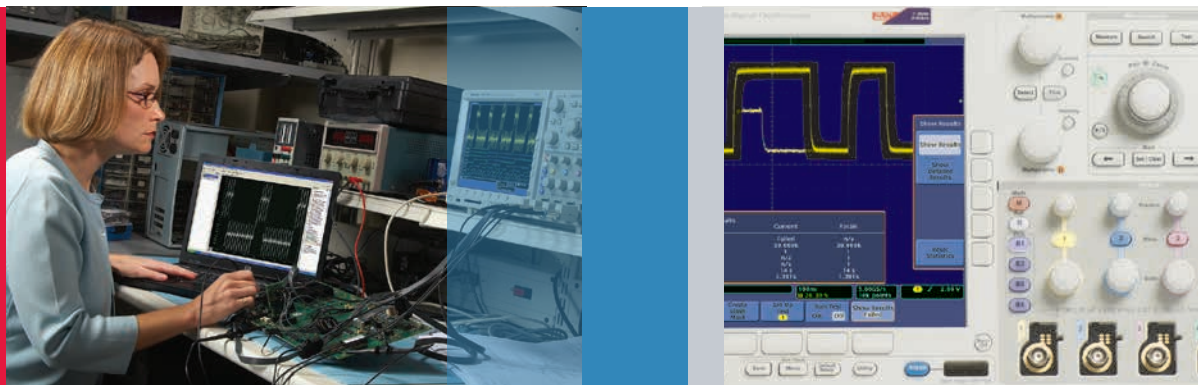




# ミックスド・シグナル・オシロスコープを使用したデジタル・デバッグのヒント集

## 概要：

基本的なロジック・アナライザの機能と統合ツールセットを備えたMSOシリーズ・オシロスコープを使用し、デジタル回路をすばやく検証／デバッグする方法について説明します。

## はじめに

電気・電子製品がますます高速に、複雑になるにつれ、その設計、検証、デバッグも難しさを増しています。信頼性の高い動作を実現するためには、設計エンジニアは十分な設計検証を行う必要があります。問題が発生したならば、すばやく原因を特定して解決しなければなりません。信号のアナログ部とデジタル部の振る舞いを同時に解析することで、多くのデジタル問題の原因をすばやく特定することができます。このようなデジタル回路の検証、デバッグには、ミックスド・シグナル・オシロスコープ（MSO）が適しています。

テクトロニクスのMSO2000シリーズ、MSO3000シリーズ、MSO4000シリーズ、MSO5000シリーズ・ミックスド・シグナル・オシロスコープは、優れたオシロスコープ性能と、パラレル／シリアル・バスのプロトコル・デコード／トリガ機能、基本的な16チャンネル・ロジック・アナライザ機能を併せ持っています。MDO4000シリーズはMSO4000シリーズ・プラットフォームに専用のRF入力部を組み込み、スペクトラム・アナライザ機能を内蔵したミックスド・ドメイン・オシロスコープです。MSOシリーズは、強力なデジタル・トリガ機能、高分解能アキュイジション機能、解析ツールを装備しており、デジタル回路をすばやくデバッグすることができます。このアプリケーション・ノートは、当社MSOシリーズを使用して効率的なデジタル回路が設計できるよう、検証とデバッグのヒントに焦点をあてて説明します。

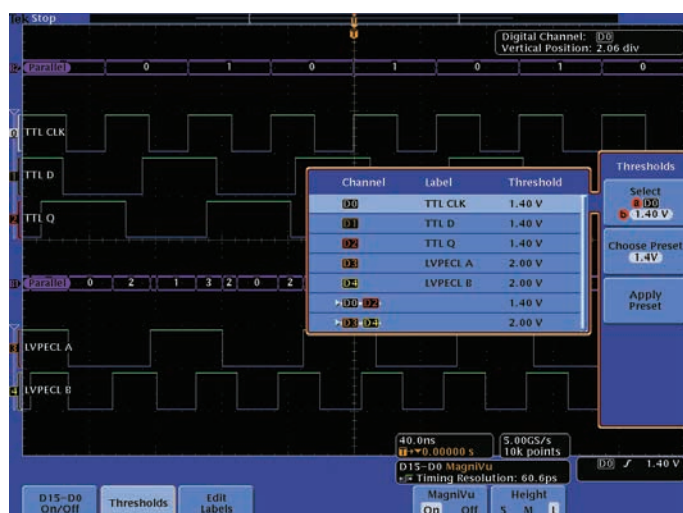


図1. MSO4000Bシリーズ用デジタル・プローブ1本で異なるロジック・ファミリ (TTLとLVPECL) のスレッシュホールドを設定した例。上3つのチャンネルはTTL信号でスレッシュホールドは1.4V、下2つのチャンネルはLVPECL信号でスレッシュホールドは2.00Vに設定されている

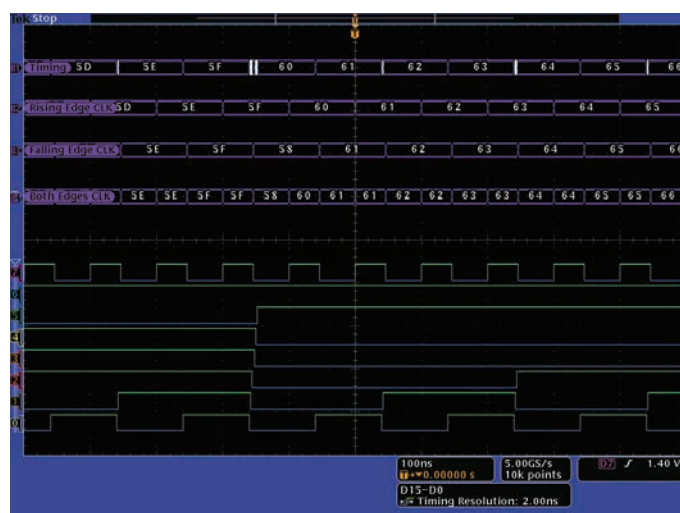


図2. MSOシリーズによるタイミング解析の例。4種類のパラレル・バスが定義され、下3つはデバイスのクロック信号に同期したデコードがなされている

## デジタル信号のスレッシュホールド設定

ミックスド・シグナル・オシロスコープでは、デジタル・チャンネルを使ってデジタル回路の信号を、デジタル・ハイまたはデジタル・ローとして表示します。これは、リンギング、オーバーシュート、グランド・バウンスなどのロジックの遷移が発生しないことを前提としています。MSOではアナログ特性は無視されます。MSOは、ロジック・アナライザのようにスレッシュホールド電圧を基準にして信号が論理ハイなのか論理ローなのかを判断し、表示します。

MSO5000シリーズ、MSO4000シリーズ、MD04000シリーズでは、チャンネルごとにスレッシュホールドを設定できるため、さまざまなロジック・ファミリが混在するような回路のデバッグに最適です。図1は、MSO4000Bシリーズのデジタル・プローブの1つのプローブ・ポッドで5種類のロジック信号を測定した例です。3つのTTL (Transistor-Transistor Logic) 信号と2つのLVPECL (Low-Voltage Positive Emitter-Coupled Logic) 信号が同時に測定されています。

MSO2000シリーズとMSO3000シリーズでは、スレッシュホールドはプローブ・ポッド (8チャンネル) ごとに設定するため、TTL信号を1つのポッドに、LVPECL信号をもう1つのポッドに接続します。

## タイミング解析とステート解析

デジタル信号の取込みは、主に2種類あります。一つはタイミング解析であり、MSOのサンプル・レートにしたがって同一の時間間隔でデジタル信号をサンプリングします。各サンプル・ポイントにおいて信号の論理状態を保存し、信号のタイミング波形を表示します。

もう一つの取込みがステート解析です。ステート解析では、デジタル信号の論理状態が有効で、安定する時間を定義します。同期回路、クロック・デジタル回路では一般的です。クロック信号は信号状態が有効なときの時間を定義します。例えば、入力信号の安定時間は、Dフリップフロップのクロックの立上りエッジ付近になります。出力信号の安定時間は、Dフリップフロップのクロックの立下りエッジ付近になります。同期回路のクロック周期は固定されていないため、ステート解析による取込みの時間間隔はタイミング解析のように一定ではありません。

ロジック・アナライザは、タイミング解析とステート解析の両方が行えます。ミックスド・シグナル・オシロスコープのデジタル・チャンネルは、図2の下半分に示すように、ロジック・アナライザのタイミング解析モードに似ています。当社MSOシリーズは、ロジック・アナライザのステート解析表示のようにタイミング解析をクロック信号に同期したバス表示 (図2) またはイベント形式 (図3) で表示するため、デバッグにおいて重要な情報を確認することができます。

