）とし、それよりもラント幅が短い、または長い（Range、ここでは Shorter）設定が行えます。



図 11 ラントトリガの設定例

図 12 にラントトリガを使用した実際の測定例を示します。前述のように、例 1 では 30 ns 以下のパルス幅を持つ信号で、1.35 V と 432 mV の間で遷移してしまうラント信号を捕捉していることが分かります。さらに、例 2 では Polarity を Negative に設定し、トリガレベルを微調整することで、正常なデジタル通信信号内に存在する負のラント信号（白丸部分）も簡単に捕捉できることが分かります。

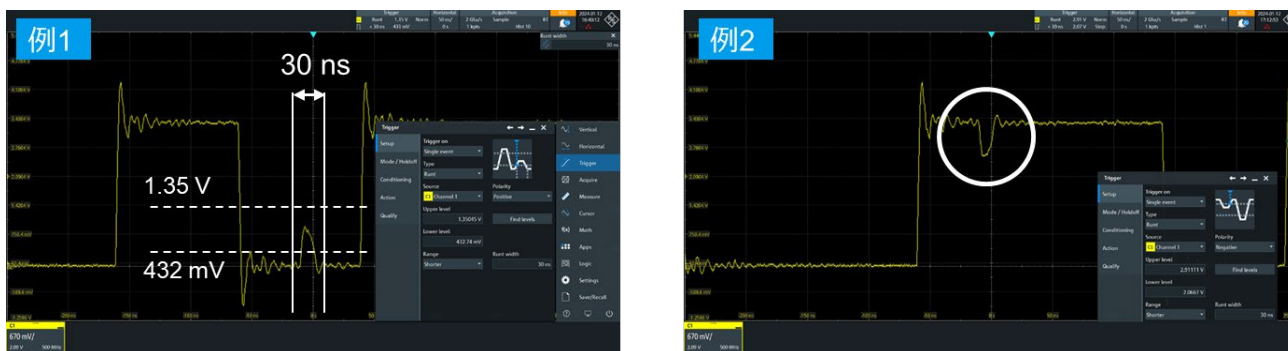


図 12 ラントトリガの測定例

3.4 タイムアウトトリガ機能

タイムアウトトリガとは、指定された時間経過の間、信号が閾値電圧を上回る、あるいは下回る、あるいは両方のケースを検出する機能です。そして、指定された時間内に信号が遷移しない場合、トリガが発生します。このタイムアウトトリガは、システムによってはクロックまたはデータにデッドタイムが組み込まれていることがあるため、他のシステムイベントとタイミングが合わない場合にシステムエラーの原因となるケースがあります。こうしたエラーの解析においては、デッドタイムにトリガをかけることで、他の信号とのタイミングを確認することができます。

図 12 にタイムアウトトリガの設定例を示します。指定された時間（Time、ここでは 2 μ s）で、データがしきい値電圧よりもハイまたはローの持続時間（Range、ここでは Stays high）で検出し、トリガレベル（Level、ここでは 1.65 V）で測定する設定としています。

