

デジタイザシステムの問題と解決

はじめに：

デジタイザ (A/D ボード) を使用して測定を行う際には、データ劣化により時間を費やす可能性のある一般的なセットアップの問題に注意することが重要です。発生する可能性があるセットアップ問題には、

1. エイリアシング
2. 分解能が不十分
3. 振幅レンジ設定が正しくない
4. カップリングが適切でない
5. 終端処理が適切でない
6. トリガ設定が適切でない
7. 過剰ノイズとスプリアス

があります。ここでは、これらの各問題を調べこれらのエラーの発生を防ぐ方法について説明します。

標本化定理（サンプリング定理）：

デジタイザ (A/D コンバータ) ができて以来、入力信号のサンプリングによるエイリアシングは、標本化定理（サンプリング定理）として知られており、原理的に発生する現象です。デジタイザ (A/D ボード) やデジタルオシロスコープなどのサンプルデータ機器では、標本化定理に基づいて入力に存在する最高周波数成分の2倍以上の周波数でアナログ信号をサンプリングする必要があります。この基準が満たされていないと、エイリアシング（折り返し雑音）が発生する可能性があります。現在のデジタイザ設計は一般に、アナログ帯域幅を大幅に超えるサンプリングレートの A/D コンバータを組み込んでいます。これを大容量の取得メモリと組み合わせることで、このエイリアシングを最小限に抑えます。しかしながら、サンプリングレートを低く設定した場合は、エイリアシングに注意する必要があります。

サンプリングシステムは入力アナログ信号をサンプリングし、デジタルの数値データを保存します。サンプルレートが標本化定理を満たしている場合は、情報を失うことなく信号を再現できます。アナログ入力波形が最大周波数の2倍未満でサンプリングされた場合、デジタルデータは再現できず、オリジナルよりも低い周波数の波形をもたらします。

Figure 1 は、Spectrum 社 M4i.4450-x8、500 MS/s、14 ビットデジタイザ (A/D ボード) と SBench6 ソフトウェアを使用した例を示しています。