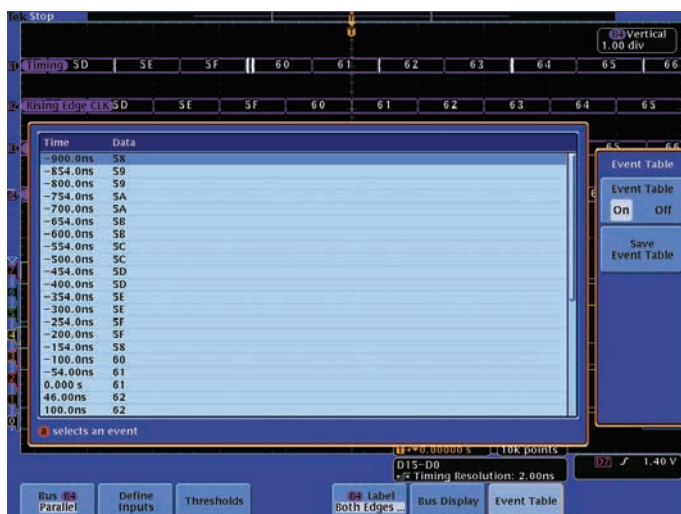


図3. デコードされたデータは、ロジック・アナライザのステート解析表示のようにイベント表示できる

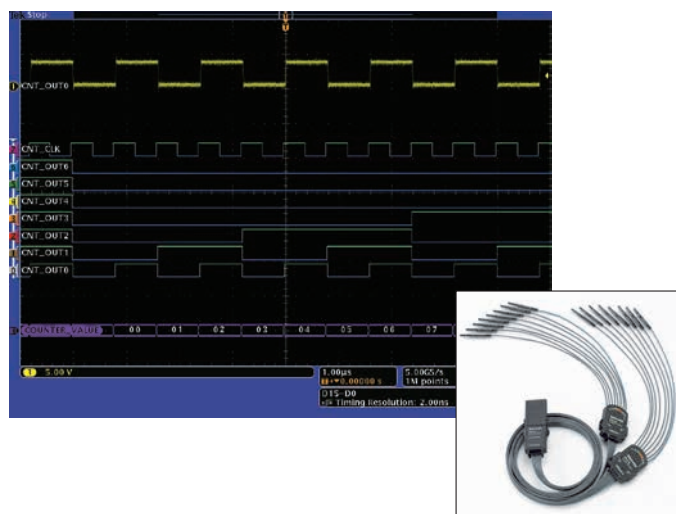


図4. プローブのカラーは波形のカラーと同じであるため、信号とテスト・ポイントが簡単に識別できる

## カラーコードによるデジタル波形表示

デジタル・タイミング波形は、ハイかローのロジック値が表示されることを除けば、アナログ波形によく似ています。タイミング解析は、主に特定の時間ポイントにおけるロジック値を特定したり、1つまたは複数の波形間のエッジ・トランジション間の時間を測定します。解析が容易になるよう、当社のMSOはデジタル波形のロジック・ローを青で、ロジック・ハイを緑で表示するため、信号のトランジションが見えにくい場合でもロジック値を確認することができます。波形のラベル・カラーもプローブのカラーと同じであるため、図4のように信号とテスト・ポイントが容易に識別できます。

デジタル・タイミング波形は、グルーピングしてバス表示することもできます。グループ内の任意のデジタル信号を最下位桁として定義し、その他のデジタル信号も最上位桁まで自由に並べることができます。MSOは、バスをデコードしてバイナリまたは16進にします。MSOはイベント表示も可能で、ロジック状態をバイナリまたは16進で表示することもできます。どのステートにもタイムスタンプが付くため、タイミングが簡単に測定できます。

当社のMSOシリーズは、クロック同期表示または非クロック同期表示によるパラレル・バス表示が行えます。クロック同期表示では、クロックとして設定した信号の立上りエッジ、立下りエッジ、または両方のエッジでバスのロジック・ステートを決定しま

す。これにより、バスの有効なトランジションのみが表示され、データが有効でない場合のトランジションは無視されます。非クロック同期表示では、サンプル・ポイントごとにバスをデコードし、すべてのバスのトランジションを表示します。クロック同期表示では、デコードされるバス表示とイベント表示は、ロジック・アナライザのステート表示によく似たものになります。バスのデコード表示は取込んだ後の処理ですので、解析中にデコード形式を変更することもできます。

当社のMSOシリーズは機種によって異なりますが、最高で2～16までのバスを同時にデコードすることができます。バスとしては、パラレルとシリアル (I<sup>2</sup>C、SPI、USB、CAN、LIN、FlexRay、RS-232/422/485/UART、Ethernet、MIL-STD-1553、I<sup>2</sup>S/LJ/RJ/TDM) が定義できます。パラレル・バスは、D0～D15のデジタル・チャンネルを任意に組み合わせることができます。シリアル・バスは、アナログの1～4チャンネルとデジタルのD0～D15チャンネルを任意に組み合わせることができます。MSO2000シリーズ、MSO3000シリーズ、MSO4000シリーズ、MD04000シリーズは、最大4つのアナログ・チャンネル、4つのリファレンス波形、1つの演算波形、4つのバスと16のデジタル・チャンネルを同時に表示できるため、詳細な設計検証が可能になります。MSO5000シリーズにはさらに優れた解析機能があり、最大4つの演算波形と16のバスが同時に表示できます。

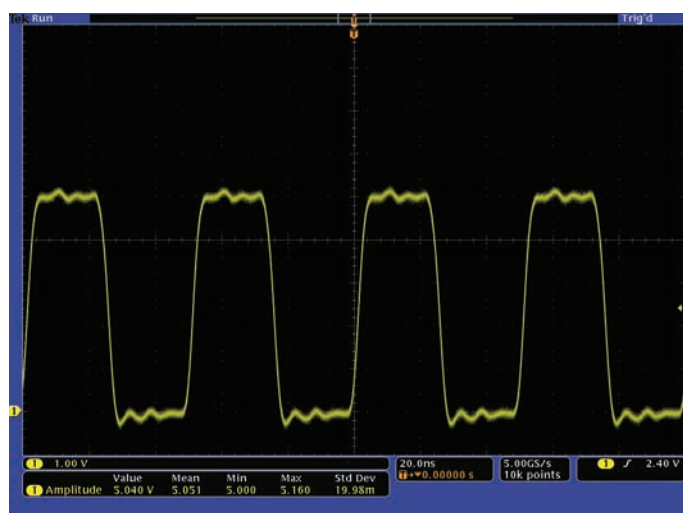


図5. 統計測定による5V CMOSの信号振幅測定

## デジタル信号取込みの準備

MSOでデジタル信号を取込むには、2種類の基本的な作業があります。まず、ロジック・アナライザと同様、論理レベルを正しく取込むよう、測定するロジック・ファミリに合ったデジタル・チャンネルのスレッシュホールドを設定する必要があります。次に、アナログ・チャンネルとデジタル・チャンネル間の時間相関が正確にとれるように、アナログ・チャンネルのスキューを調整する必要があります。

MSOのアナログ・チャンネルは、デジタル信号のロジック・タイミングを詳細にチェックするために使用します。図5は、複数の波形取込みにより5V CMOS信号の振幅を統計測定によって自動的に測定した例です。CMOSなどの対称性の電圧スイングを持つロジック・ファミリでは、スレッシュホールドは信号振幅の1/2になります。図6は、デジタル・チャンネルのスレッシュホールドを5V CMOS信号の振幅の1/2である2.5Vに設定した例です。しかし、TTLなどの非対称性の電圧スイングを持つロジック・ファミリでは、コンポーネントのデータ・シートを参照し、ロジック・デバイスの最大ロー・レベル入力電圧 (TTL  $V_{IL} = 0.8V$ ) と最小ハイレベル入力電圧 (TTL  $V_{IH} = 2.0V$ ) の中間点 (TTL  $V_{threshold} = 1.4V$ ) に設定します。