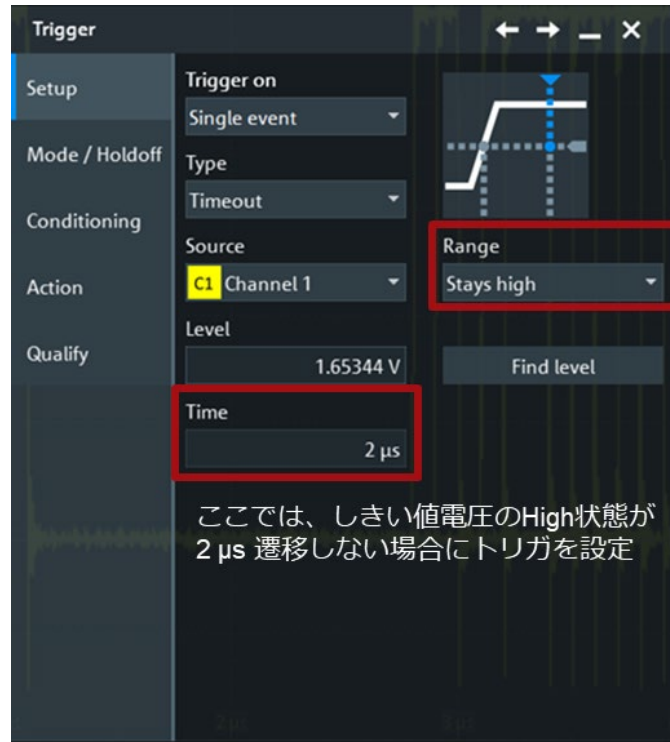


図 13 タイムアウトトリガの設定例

図 14 にタイムアウトトリガを使用した実際の測定例を示します。前述のように、しきい値電圧を超えたハイ状態が $2\ \mu\text{s}$ 以上持続するデータ信号にトリガを設定することで、デジタル信号内に存在する $2\ \mu\text{s}$ （ここでは白枠で囲まれている $2\ \mu\text{s}$ のデータ信号）持続するハイの信号をトリガで捕捉できていることが分かります。これにより、デッドタイムが設定通りなのかを検証できると同時に、他の関連する信号をプロービングして観測することでタイミングエラーの発生有無なども確認できます。



図 14 タイムアウトトリガの測定例

3.5 パターントリガ機能

パターントリガとは、ロジックトリガとも呼ばれ、入力チャンネルの論理的な組み合わせに対してトリガ条件を設定することで、ロジックの動作検証が可能になる機能です。パターンとトリガレベルを各チャンネルに個別に設定することができます。そして、チャンネルの理論的な組み合わせをグラフィカルなエディターを使用して簡単に設定することができます。このパターントリガですが、タイミング検証が重要なメモリーパスなど、特定のシステム状態を検出するのに最適なトリガ機能です。

図 15 にタイムアウトトリガの設定例を示します。チャンネル 1 から 4 までの範囲で、使用するチャンネルを選択し、各チャンネルにおけるハイまたはローの設定が行えます。そして、各チャンネルの組み合わせに対してロジックを設定することで、捕捉したいパターンに対してトリガを掛けることができます。この例では、チャンネル 1 から 3 を使用 (On) して、チャンネル 1 を HIGH、チャンネル 2 を HIGH、そしてチャンネル 3 を HIGH に設定しています。この状態で、チャンネル 1 とチャンネル 2 は OR、そしてその状態に対してチャンネル 3 を AND としてロジックを設定しています。また、各チャンネルに対してトリガレベル (Cx Level、ここでは C1 と C3 は 1.66 V、C2 は 1.55 V に設定) を個別に設定することも可能です。