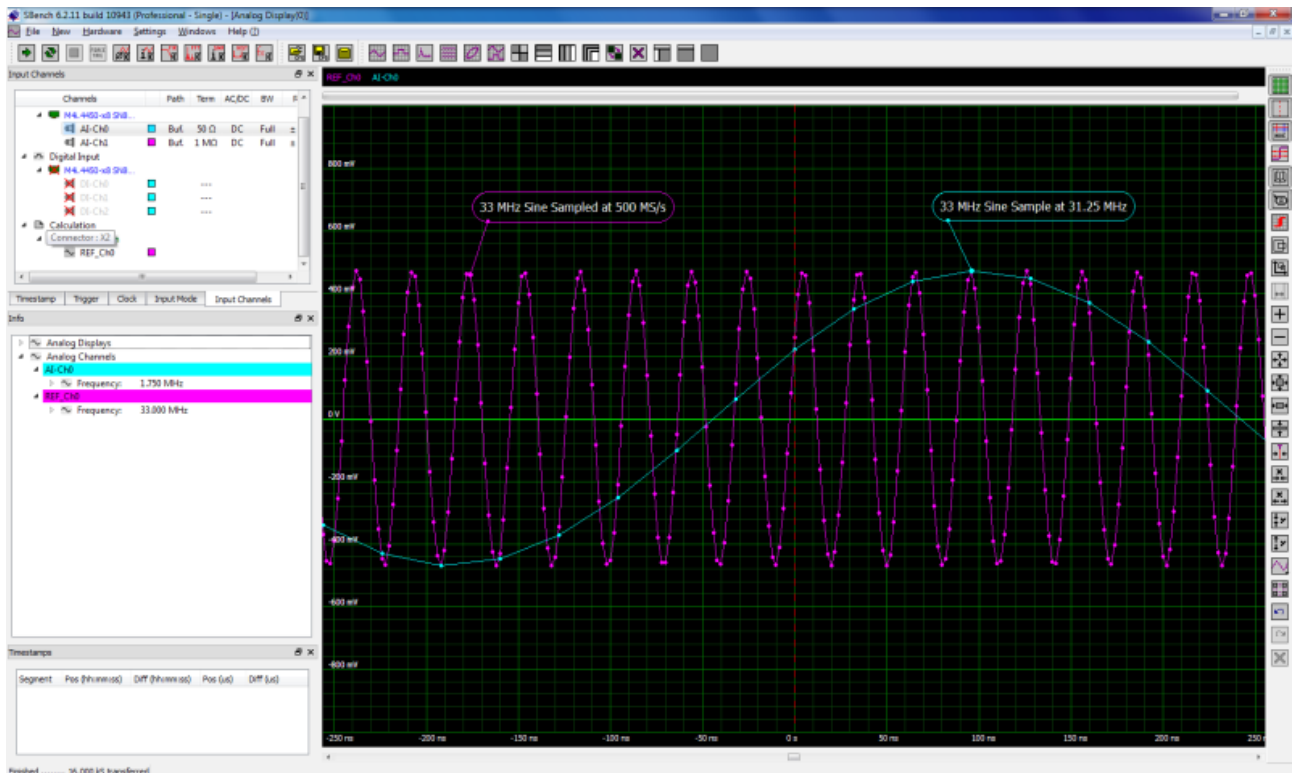


Figure 1 500 MS/s および 31.25 MS/s でサンプリングされた 33 MHz の正弦波。31.25 MS/s でサンプリングされた信号にはエイリアスがあり、33 MHz の周波数を持つ適切にサンプリングされた信号と比較して、1.75 MHz の測定周波数しかありません。

周波数領域（FFT）でのエイリアシング：

周波数領域（FFT）でも同じ効果が見られます。これを Figure 2 に示します。

入力信号は、最大周波数 2.66MHz の正弦波掃引です。サンプリングはミキシングプロセスであり、ベースバンド信号（0～2.66 MHz）はサンプリング周波数の倍数について複製（折り返し）されます。そのため、一番上のグリッドでは、15.6 MS/s でサンプリングされた入力信号が右側と左側に確認できます。ベースバンド信号は、15.6 MHz のサンプリング周波数を中心にした上側および下側にイメージとして複製されます。中央グリッドのようにサンプリングレートが 6.2 MHz に低下すると、下側のイメージがベースバンド信号に近づきます。一番下のグリッドでは、サンプリングレートがナイキスト限界（最大入力周波数の 2 倍、つまり 5.2 MS/s）まで引き下げられています。このサンプリング周波数では、サンプリング周波数の下側イメージがベースバンド信号と干渉しエイリアシングが発生することがわかります。