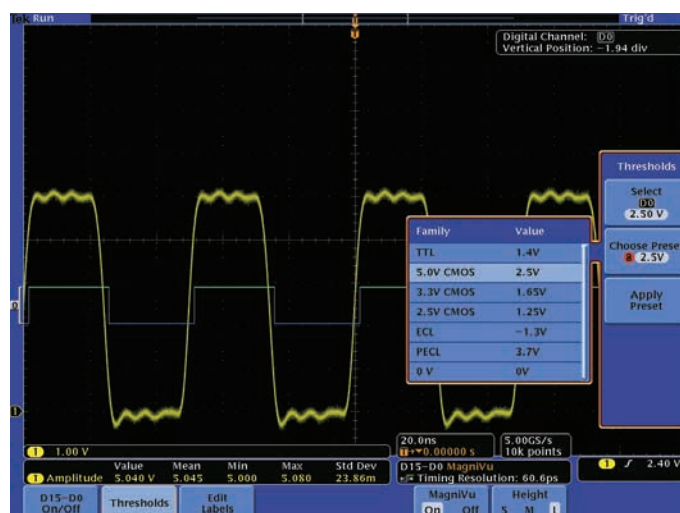


図6. 5V CMOS信号のデジタル・スレッシュホールドをMSOで2.5Vに設定した例

図6に示すように、同じ信号のアナログ波形とデジタル波形の立上りエッジ間にタイミング・スキューがあるのがわかります。アナログ波形の方がデジタル波形に比べて進んでいます。正確な測定のためには、アナログとデジタルのタイミング・スキューを取り、アナログ波形とデジタル波形間の時間相関を正確にします。当社のMSOシリーズは、アナログ・プローブのスキューを調整することができ、アナログ・チャンネル間およびアナログ・チャンネルとデジタル・チャンネル間のスキューを取ることができます。アナログ・チャンネルのスキュー調整は、異なったプローブの伝播遅延の補正にも利用できます。

当社のすべてのMSOシリーズには、ロジック・プローブが付属しています。デジタル測定が簡単になるように、オシロスコープはあらかじめロジック・プローブの伝播遅延を補正しています。このため、デジタル・チャンネルにはプローブ・スキュー調整はありません。



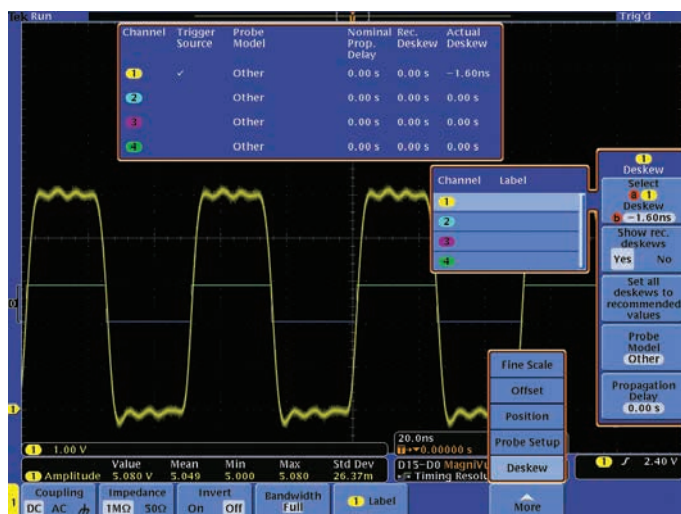


図7. タイミング・スキューのとれたアナログ・チャンネルとデジタル・チャンネル

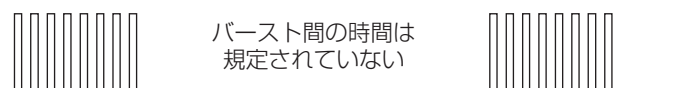


図8. TTLのバースト信号



図9. TTLのバースト信号

アナログ・チャンネルとデジタル・チャンネルのスキューを合わせるため、CMOSのアナログ波形の2.5Vポジションの位置を、2.5VスレッシュホールドにおけるCMOSロジックのトランジションに合わせています。図7は、-1.60nsのスキューをとり（デスクューとも呼びます）、アナログ・チャンネルとデジタル・チャンネルを合わせています。このデスクュー処理を、他のアナログ・チャンネルでも繰り返します。

アナログ・チャンネルのスキューは、アナログ・プローブを交換するたびに確認する必要があります。また、異なったロジック・ファミリを測定する場合には、デジタル・スレッシュホールドも確認する必要があります。スレッシュホールドとスキューが確認できれば、MSOによるデジタル回路の検証とデバッグの準備は完了です。次に、MSOを使用した設計の検証例をいくつか説明します。

## 予測できない信号へのトリガ

最初の例は、図8に示すような8つの正極性のパルスを持ったTTLバースト信号の検証です。正極性のパルス幅の仕様は23.2~25nsであり、パルス間の間隔は26~27nsとなっています。バースト間の時間間隔は規定されていません。

MSOのデジタル・チャンネルをTTLバースト信号に接続し、スレッシュホールドをTTLロジックに設定します。また、立上りエッジでトリガするように設定します。検証が迅速に行えるよう、カーソル間での正極性と負極性のパルス幅を自動的に測定するようにMSOを設定します。

図9は、最初のパルス・エッジでトリガしたシングルショット・アクイジションの様子です。MSOのシングルショット・アクイジション・ボタンを押すタイミングによって、異なった立上りエッジでトリガされる場合もあります。

取込まれた信号から、8つのパルスがあり、仕様に収まっていることが確認できます。パルス幅は自動で測定されており、最初の正のパルス幅は23.88ns、負のパルス幅は26.18nsとなっています。どちらの値も仕様の範囲内に収まっています。当社MSOシリーズのカーソル機能はリンクされており、一回のカーソル操作で2本のカーソルが同時に移動できるため、正と負のパルス幅が一度に測定できます。すべてのパルス幅が仕様の範囲内に収まっていることが確認できました。

|        | Value   | Mean   | Min    | Max    | Std Dev |
|--------|---------|--------|--------|--------|---------|
| +width | 23.88ns | 23.87n | 23.76n | 24.00n | 53.62p  |
| -width | 26.18ns | 26.17n | 26.06n | 26.30n | 65.31p  |

図10. MSOシリーズの統計測定によるTTLバースト信号の正／負極性のパルス幅

MSOのアクイジション・モードをSingleからRunに変更することで、正／負のパルス幅をより厳密にチェックすることができます。正／負パルスの統計値（平均値、最小値、最大値、標準偏差）は複数の波形取込みから計算され、2～1,000回の波形取込回数を選択することができます。

図10は、統計測定の例を示しており、正パルス幅の平均値は23.87ns、標準偏差は53.62psとなっています。正パルス幅の最小値は23.76ns、最大値は24.00nsであり、共に仕様の範囲内です。同様に負のパルス幅も検証し、仕様の範囲内であることを確認しました。ここまでは、TTLバースト信号の検証はスムーズに進んでいます。

この検証方法は、連続信号のどの部分を取込み、解析するかによって異なったものになります。より確実に検証する場合、当社MSOシリーズの強力なトリガ機能を使ってすべてのパルスをチェックする方法があります。例えば、すべてのTTLバースト信号のすべての正パルスを測定し、23.2nsより小さな幅のパルスにトリガします。トリガ後、シングルショット・アクイジション・モードでMSOを止めてからエラー・パルスを解析します。

図11は、23.2nsより小さな幅の正パルスにトリガした様子を示しています。この取込みでは、2つのエラーが取込まれています。最初のエラーは、7番目のパルスの幅が3.636nsであり、最小値の23.2nsの仕様を満たしていません。2番目のエラーは、8番目のパルスがないことです。この例は、MSOのデジタル・トリガ機能を利用して不適切なデジタル信号を検出した例です。また、

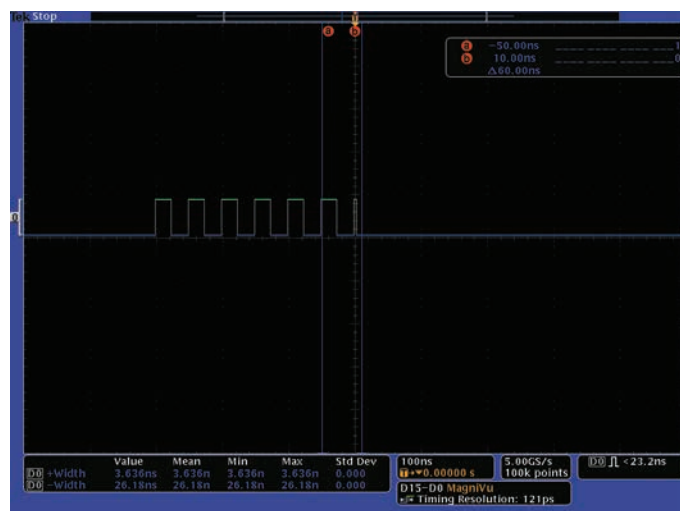


図11. MSOのトリガで検出された3.636nsの正極性のエラー・パルス

不適切なデジタル信号を検出するなかで25.6nsより大きな幅のパルスを検出することもできますが、この例では、検出されませんでした。

このエラーの原因は設計不良です。パルスのゲーティングを制御する信号がパルス生成と非同期なため、ゲーティング間隔がときおり変動していました。この結果、内部のゲーティング信号が最後のパルスを間欠的に切り取ってしまい、7番目のパルスを欠けさせてしまいました。