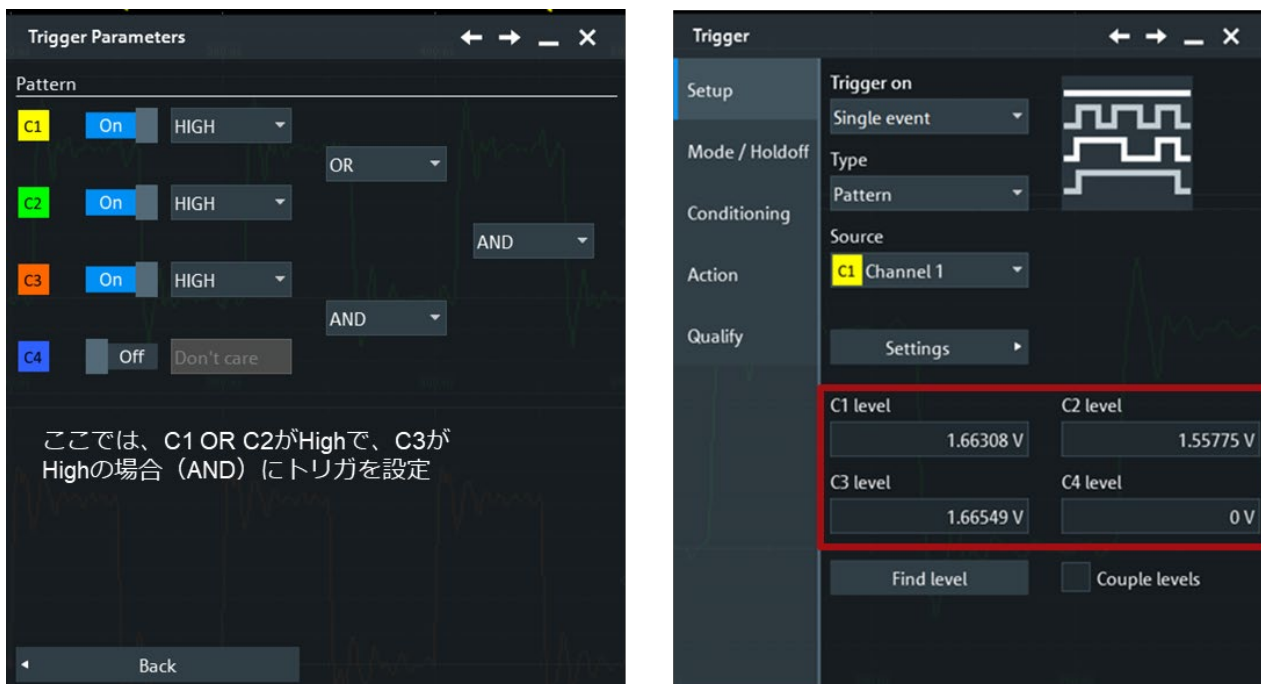


図 15 パターントリガの設定例

図 16 にパターントリガを使用した実際の測定例（その 1）を示します。この例では、チャンネル 1 が HIGH、チャンネル 2 が LOW、そしてチャンネル 3 が HIGH の信号と、前述のトリガ設定メニューで設定したパターンで波形が捕捉できていることが分かります。



図 16 パターントリガの測定例 1

図 17 にパターントリガを使用した実際の測定例 2 を示します。この例では、先ほどとは逆にチャンネル 1 が LOW、チャンネル 2 が HIGH の状態、そしてチャンネル 3 が HIGH の信号をトリガで捕捉できていることが分かります。

このように、パターントリガを使用することでチャンネル 1 から 4 までの信号を任意にロジックで組わせて、所望のパターンを捕捉することができます。



図 17 パターントリガの測定例 2

3.6 シリアルパターントリガ機能

はじめに、シリアルパターントリガとは何なのかという点について説明します。例えば、RS-232C、CAN、LIN、あるいは USB や PCIe などのシリアル通信データから任意のシリアルパターン信号やパケットデータを検出、あるいはトリガすることができる機能です。これにより、特定のデータパターンを検出したり、本来存在し無いはずのデータでトリガを掛けたりできるため、シリアル通信のデバッグにおいては無くてはならないトリガ機能です。

基準となるクロックは、データバスと並列にクロック信号が用意されている場合は外部クロック (EXPLICIT CLK) 、あるいはバスデータにクロックが埋め込まれているエンベデッドクロックの場合は、CDR(クロックデータリカバリー)から選択することができます。さらに、CDR についてもソフトウェアベースと、ハードウェアベースが存在し、前者はソフトウェアによりクロック再生が行われるため、オシロスコープ内部のメモリに存在しないパターンにはトリガを掛けることができません。これに対して、ハードウェアベースの CDR は、設定したパターンが発生した時点で確実にトリガを掛けることができます。つまり、単発でしか発生しないようなパターンも検出できるため、デバッグにおいて使用する場合には、ハードウェアベースの CDR を搭載しているモデルの使用を推奨します。

図 18 にシリアルパターントリガの設定例として、エンベデッドクロックではなく外部クロックを使用した場合を紹介します。シリアルバスとしてチャンネル 1 (Source、ここでは Channel1) が選択され、今回は外部クロックを使用するので Reference Signal (Clock / CDR、ここでは Clock) とし、クロック信号としてチャンネル 3 (Clock source、ここでは Channel3) を指定しています。外部クロック (Explicit clock) を選択し、必要に応じてクロックの立ち上がり、または立ち下がりどちらでデータをラッチするのか、あるいはクロックのレベル電圧などを設定します。