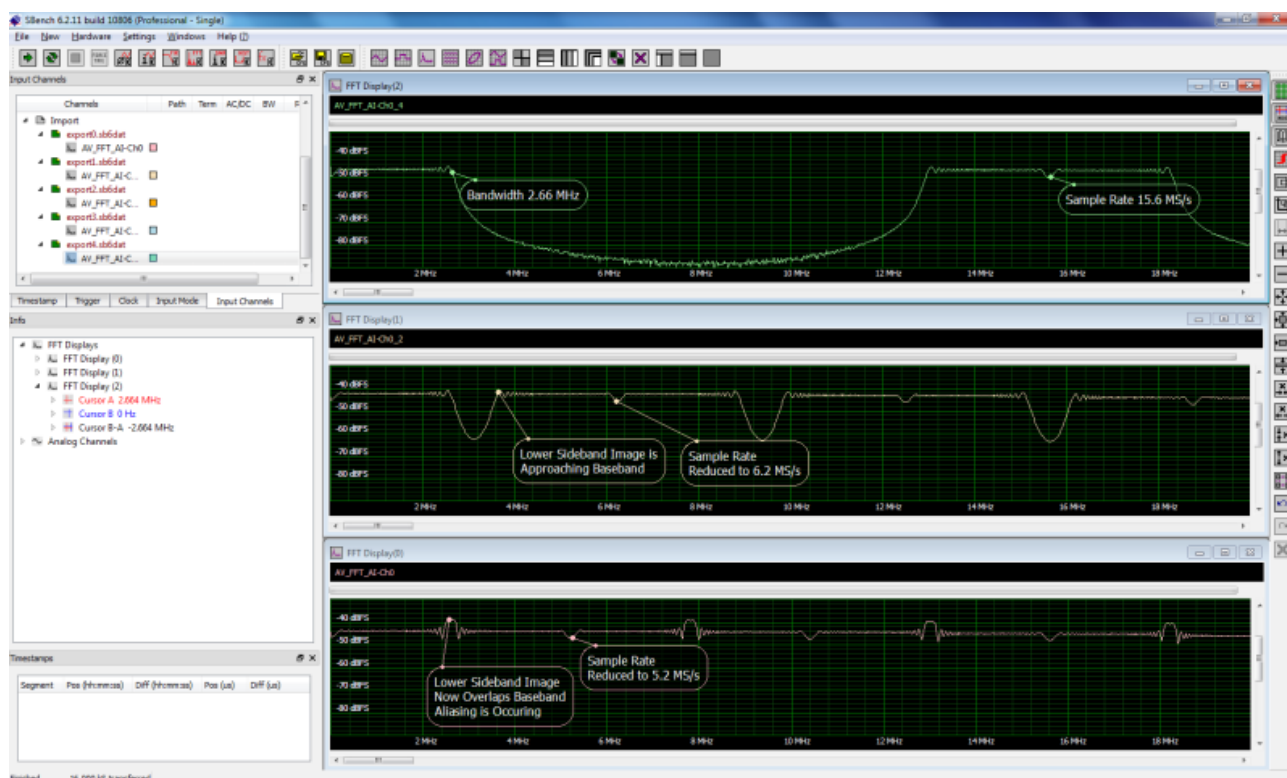


Figure 2 周波数領域でのエイリアシングは、ベースバンド成分を妨害するサンプリング周波数に関する画像の下側波帯によって証明されます。

エイリアシング（折り返し雑音）の認識：

エイリアシングは通常、元の信号よりも低い周波数の波形になります。測定された信号の周波数を知り、それがエイリアスされていないことを確認するために検証するのは良い手法です。デジタイザ（A/D ボード）が入力信号でトリガされた場合、エイリアス信号も不安定に見えます。これは、デジタイザ（A/D ボード）が入力信号でトリガされ、エイリアスの周波数が低いと複数のトリガポイントが発生して不安定になるためです。

利用可能な最大サンプリングレートですべての信号を取得し、必要に応じてサンプリングレートを下げるのが良い手順です。エイリアシングが発生した場合は、サンプリングレートが低いと取得信号の周波数が低下します。

不十分な分解能：

デジタイザ（A/D ボード）は、アナログ/デジタル変換器（ADC）を使用して、アナログ信号をサンプリングしてデジタル値に変換します。ADC の分解能は、入力サンプルをデジタル化するために使用するビット数です。n ビット ADC の場合、生成される離散デジタルレベルの数は 2 の n 乗です。したがって、12 ビットデジタイザは 4096 レベルに分解することができます。最下位ビット（lsb）は検出可能な最小間隔を表し、12 ビットデジタイザの場合は 1/4096 です。LSB を電圧に変換するにはデジタイザ（A/D ボード）の入力範囲をデジタイザの分解能で割ります。

分解能は測定の精度を決定します。デジタイザ（A/D ボード）の分解能が高いほど、測定値はより正確になります。

Spectrum M4i.2210-x8 1.25 GS/s デジタイザ（A/D ボード）のような 8 ビット ADC を備えたデジタイザは、入力ア

ンプの垂直レンジを 256 の離散レベルに分解します。1V の垂直レンジでは、8 ビット ADC の場合 $1 \div 256 = 3.91\text{mV}$ となり 3.91mV より小さい電圧差を検出できません。一方、65,536 の離散レベルを持つ Spectrum M4i.4420-x8 250 MS/s デジタイザ (A/D ボード) のような 16 ビット ADC の場合、 $1 \div 65,535 = 15\mu$ となり 15 μ V の電圧差を検出することができます。

高分解能デジタイザ (A/D ボード) を使用する 1 つの理由は、微小信号を測定することです。最小電圧レベルの計算方法に基づいて、低い電圧を測定するために低分解能の機器と低入力レンジを使用することができますが、多くの信号は小さな信号成分と大きな信号成分の両方を含んでいます。したがって、大きな電圧成分と小さな電圧成分の両方を含む信号の場合、高いダイナミックレンジと小信号と大信号を同時に測定するデジタイザ (A/D ボード) の機能を備えた高分解能の機器が必要です。異なる解像度のデジタイザを通過した場合の波形の外観を調べてみましょう。