エラーにトリガするこの検証方法は、夜間や週末にかけての長い時間間隔で、より厳密な設計検証で信号を監視するような場合に適しています。

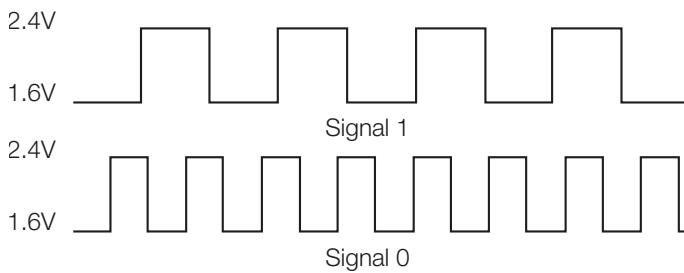


図12. 50ns周期のLVPECLのSignal 0と、90ns周期のSignal 1の信号



図13. 下に表示されているLVPECL信号の727.3psのグリッチにトリガした例

## アナログとデジタルによる波形取込み

この例では、2つのLVPECL (Low-Voltage Positive Emitter-Coupled Logic) 信号を検証します。0.8VのLVPECLのロジック・ハイは約2.4V、ロジック・ローは約1.6Vであるため、MSOのデジタル・チャンネルのスレッシュホールドは2.0Vに設定します。

図12に示すように、Signal 0は周期が約50nsの方形波、Signal 1は周期が約90nsの方形波です。2つの信号間に時間的な関連性はありません。

先ほどのTTLバースト信号の例で使用した方法で、LVPECL信号を検証します。不適切な信号をチェックするため、22.4ns未満のパルス幅でトリガするようにMSOを設定します。図13は、下の信号の727.3psのグリッチにトリガした例です。このグリッチを取込むためには、727.3psより小さなタイミング分解能を持ったMSOが必要になります。

デジタル信号の取込みで重要になるアキュイジション仕様が、MSOのタイミング分解能の仕様です。優れたタイミング分解能で信号を取込むことができれば、信号が変化した際、より正確なタイミング測定が可能になります。例えば、500MS/sの取込レートは2nsのタイミング分解能であり、取込むことのできる信号エッジの確度は2nsになります。タイミング分解能が60.6ps (16.5GS/s)であれば信号エッジの確度は60.6psになり、より高速な信号変化を取込むことができます。

当社のMSO5000シリーズ、MSO4000シリーズ、MD04000シリーズは、内部で2種類の取込みにより、同時にデジタル信号を取込むことができます。一つは、最大10Mポイントのレコード長で2nsまでのタイミング分解能で取込みます。もう一つは、MagniVu®と呼ばれる高速アキュイジション・モードです。MagniVuのタイミング分解能は最小で60.6ps、トリガを中心として最大レコード長は10,000ポイントです。MSO3000シリーズのMagniVuでは、タイミング分解能は最小で121.2psです。MagniVuは、十分なタイミング分解能を持たない計測器では観測できないようなグリッチなどの信号のトランジションを詳細に表示することができます。

図13では、下の信号のグリッチが、上の信号の立上りエッジと同時に発生していることがわかります。これはクロストークが原因と思われますが、より詳細な情報が必要になります。

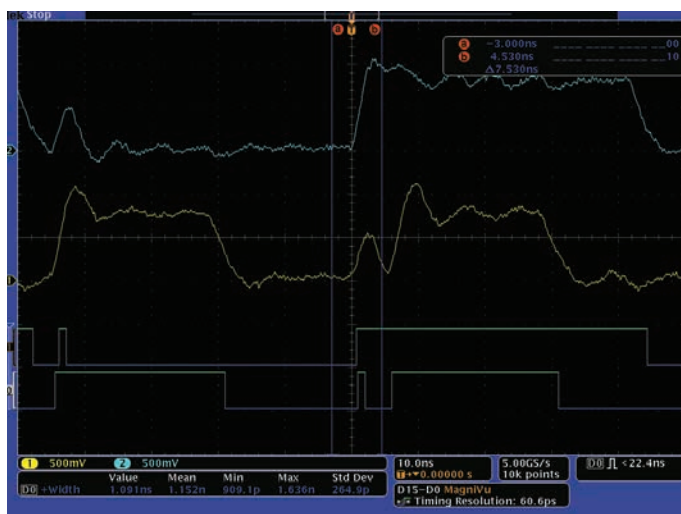


図14. 2つのLVPECL信号間の立上りエッジによるクロストークで生ずるグリッチ



図16. 1回の取込みでは正常に見えるDフリップフロップ

MSOのアナログ・チャンネルを2つのLVPECL信号に接続し、再度小さな不適切なパルスを探します。この測定では、MSOは1.091nsのグリッチにトリガし、図14に示すようにLVPECL信号の詳細を表示しています。他の信号の立上りエッジと同時にアナログのグリッチが発生していることがわかります。ほとんどのアナログ・グリッチは2つのLVPECLのロジック・スレッシュOLDよりも小さいのですが、いくつかはロジック・スレッシュOLDを超えており、上の波形の左端に見えるようなロジック・エラーとして表示されます。

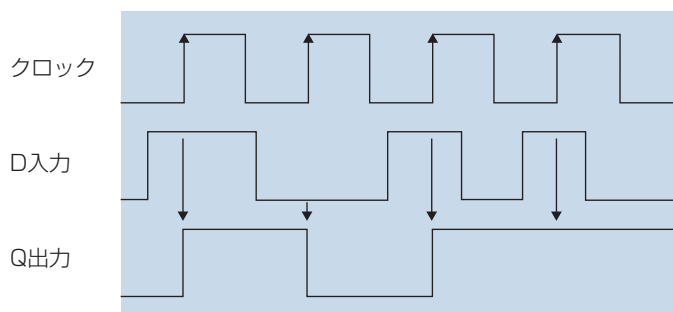
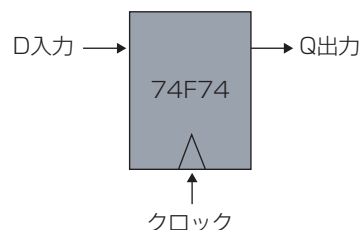


図15. 74F74 Dフリップフロップ

MSOは信号のデジタルとアナログの両方の特性を取込み、時間的に相関をとって表示できるため、デジタル信号のシグナル・インテグリティを調べるのに適しています。グリッチは、2つのLVPECL信号間の立上りエッジによるクロストークが原因です。LVPECLの立上りエッジのトランジションは、立下りエッジに比べて大きく、高速です。このため、立上りエッジは立ち下がりエッジに比べてより多くのクロストークを発生します。この取込みからは、立下りエッジによるクロストークは見られません。

## 非モノトニック（単調性のない）エッジとセットアップ／ホールド時間違反

この例では、TTL 74F74 Dフリップフロップの動作を検証します。Dフリップフロップは、クロックの立上りエッジのタイミングでD入力をQに出力します（図15参照）。例えば、クロックの立上りエッジのタイミングでD入力が高であれば、Q出力はハイになります。

図16の下波形は、クロックの立上りエッジにトリガした様子を示しています。Dフリップフロップのデータ入力が中央の波形、Q出力が上の波形です。それぞれの波形が識別しやすいように、デジタル・チャンネルにはOUT、DATA、CLKというラベルを付けています。