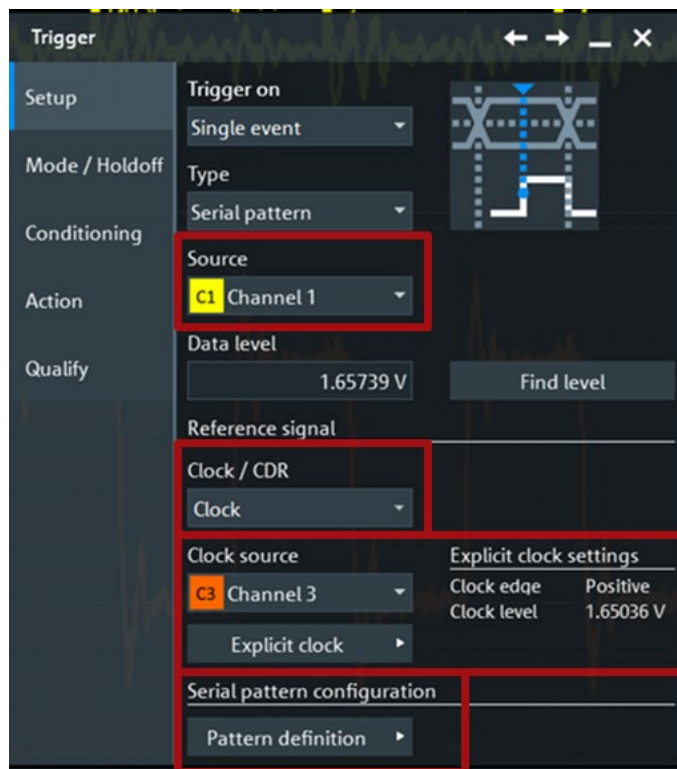


図 18 シリアルパターントリガの設定例

そして最後に、図 19 に示すように検出したいパターンを Serial pattern condition (Pattern Definition、ここでは Bit pattern : 101010) で設定します。シリアルパターンは、Binary 以外にも Hex, Octal, Ascii などが選択できます。そして、最大 128 ビットの任意のパターンを検出することができます。



図 19 シリアルパターンの定義

図 20 にシリアルパターントリガを使用した実際の測定例を示します。この例では、チャンネル 1 のデータバスに 10101010 の Binary データが送信されたときにパターンを検出していることが分かります。また、外部クロックとして画面下のチャンネル 3 を使用しています。

さらに、ローデ・シュワルツが提供する R&S®RTO6 / RTP オシロスコープが搭載しているシリアルパターントリガはハードウェアベースなので、前述のようにこうしたパターンに対してシングルショットでトリガできるため、シリアル通信のデバッグにおいては強力な機能となります。



図 20 シリアルパターントリガの測定例

3.7 ゾーントリガ機能

はじめに、ゾーントリガとは何なのかという点について説明します。ゾーントリガとは、オシロスコープの画面上に描いたゾーン¹を信号が通過する、あるいは通過しないという条件で、信号に対してトリガをかけることができます。そして、R&S RTO6 / RTP シリーズオシロスコープの場合、このゾーンは最大 8 個まで設定でき、各ゾーンに対してロジックを組んで設定することができます。

また、ローデ・シュワルツが提供するゾーントリガは、業界で唯一入力信号だけでなく、FFT を含む演算波形および XY 波形に適用することができます。また、ゾーントリガは他のトリガ機能と組み合わせて使用することもできます。

図 21 にゾーントリガの設定例として、ゾーンを 3 個使用した場合を紹介します。ここでは、Logical trigger condition として、“not Zone1”、“Zone2”、“not Zone3”、を and で組み合わせて設定します。つまり、対象となる測定信号が Zone1 を通過しない、Zone2 を通過する、そして Zone3 を通過しない、という条件が全て揃ったときにトリガが掛かる設定となります。