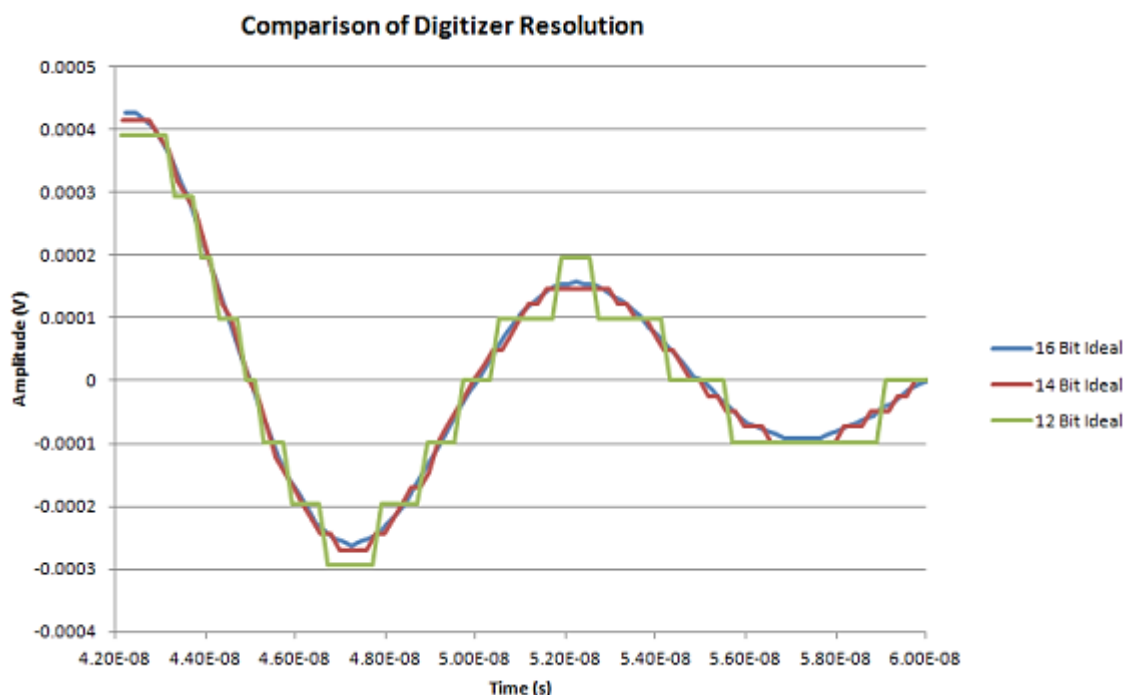


Figure 3 デジタイザの分解能と測定精度の比較

Figure 3 は、減衰した正弦波で 12 ビット、14 ビット、16 ビットのデジタイザ出力波形を比較したものです。入力信号は減衰しており振幅が小さくなっています。14 ビット (赤) と 16 ビット (青) のデジタイザは依然として信号を正確に表現するのに十分な分解能を持っていますが、100 μ V の分解能 ($\pm 200\text{mV}$ のフルスケールレベルに基づく) の 12 ビットデジタイザは 100 μ V より小さいレベルを分解することができません。読み取りの誤差は、どの分解能でも信号振幅が小さいほど大きくなります。但しこれは理想的なケースであることに注意してください。現実の世界では、ノイズが正確さと精度を制限します。

また、フィルタリングやアベレージングなどの信号処理ツールはデジタイザの分解能を向上させることができますが、デジタイザを選択する前に測定のダイナミックレンジの要件を考慮してから、適切な分解能のデジタイザを選択することが重要です。

振幅レンジの選択：

高性能のデジタイザ (A/D ボード) は、複数の測定要件に対応するために幅広い入力電圧レンジを提供します。使用する振幅レンジを選択する際に守るべき一般的な規則は、入力信号がデジタイザのフルスケールレンジの大部分を占めるようにすることです。可能であれば、利用可能な範囲の 90~95% での利用を目指すことをお勧めします。そうすることで、利用可能なダイナミックレンジと信号対雑音比 (S/N 比) が最大になります。

ここで最も一般的な誤りは、デジタイザ (A/D ボード) のダイナミックレンジのごく一部しか使用しないことです。たとえば、 $\pm 2\text{V}$ の入力信号を、 $\pm 5\text{V}$ のフルスケールレンジで使用することです。Figure 4 を参照してください。