図17. MSOで捉えた727.3psのクロック・グリッチ

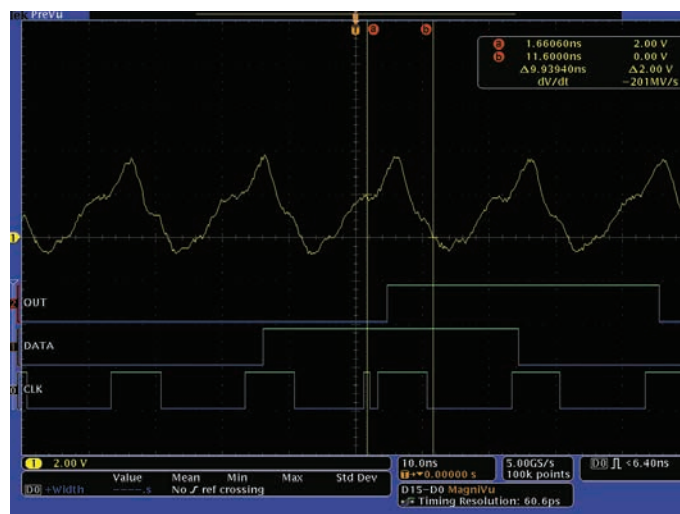


図18. クロック・グリッチは、単調に増加していない立上りエッジが原因

一見すると、立上りエッジの直後に入力データが出力に現れているため、問題がないように見えます。MSO4000シリーズのMagniVuを使用すれば60.6psの分解能でタイミング解析できるため、Dフリップフロップの伝播遅延を測定することができます。

クロックの正パルス幅は7.455nsであり、MSOは6.40ns未満の不適切なクロック・パルスを検出するようにトリガ設定します。図17は、正常なクロック・パルス直前の727.3psのグリッチにトリガしている様子を示しています。アナログ・チャンネルをクロック信号に接続し、再度取込みを行い、グリッチの詳細を観測します。図18は、クロックのグリッチにトリガし、グリッチの原因となっているアナログ特性を示しています。クロックの立上りエッジが非モノトニック（単調性がない）になっています。MSOのカーソルを使用した測定では、グリッチの中間レベルが2Vであり、カーソルを500psほど右に移動するとクロックの電圧は1.76Vに低下します。この電圧低下が原因となり、クロック信号の電圧が単調に増加していく途中で、ロジックが短時間ハイからローになっています。

74F74の仕様では、最大ローレベル入力電圧は $0.8V_{IL}$ 、最小ハイレベル入力電圧は $2V_{IH}$ となっています。クロック信号の $V_{IL}$ と $V_{IH}$ 間で立上り時間が遅かったり非モノトニックな特性があると、Dフリップフロップは規定されたように動作しなくなる原因となります。この波形取込みを見る限り、非モノトニックなクロック・エッジによって問題は起こっていないように見えます。検証レポートにこの非モノトニック・クロック・エッジのことを記し、次のQ出力動作検証に進みます。

Q出力は、入力の変化に対してのみ変化するものであり、その変化は、クロックの立上りエッジにDフリップフロップの伝播遅延を加えた時間において発生するものです。クロックは、周期20nsで固定です。Q出力は20ns離れたクロックの立上りエッジでのみ変化するため、Q出力には20ns未満の幅のパルスは含まれていないはずです。Q出力において19.2ns未満のパルス幅でトリガするようにMSOを設定します。

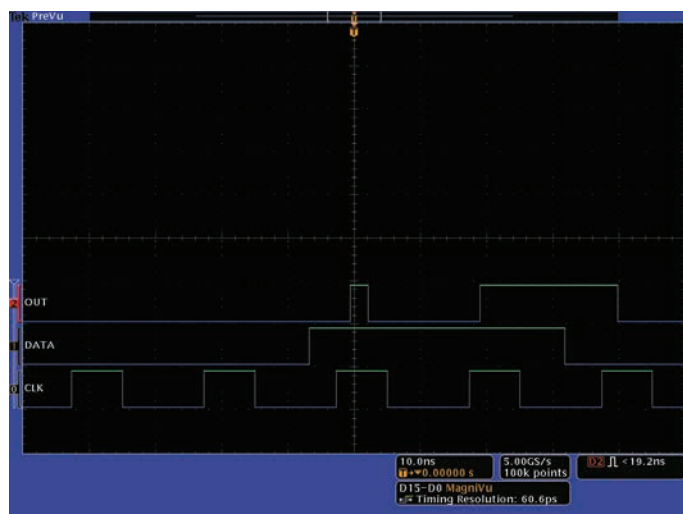


図19. DフリップフロップのQ出力エラー

図19は、19.2ns未満の幅のQ出力パルスをMSOで取込んだ様子を示しています。このQ出力のパルス幅は、クロックの周期より短くなっています。クロックの立上りエッジにおいてD入力が高になっていることもわかります。Q出力のローからハイへのトランジションは正しいのですが、その次のハイからローへのトランジションはクロックの立上りエッジと関係していないため、Dフリップフロップの動作としてはエラーです。

問題を詳細に観測するため、アナログ・チャンネルをQ出力に接続し、問題を詳細に観測します（図20参照）。Q出力のアナログ信号は増加を開始していますが、すぐに減少しています。Q出力のアナログ信号は、正常なアナログのロジック・ハイ・レベルに達する前に減少してしまっていることがわかります。

過去の経験から、これはD入力とクロック・エッジのセットアップ／ホールド時間違反によって起こるメタステーブル・グリッチであるといえます。

図20において、D入力のセットアップ時間はカーソル測定で4.188nsとなっています。このセットアップ時間は、74F74の最小セットアップ時間の仕様である2nsの2倍はあります。クロック・エッジの前の4.188nsでD入力は変化しているにも関わらず、74F74は正しく動作していません。

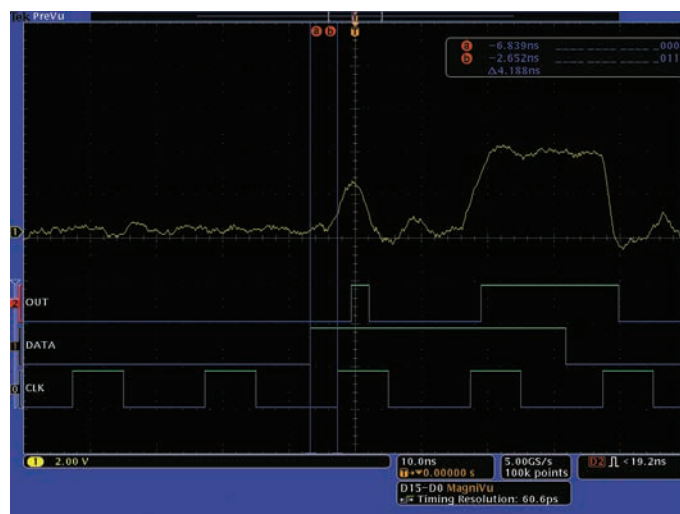


図20. DフリップフロップのQ出力エラーのアナログ検証

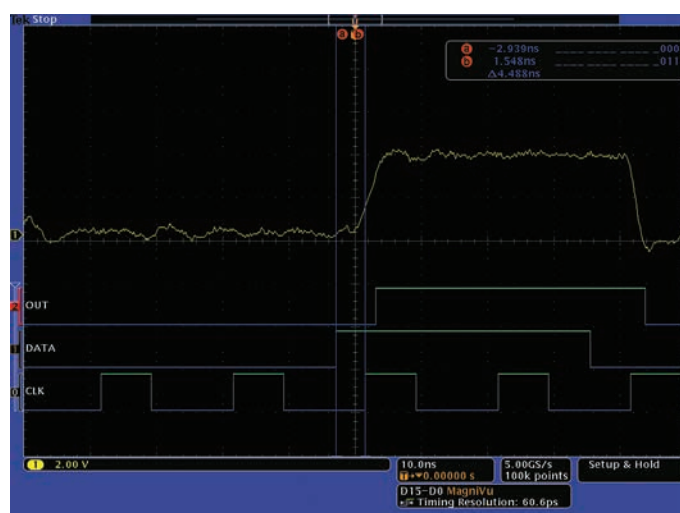


図21. クロックの立上りエッジ前の4.488nsのセットアップ時間による、Dフリップフロップの正常なQ出力

MSOのセットアップ／ホールド時間違反のトリガ設定を変更し、74F74が正しく動作するためにはどの程度のセットアップ時間が必要なのかを調べます。図21は、D入力とクロックの立上りエッジの間のセットアップ時間4.488nsでQ出力が正しく動作している様子を示しています。波形取込みを繰り返した結果、4.188ns以下のセットアップ時間では時々Q出力にグリッチが発生することがわかりました。



図22. クロックの立上りエッジ周辺に設定したカーソルA/B間のDフリップ・フロップのセットアップ/ホールド時間ウィンドウにおけるデータの変化にトリガした様子

次に、D入力のセットアップ/ホールド時間違反をチェックします。MSOのセットアップ/ホールド時間違反トリガを、セットアップ時間2ns、ホールド時間1nsに設定し、クロックの立上りエッジ付近のデータ有効ウィンドウにおけるD入力の変化をチェックします。