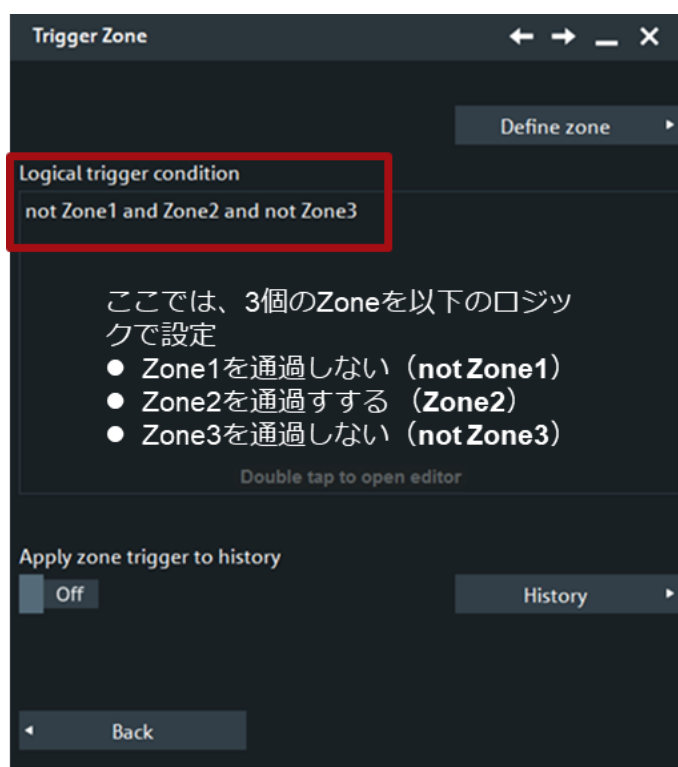


図 21 ゾーントリガの設定例

¹ 最新の MXO シリーズに搭載されているゾーントリガは、画面上に描く領域をゾーンではなくエリアと呼びますのでご注意ください。

図 22 にゾーントリガを使用した実際の測定例 1 を示します。この例では、前述の設定通り測定信号が Zone1 を通過しない、Zone2 を通過する、そして Zone3 を通過しないときのパターンを検出していることが分かります。



図 22 ゾーントリガの測定例 1

さらに、図 23 にゾーントリガと、既に説明したグリッチトリガを組み合わせ使用した実際の測定例 2 を示します。この例では、測定信号が Zone1 を通過しない、Zone2 を通過し、かつグリッチ信号がその間に存在する場合のパターンを検出しています。このように、ゾーントリガと合わせて、これまでご紹介してきた各種トリガ機能を組み合わせ使用することもできます。



図 23 ゾーントリガの測定例 2

ゾーントリガの応用例として、図 24 に演算波形（FFT）にゾーントリガを設定し、スプリアス信号を検出している実際の測定例を示します。ここでは、画面下の時間波形を FFT 処理して、画面上に周波数波形、つまりスペクトラム波形を表示させています。ここで、時間波形の変動に伴い発生するスプリアス信号を捕捉するため、Zone1 および Zone2 を使用して、その両方でスプリアス信号が発生した場合の波形を捕捉しています。



図 24 ゾーントリガの測定例（演算波形 FFT）

例えば、スイッチング電源のようにスプリアスが発生した場合に、その発生したスプリアスを時間データに置き換えた場合、どのようなスイッチのタイミング、あるいはどのような電圧波形においてこうしたスプリアスが発生するのかを、周波数波形から時間波形に置き換えて解析することが可能となります。これまでは時間波形だけにしかトリガを掛けることができませんでしたが、こうした周波数波形に対してトリガを掛けることにより、スプリアス発生原因の特定が比較的容易に行えるようになります。

4 まとめ

このホワイトペーパーでは、トリガシステムに関する説明からはじまり、さまざまな種類のトリガ機能について設定方法と合わせて、具体的な測定例を示しました。一般的に、オシロスコープのトリガ機能はエッジトリガ程度しか使用されていないのが現状であり、今回ご紹介した機能を上手く活用することで、電気電子回路、シリアル通信回路、あるいはメモリのデバッグやノイズ対策などにおいて、少しでも効率改善に繋がればという思いで執筆しました。このホワイトペーパーが、エンジニアの方が直面している各種問題に対して、少しでもお役に立てれば幸いです。

なお、オシロスコープの設定方法については、メーカー毎に異なるメニューが用意されているかと思いますが、基本的な考え方は各メーカー共通の部分も多いと思いますので、使用する際の参考になるかと思っています。



5 参考文献

1. [オシロスコープの基礎 入門書](#)
2. [見逃していませんか？「デジタルトリガの重要性」](#)
3. [見逃していませんか？「波形更新レートの重要性」](#)
4. [見逃していませんか？真に使える「ロングメモリの重要性」](#)
5. [オシロスコープの基本操作](#)
6. [必ず知っておきたい基礎知識 – オシロスコープ](#)
7. [プローブ測定の基本テクニックを身につける](#)



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