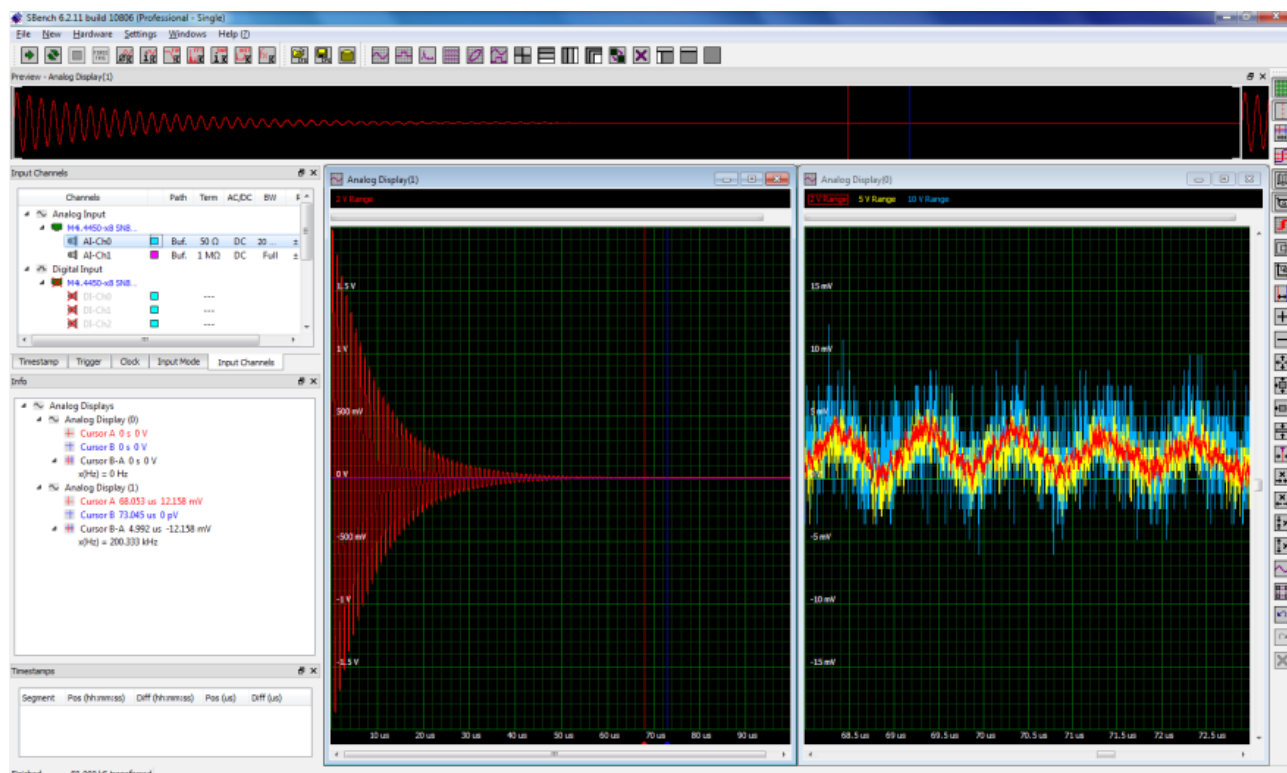


Figure 4 減衰正弦波を取得した効果と、 ± 2 (赤)、 ± 5 (黄)、 ± 10 (青) の電圧レンジで取得した ± 2 ボルトのレンジを比較します。左側のグリッドには完全な信号が含まれ、右側のグリッドには拡大された範囲が表示されます。 ± 2 ボルトのレンジで取得した信号のノイズレベルが最も低いことに注意してください。

入力信号は ± 2 ボルトの減衰正弦波です。この信号を、 $\pm 2\text{V}$ 、 $\pm 5\text{V}$ 、 $\pm 10\text{V}$ のレンジで取得します。 $\pm 2\text{V}$ レンジを使用したフル信号波形は左のグリッドに表示されています。カーソルの位置 (赤と青の垂直線) を拡大したのが右側のグリッドに表示されています。 $\pm 2\text{V}$ レンジで取得された波形 (赤) は、最も低いノイズレベルであることに注目してください。 $\pm 5\text{V}$ (黄) と $\pm 10\text{V}$ (青) のレンジで取得した波形は、ノイズレベルが高くなります。

アッテネータが信号経路内にあるときに発生する問題の 1 つは、フロントエンドのアッテネーションに合わせて、機器の内部ノイズ振幅が (アッテネータの入力に対して) 増減することです。したがって、ノイズレベルが $58\text{ }\mu\text{V rms}$ のデジタイザがあり、10 : 1 の減衰器を追加すると、入力を基準としたノイズレベルは $580\text{ }\mu\text{V}$ になります。ノイズレベルは、減衰させたフルスケールレンジの相対比率と同じですが、低い信号レベル (10 V レンジで 5 V 信号など) を使用する場合は、ダイナミックレンジを半分だけ使用することで 6 dB 減少し、S/N 比を減少することができます。

もう 1 つの一般的なセットアップの誤りは、低いレンジで信号を取得することです。信号がフルスケール範囲を超え

ると、クリッピングが発生します。過大入力（A/D ボード）の最大電圧範囲を超えると、デジタイザ（A/D ボード）が損傷する可能性があります。過大入力領域では情報が不足しているため、波形のこの部分は役に立ちません。高速フーリエ変換（FFT）やデジタルフィルタリングなどの一部の信号処理機能は、過大入力データに基づいて誤った結果を生成します。



Figure 5 50 mV の正弦波で 1V の方形波に対する過負荷の影響を観察します。2 対 1 の過負荷時には、過負荷回復の遅延はほとんどありません。5 対 1 の過負荷では、大幅な過負荷回復遅延があります。

デジタイザ（A/D ボード）の過大入力リカバリ機能によっては、範囲内の波形が歪むことがあります。この機能を使用して、大きな信号がある状態で小さな信号を確認したい場合は、Figure 5 に示すように、低レベルの信号が歪んでいないことを慎重に確認する必要があります。