図22は、D入力のセットアップ/ホールド時間において重大な違反があることを示しています。カーソルAはクロックの立上りエッジ前の最小セットアップ時間2nsの位置に、カーソルBはクロックの立上りエッジ後の最小ホールド時間1nsの位置にセットしてあります。D入力は、クロックのこの立上りエッジ周囲3nsのデータ有効ウィンドウにおいて安定していなければなりません。このデータ有効ウィンドウ内でD入力に変化しているため、Dフリップフロップは正しく動作することが保証できません。

検証のこの時点で、Dフリップフロップの動作および信号に3つの問題点があることがわかりました。まず、クロックの立上りエッジが非モノトニックである（単調性がない）ということです。クロック・エッジが単調に変化するよう、クロック回路を設計しなおす必要があります。次の問題点は、D入力のセットアップ時間が2～4.188nsでは74F74は正しく動作しないということです。これは、クロックの立上りエッジが曖昧であるか、74F74が仕様を満たしていないことに関係しています。3番目の問題点は、D入力のセットアップ/ホールド時間違反です。クロック・エッジ周囲のセットアップ/ホールド時間ウィンドウ内では、D入力に変化しないように回路を設計しなおす必要があります。

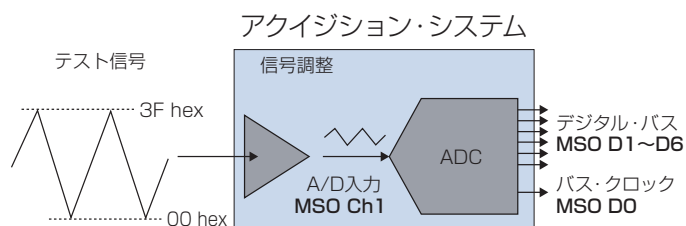


図23. センサ・データ・アキュイジション・システムの出力レンジ検証

## Wave Inspector®を使用したA/D出力の迅速な検証

この例では、センサのデータ・アキュイジション・システムの出力レンジを、固定の三角波テスト信号で検証します。センサのデータ・アキュイジション・システムは、20MS/s、6ビットのA/Dコンバータのアナログ信号調整回路です。A/Dコンバータの6ビット・バスはA/Dコンバータの立下りエッジで有効になります。アキュイジション・システムの入力における三角波テスト信号振幅は、ADC出力において00～3F hexの範囲となるはずですが。

MSOのアナログ・チャンネルを、信号調整回路の出力（A/Dコンバータの入力）に接続します。これにより、信号調整回路の出力とA/Dコンバータの入力信号をすばやく確認することができます。MSOのデジタル・チャンネルD0はA/Dコンバータのクロック出力に、デジタル・チャンネルD1～D6はA/Dコンバータの6ビット・データ・バスに接続します（図23を参照）。A/Dコンバータの入力信号の立上りエッジにトリガするようにMSOを設定します。

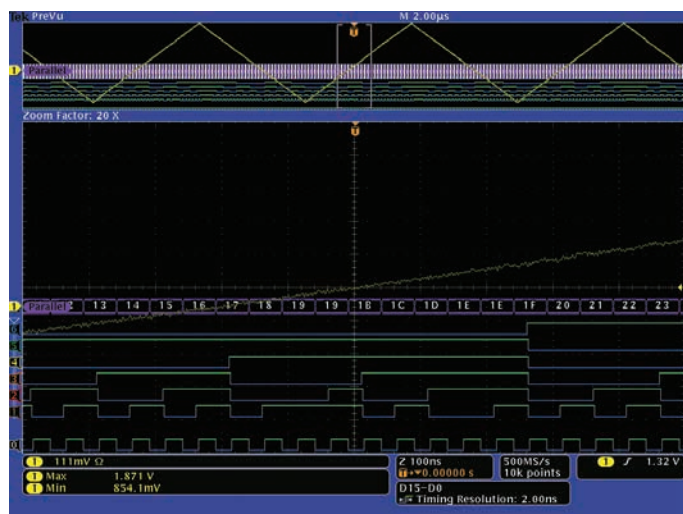


図24. MSOはA/Dコンバータ入力の立上りエッジにトリガし、Wave Inspectorでズーム表示すると、パラレル・バスの16進デコード結果が表示される。三角波テスト信号はCh1であり、一番下の波形は、デジタル・チャンネルD0でA/Dコンバータのクロック。デジタル・チャンネルD1～D6はA/Dコンバータの出力であり、クロック波形の上に表示されている。A/Dコンバータのデジタル信号は、グルーピングされてクロック・パラレル・バスとしてディスプレイ中央に表示されている

図24は、A/Dコンバータ入力の立上りエッジにトリガしている様子を示しています。当社MSOシリーズ独自のWave Inspector機能により、トリガ・ポイント周辺を20倍でズーム表示しており、パラレル・バスのデコード結果が表示されています。A/Dコンバータのデータは立ち下がりエッジで安定しており、クロックの立下りエッジにおいてバスの値にデコードされています。したがって、A/Dコンバータのデータが安定したときにクロックの立下りエッジでパラレル・バスが更新されます。

MSOの強力なトリガ機能は、パラレル・バスまたはシリアル・バスで信号異常を検出し、トリガし、問題となっているエリアのデータを取込みます。しかし、一度データを取込んだらば、それ以降、トリガは機能しません。長いレコード長をマニュアルで検索することはイライラしたり、時間のかかる作業となります。10Mポイントの波形レコード長は、9,700画面に相当します。最高分解能で10Mポイントの波形をスクロールするには、2時間40分以上かかります。Wave Inspectorを使えば、10Mポイントのレコード長から6ビット・データ・バスを検索して、マーク

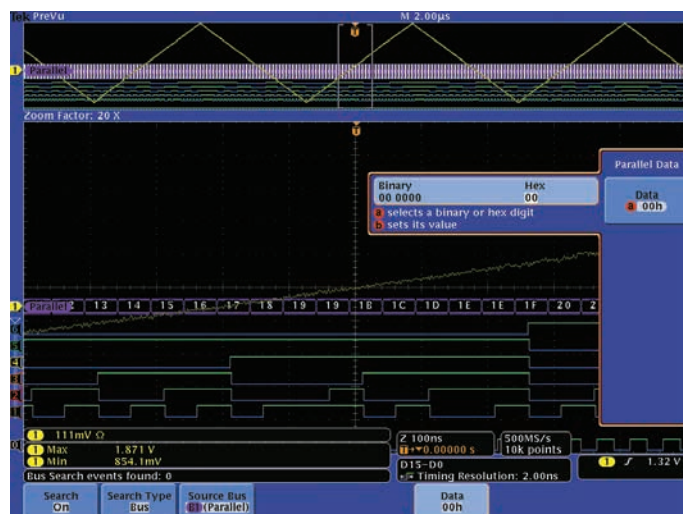


図25. Wave Inspectorの検索を使って確認しても、テスト信号に00 hexがないことを示している

を付けるのにかかる時間はわずか30秒です。データを検出してマークを付ければ、前面パネルの矢印ボタンを押すだけで、マークの付いたポイントにすばやく移動することができます。この検索機能は、エッジ、パルス幅、ラント、セットアップ／ホールド時間、ロジック、立上り／立下り時間、バスのデータ値などのトリガ・タイプでも利用できます。

図25は、Wave Inspectorにより、A/Dコンバータのパラレル・バスの各三角波テスト信号にあるべき00 hexの値を検索した様子です。ディスプレイ上部に白い▽のマークがないこと、またディスプレイ下のリードアウトにも「Bus Search events found : 0」とあるように、00 hexの値は検出できませんでした。00 hexがないということは、00 hexに相当するA/Dコンバータへのアナログ入力がないことを意味しています。アキュイジション・システムのアナログ信号調整回路はテスト・ランプ信号の最小ピークを正しく処理できておらず、A/Dコンバータが00 hexを出力するための最小A/D入力電圧になっていません。