入力信号は、50 mV の正弦波を含んだ 1V の方形波です。1V レンジでのデジタイザの出力は、基準波形（白）として示しています。500 mV レンジの出力（赤）は、わずかな初期遅延を示していますが、約 70 ns ですぐに回復しています。入力が 5 : 1（200 mV のレンジ、青）で過大入力になると、初期遅延は約 8 ns になり、リカバリに 70 ns かかっています。測定された波形はデジタイザの過大入力リカバリ期間中に歪み、歪みは過大入力の程度に依存します。デジタイザ（A/D ボード）のフロントエンドを過大入力にするよりも、より広いダイナミックレンジを持つデジタイザ（A/D ボード）を使用し、ズーム機能を使用して取得信号を拡大することをお勧めします。

不適切なカップリング：

Spectrum 社の M4i シリーズのようなデジタイザ（A/D ボード）の入力カップリングは、入力信号を AC または DC 結

合する機能を提供します。DC 結合は、DC オフセット（ゼロ以外の平均信号）を含む信号全体を表します。AC 結合は、定常状態の平均値（DC）を排除します。AC 結合は、DC 電源の出力のリプル測定などの計測に役立ちます。AC 結合がないと、DC 出力に大きな信号減衰が必要になり、リップルを正確に測定することが難しくなります。AC 結合では、より高い入力感度を使用することができ、その結果、リップル成分の測定が向上します。

AC 結合の主な仕様は、AC 結合周波数応答の低周波数カットオフ（-3 dB ポイント以下）です。これは、AC 結合によって低周波信号がどれだけ減衰されるかを決定します。これは機器に適用される DC レベルが変化した後に入力レベルが安定するのにかかる回復時間にも関係しています。一般に、カットオフ周波数が低いほどカップリングコンデンサは大きくなり、整定時間は長くなります。

AC 結合に関する問題は、一般にデジタイザの AC 結合のカットオフ周波数の近くまたはそれより低い低周波数成分を有する信号を測定しようと試みることに関連します。Figure 6 を参照してください。

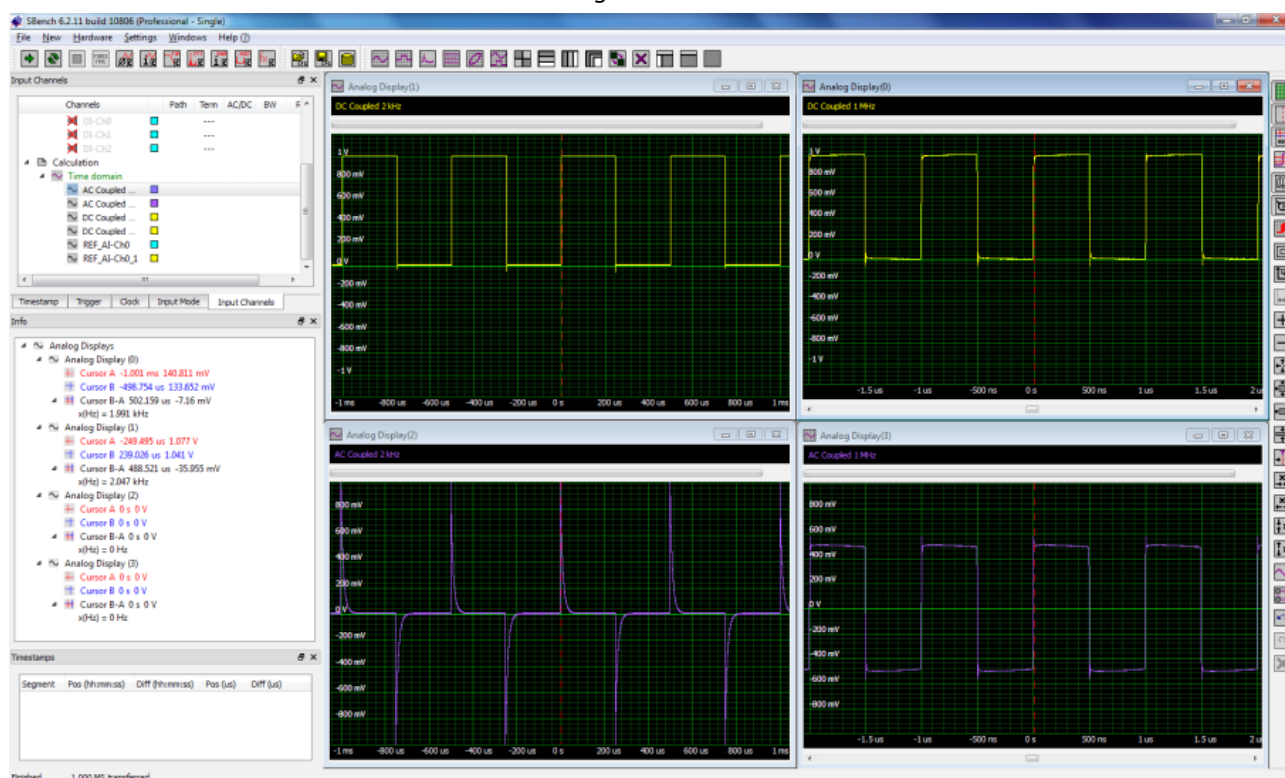


Figure 6 AC 結合は、2 kHz の方形波などの AC 結合の下限カットオフ周波数に近い周波数成分を持つ波形の信号品質に影響を与えますが、1 MHz の方形波の波形には影響しません。

2つの入力信号は、ゼロ以外の平均値を持つ方形波です。1つは2 kHzの周波数（左上）、もう1つは1 MHz（右上）です。どちらもデジタイザのAC結合入力に接続します。ここで、ACカップリングと50Ω終端を使用したM4i.4450-x8、14ビット、500 MS/sデジタイザ（A/Dボード）は、30 kHzの低いカットオフ周波数を持っています。右下のグリッドに示すように、AC結合を使用すると、1 MHzの方形波からDCオフセットが除去されます。一方、左下のグリッドに示すように、30 kHzのカットオフ周波数より低い2 kHzの方形波は微分されます。結合回路は高周波成分のみを通過させ、信号のエッジのみを通過します。信号周波数が高くなると、AC結合の影響は減少します。下側カットオフ付近の周波数は「傾き」を示します。方形波の上部が右下に傾斜します。そのため、デジタイザ（A/Dボード）のAC結合の低いカットオフ周波数を知ることが重要です。1メガオーム（MΩ）の入力終端を使用するデジタイザ（A/Dボード）のカットオフ周波数は2 Hzであり、これにより良好な信号忠実度でより優れた範囲の信号周波数が得られま

す。

不適切なターミネーション：

測定器は電源を正しく終端する必要があります。ほとんどの無線周波数（RF）測定では、一般に 50Ω 終端が使用されています。終端整合は、反射による信号損失を最小限に抑えます。50Ω マッチングの性能指数は、リターンロスまたは電圧定在波比（VSWR）です。これらの性能指数のどちらも、インピーダンス整合の品質を示しています。

信号ソースの出力インピーダンスが高い場合は、1MΩ の高インピーダンス終端とより適切に整合されているため、回路負荷が最小限に抑えられます。1MΩ 終端では、負荷インピーダンスをさらに増加させるハイインピーダンスプローブを使用することもできます。

ビデオ用の 75Ω やオーディオ用の 600Ω など、他の標準的な終端とのインピーダンス整合は、1MΩ の終端と適切な外部終端を組み合わせることによって実現できます。

誤った終端を選択すると、Figure 7 に示すように、波形歪みが生じる可能性があります。この例の信号源は、50Ω の出力インピーダンスを持つ任意波形発生器（AWG）です。デジタイザ（A/D ボード）で 50Ω 終端（黄）が選択されていると、入力には 1V から 0V までのステップ電圧が表示されます。これは AWG で選択された信号振幅です。1MΩ 終端が選択されている場合（赤）、振幅は 2 倍にな