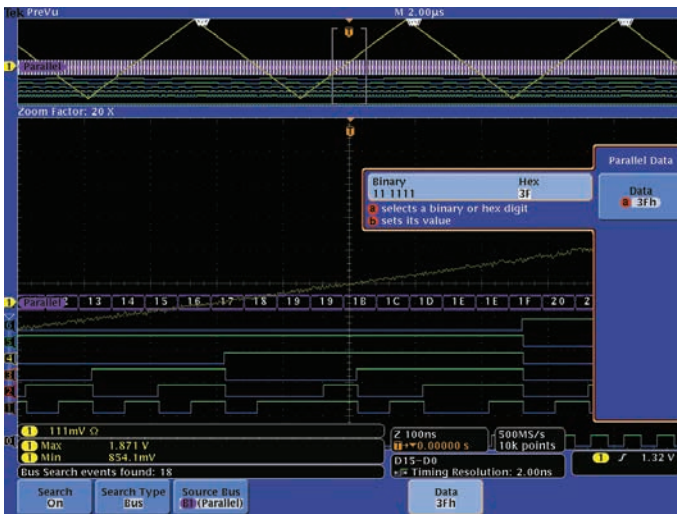


図26. Wave Inspectorは、テスト信号のピークにおいて数多くの3F hexを検出している

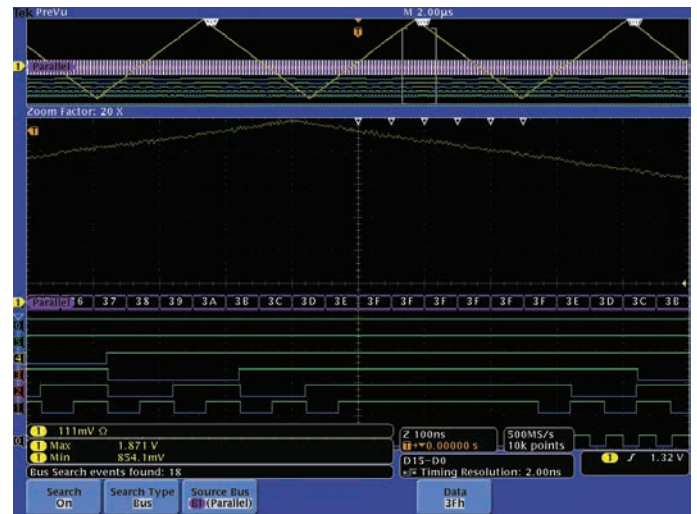


図27. Wave Inspectorは、テスト信号のピークの3F hexのマークにジャンプしている

図26は、A/Dコンバータの最大出力値3F hexをWave Inspectorで検索した様子であり、18個のイベントを検出しています。これらのイベントは3つのグループに分かれており、三角波テスト信号のピーク部分に現れています。それぞれのピーク部分には複数の3F hexがありますが、本来であれば各三角波テスト信号のピークに1つだけのはずです。

図27は、Wave Inspectorの矢印(→)キーを押して、図26のトリガ・ポジションから最初の右の位置にある、マークの付いた3Fのイベントにジャンプしている様子を示しています。MSOの表示の中央部分を見ると、A/Dコンバータのバスが37、38、39、3A、3B、3C、3D、3Eとなり、次に6個の3Fが続いています。本来であれば、三角波テスト信号のピーク部分に1つだけ3F hexが表示されるはずですが。

A/Dコンバータ入力の三角波テスト信号の最上部が切り取られて複数の3F hexになっていることも考えられますが、A/Dコンバータのアナログ入力波形を見る限り正常であるため、三角波テスト信号のピーク部分が切り取られていたり、歪んだりしているのではないようです。そうではなく、三角波テスト信号のピーク部の複数の3F hexは、アナログ信号がA/Dの最大入力電圧を超えていることを示しています。調整された三角波テスト信号がA/Dの最大入力電圧を超えたため、処理された信号がA/D最小入力電圧まで達していません。この問題を解決するためには、アキュイジション・システムの信号調整のオフセットとゲインを調整する必要があります。図27のディスプレイ左下を見ると、A/Dコンバータの入力波形の最大値は1.871V、最小値は854.1mVであることがわかります。信号調整を正しく行うためには、オフセット、ゲインの両方を適切に調整して下げる必要があります。

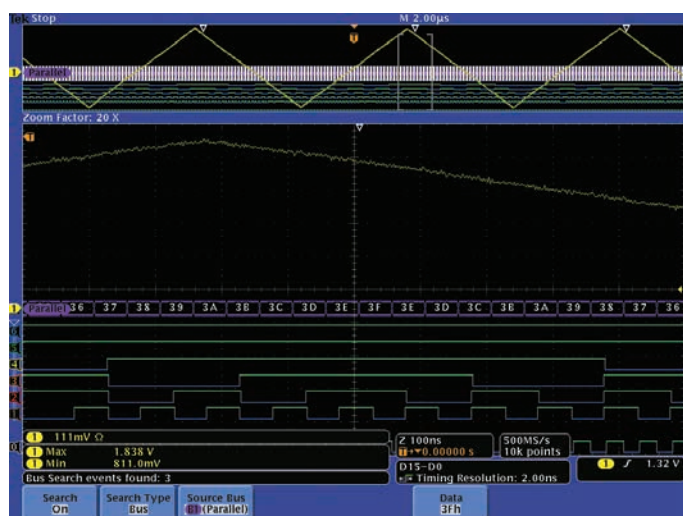


図28. 各ランプ・ピークにただ1つの3F hexがある正しい動作

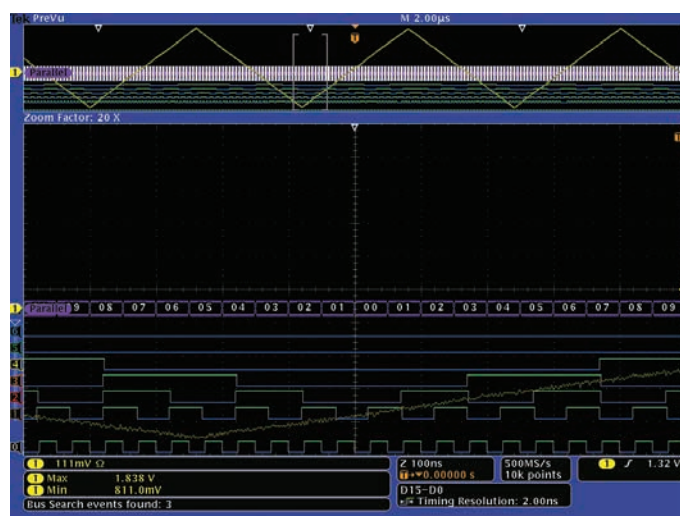


図29. 各ランプの底にただ1つの00 hexがある正しい動作

図28は、アキュイジション・システムのアナログ信号調整でゲインとオフセットを調整し、適切な三角波テスト信号がA/Dコンバータに入力された様子を示しています。ゲインとオフセットを調整した結果、A/Dコンバータの入力波形の最大値が1.871Vから1.838Vに低下しており、テスト・ランプ信号のそれぞれのピーク部分には3F hexが1つだけ表示されています。A/Dコンバータの最大入力が適性になったことを示しています。

図28を見ると、このアキュイジションにおけるA/Dコンバータの変換時間が簡単にわかります。A/Dコンバータの変換時間は、アナログ入力のピークからA/Dコンバータ出力に3F hexが現れるまでの時間となります。

図29は、Wave Inspectorにより、A/Dコンバータの平行・バスの各ランプ信号の底にあるべき00 hexの値を検索した様子

です。3つの00 hexが検出されており、それぞれが各テスト・ランプ信号に対応しています。最後に、Wave Inspectorの矢印（←）ボタンを押して、テスト・ランプ信号の底から最初の左の位置にある、マークの付いた00 hexにジャンプしています（図29を参照）。カウントは最小値の00 hexまで減り、その後増えており、アキュイジション・システムが正しく動作していることを示しています。バスの値はCSVファイルに保存できるため、Microsoft Excelを使って値が欠落していないか、重複していないかを確認することができます。

この例では、MSOのデジタル・チャンネルをクロック同期でデコードし、Wave Inspectorを使ってA/Dコンバータのバスの最大値、最小値の有無をすばやく特定しました。この結果、アナログ信号調整回路に問題があったことがすばやく特定できました。

## ミックスド・シグナル・オシロスコープを使用したデジタル・デバッグのヒント集

### まとめ

当社のMSOシリーズは、設計におけるデジタル、アナログ、ソフトウェアの複雑な関係を検証するエンジニアには欠かせないオシ

ロスコープです。基本的なロジック・アナライザ機能と使いやすいオシロスコープ機能を併せ持ち、強力なデジタル・トリガ機能、高分解能アキュイジション性能、内蔵の解析ツールなどを備えており、デジタル回路をすばやく検証、デバッグすることができます。

MSOシリーズには豊富な機種が用意されており、最適な一台をお選びいただけます。

|                            | MSO5000Bシリーズ                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | MDO4000Bシリーズ                                                                                                                                                                                                                                                                  | MSO4000Bシリーズ                                                                                                                                                                                                                                                                  | MSO3000シリーズ                                                                                                                                                                                                    | MSO2000Bシリーズ                                                                                            |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 周波数帯域                      | 2GHz、1GHz、500MHz、350MHz                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1GHz、500MHz、350MHz、100MHz                                                                                                                                                                                                                                                     | 1GHz、500MHz、350MHz、100MHz                                                                                                                                                                                                                                                     | 500MHz、300MHz、100MHz                                                                                                                                                                                           | 200MHz、100MHz、70MHz                                                                                     |
| チャンネル数                     | アナログ：4<br>デジタル：16                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | アナログ：4<br>デジタル：16<br>RF：1                                                                                                                                                                                                                                                     | アナログ：2または4<br>デジタル：16                                                                                                                                                                                                                                                         | アナログ：2または4<br>デジタル：16                                                                                                                                                                                          | アナログ：2または4<br>デジタル：16                                                                                   |
| レコード長<br>(全チャンネル、ポイント)     | 25M (標準)<br>125M (オプション)                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 20M                                                                                                                                                                                                                                                                           | 最大20M                                                                                                                                                                                                                                                                         | 5M                                                                                                                                                                                                             | 1M                                                                                                      |
| サンプル・レート (アナログ)            | 最高10GS/s                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 最高5GS/s                                                                                                                                                                                                                                                                       | 最高5GS/s                                                                                                                                                                                                                                                                       | 2.5GS/s                                                                                                                                                                                                        | 1GS/s                                                                                                   |
| サンプル・レート (デジタル)            | 500MS/s<br>(全レコード長)<br>16.5GS/s<br>(トリガ中心で<br>10kポイントの場合)                                                                                                                                                                                                                                                              | 500MS/s<br>(全レコード長)<br>16.5GS/s<br>(トリガ中心で<br>10kポイントの場合)                                                                                                                                                                                                                     | 500MS/s<br>(全レコード長)<br>16.5GS/s<br>(トリガ中心で<br>10kポイントの場合)                                                                                                                                                                                                                     | 500MS/s<br>(全レコード長)<br>8.25GS/s<br>(トリガ中心で<br>10kポイントの場合)                                                                                                                                                      | 1GS/s (1つのプローブ・<br>ボッドでD7~D0の任意<br>のチャンネル使用時)<br>500MS/s (2つの<br>プローブ・ボッドでD15<br>~D0の任意のチャンネル<br>使用時)   |
| カラー・ディスプレイ                 | 10.4型XGA                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 10.4型XGA                                                                                                                                                                                                                                                                      | 10.4型XGA                                                                                                                                                                                                                                                                      | 9型WVGA                                                                                                                                                                                                         | 7型WQVGA                                                                                                 |
| パラレル・バス解析                  | ○                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | ○                                                                                                                                                                                                                                                                             | ○                                                                                                                                                                                                                                                                             | ○                                                                                                                                                                                                              | ○                                                                                                       |
| シリアル・バス・トリガ/<br>解析アプリケーション | Opt. SR-EMBD :<br>I <sup>2</sup> C、SPI<br>Opt. SR-COMP :<br>RS-232/422/485/<br>UART<br>Opt. SR-USB :<br>USB 2.0<br>Opt. SR-AUTO :<br>CAN、LIN、FlexRay<br>Opt. SR-AERO :<br>MIL-STD-1553<br>Opt. SR-810B :<br>8B/10B解析<br>Opt. SR-PCIE :<br>PCI Express解析<br>Opt. SR-DPHY :<br>MIPI D-PHY解析<br>Opt. VNM :<br>CAN、LINデコード | DPO4EMBD型 :<br>I <sup>2</sup> C、SPI<br>DPO4USB型 :<br>USB 2.0<br>DPO4COMP型 :<br>RS-232/422/485/<br>UART<br>DPO4AUTO型 :<br>CAN、LIN<br>DPO4AUTOMAX型 :<br>CAN、LIN、FlexRay<br>DPO4AUDIO型 :<br>I <sup>2</sup> S/LJ/RJ/TDM<br>DPO4ENET型 :<br>Ethernet<br>DPO4AERO型 :<br>MIL-STD-1553 | DPO4EMBD型 :<br>I <sup>2</sup> C、SPI<br>DPO4USB型 :<br>USB 2.0<br>DPO4COMP型 :<br>RS-232/422/485/<br>UART<br>DPO4AUTO型 :<br>CAN、LIN<br>DPO4AUTOMAX型 :<br>CAN、LIN、FlexRay<br>DPO4AUDIO型 :<br>I <sup>2</sup> S/LJ/RJ/TDM<br>DPO4ENET型 :<br>Ethernet<br>DPO4AERO型 :<br>MIL-STD-1553 | DPO3EMBD型 :<br>I <sup>2</sup> C、SPI<br>DPO3COMP型 :<br>RS-232/422/485/<br>UART<br>DPO3AUTO型 :<br>CAN、LIN<br>DPO3FLEX型 :<br>FlexRay<br>DPO3AUDIO型 :<br>I <sup>2</sup> S/LJ/RJ/TDM<br>DPO3AERO型 :<br>MIL-STD-1553 | DPO2EMBD型 :<br>I <sup>2</sup> C、SPI<br>DPO2COMP型 :<br>RS-232/422/485/<br>UART<br>DPO2AUTO型 :<br>CAN、LIN |
| その他のアプリケーション・<br>サポート      | パワー解析<br>リミット/マスク・<br>テスト<br>ジッタ/タイミング<br>USB 2.0の適合性<br>Ethernetの適合性<br>BroadR-Reachの<br>適合性<br>MOSTの適合性<br>ビジュアル・トリガ                                                                                                                                                                                                 | パワー解析<br>拡張RFパワー・レベル・<br>トリガ<br>HDTV/カスタム・ビデオ<br>リミット/マスク・テスト                                                                                                                                                                                                                 | パワー解析<br>HDTV/カスタム・ビデオ<br>リミット/マスク・テスト                                                                                                                                                                                                                                        | パワー解析<br>HDTV/カスタム・ビデオ                                                                                                                                                                                         | —                                                                                                       |

ASEAN／オーストラリア・ニュージーランドと付近の諸島 (65) 6356 3900  
ベルギー 00800 2255 4835\*  
中央／東ヨーロッパ、バルト海諸国 +41 52 675 3777  
フィンランド +41 52 675 3777  
香港 400 820 5835  
日本 0120 441 046  
中東、アジア、北アフリカ +41 52 675 3777  
中国 400 820 5835  
韓国 001 800 8255 2835  
スペイン 00800 2255 4835\*  
台湾 886 (2) 2722 9622

オーストリア 00800 2255 4835\*  
ブラジル +55 (11) 3759 7627  
中央ヨーロッパ／ギリシャ +41 52 675 3777  
フランス 00800 2255 4835\*  
インド 000 800 650 1835  
ルクセンブルク +41 52 675 3777  
オランダ 00800 2255 4835\*  
ポーランド +41 52 675 3777  
ロシア／CIS +7 (495) 7484900  
スウェーデン 00800 2255 4835\*  
イギリス／アイルランド 00800 2255 4835\*

バルカン諸国、イスラエル、南アフリカ、その他SE諸国 +41 52 675 3777  
カナダ 1 800 833 9200  
デンマーク +45 80 88 1401  
ドイツ 00800 2255 4835\*  
イタリア 00800 2255 4835\*  
メキシコ、中央／南アメリカ、カリブ海諸国 52 (55) 56 04 50 90  
ノルウェー 800 16098  
ポルトガル 80 08 12370  
南アフリカ +41 52 675 3777  
スイス 00800 2255 4835\*  
アメリカ 1 800 833 9200

\* ヨーロッパにおけるフリーダイヤルです。ご利用にならない場合はこちらにおかけください。+41 52 675 3777

Updated 10 February 2011



3GZ-24008-6  
2013年12月

**Tektronix®**

〒108-6106 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティ B棟6階  
デクトロニクス お客様コールセンター TEL: 0120-441-046  
電話受付時間／9:00～12:00・13:00～18:00(土・日・祝・弊社休業日を除く)

**jp.tektronix.com**

記載内容は予告なく変更することがありますので、あらかじめご了承ください。

Copyright © Tektronix. All rights reserved. TEKTRONIX およびTEK はTektronix, Inc. の登録商標です。Microsoft、Windowsは、米国Microsoft Corporationの登録商標です。記載された製品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。