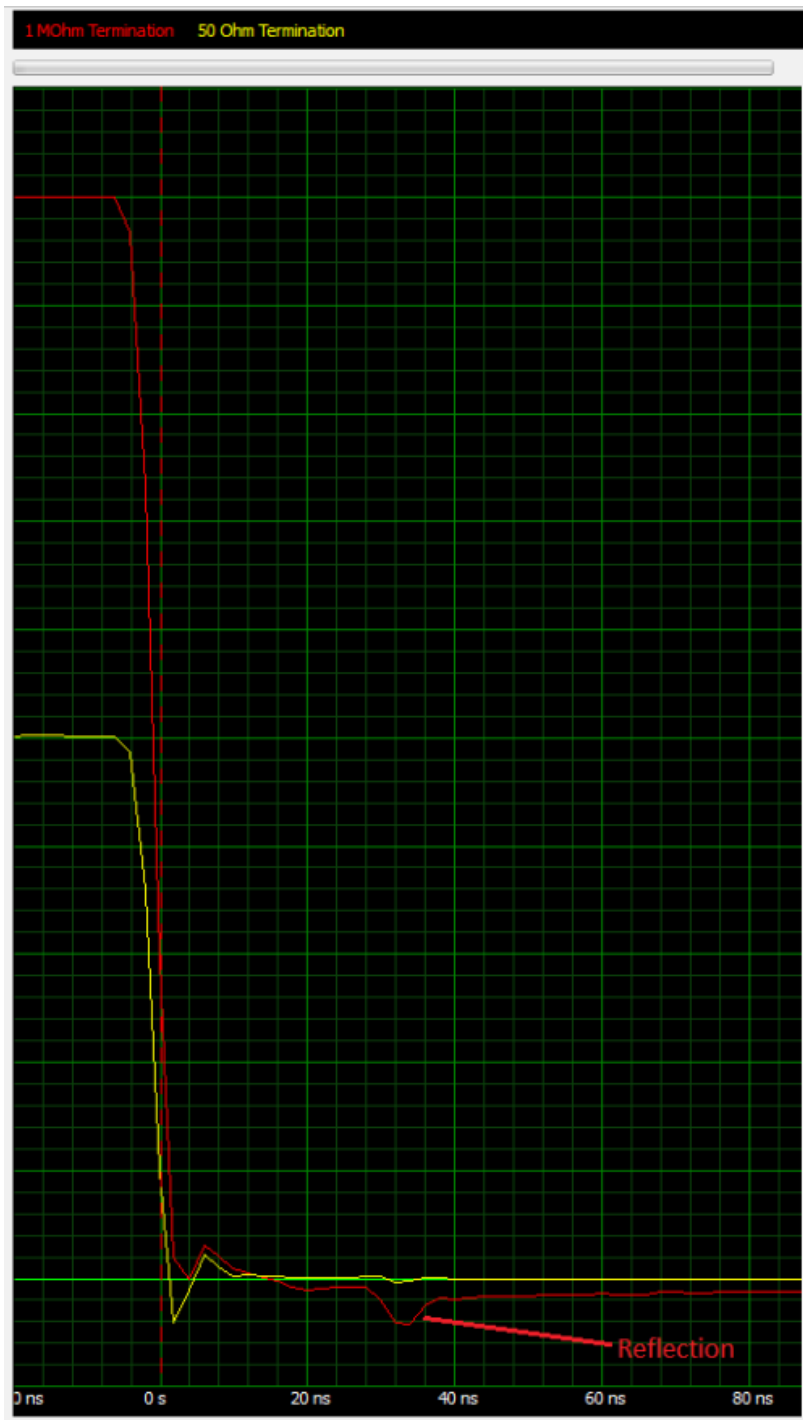


Figure 7 50Ω と 1 MΩ の両方の終端を使用して、デジタイザの応答を 50Ω ソースと比較します。1 MΩ の終端（赤）は、予想される振幅の 2 倍を示し、ソースとデジタイザ間のインピーダンス不整合による反射を示しています。

り（50Ωソースが終端されていないことから予想されるように）、負のステップの後 32ns で反射が発生します。この反射は、測定デジタイザ（A/D ボード）側の不一致によるものです。1MΩ終端を選択すると、2つのシグナルインテグリティエラーが発生します。これは、経験の浅いエンジニアが遭遇すると、不要なトラブルシューティングの原因となる可能性があります。測定している信号を常に正しい負荷インピーダンスで試して終端することをお勧めします。

トリガ設定：

トリガは、信号を取得してデジタル化する機器にとって不可欠な機能です。最も一般的なトリガ方法は、デジタイザ（A/D ボード）チャンネルの1つに入力される信号を使用します。基本原理は、波形上の定義されたポイントが検出され、この「トリガイイベント」が取得データ上の既知の位置としてマークされることです。トリガ機能は、時間測定値を特定の既知の時点にリンクすることです。繰り返し信号の場合、ある集録の測定値を他の集録のものと比較できるようにするには、トリガが安定している必要があります。

信号波形、レベル、タイミングは様々であるため、デジタイザ（A/D ボード）のトリガ回路は非常に柔軟である必要があります。主なトリガ入力ソースはデュアルトリガレベルコンパレータを含み、複数のトリガモードをサポートします。Spectrum 製 M4i シリーズのような最新のデジタイザ（A/D ボード）はすべて、シングルおよびデュアルスロープエッジトリガ、リアーム（ヒステリシス）トリガ、ウィンドウトリガを備えています。マルチソーストリガには、関連するトリガゲートジェネレータがあります。トリガモードと設定が多数あることを考えると、適切なトリガ条件を選択することは困難です。最も一般的な問題は、誤ったトリガレベルを使用していること、および波形内の複数のトリガイイベントを処理できないことです。これらの問題は両方とも、実際にトリガ信号を見ることで対処できます。Spectrum 社の SBench 6 ソフトウェアは、トリガレベルがトリガ波形の上に重なって表示されるようにすることで、トリガ設定を支援します。さらに、Figure 8 に示すように、トリガ設定はそれを詳細に説明するポップアップウィンドウによって文書化されています。

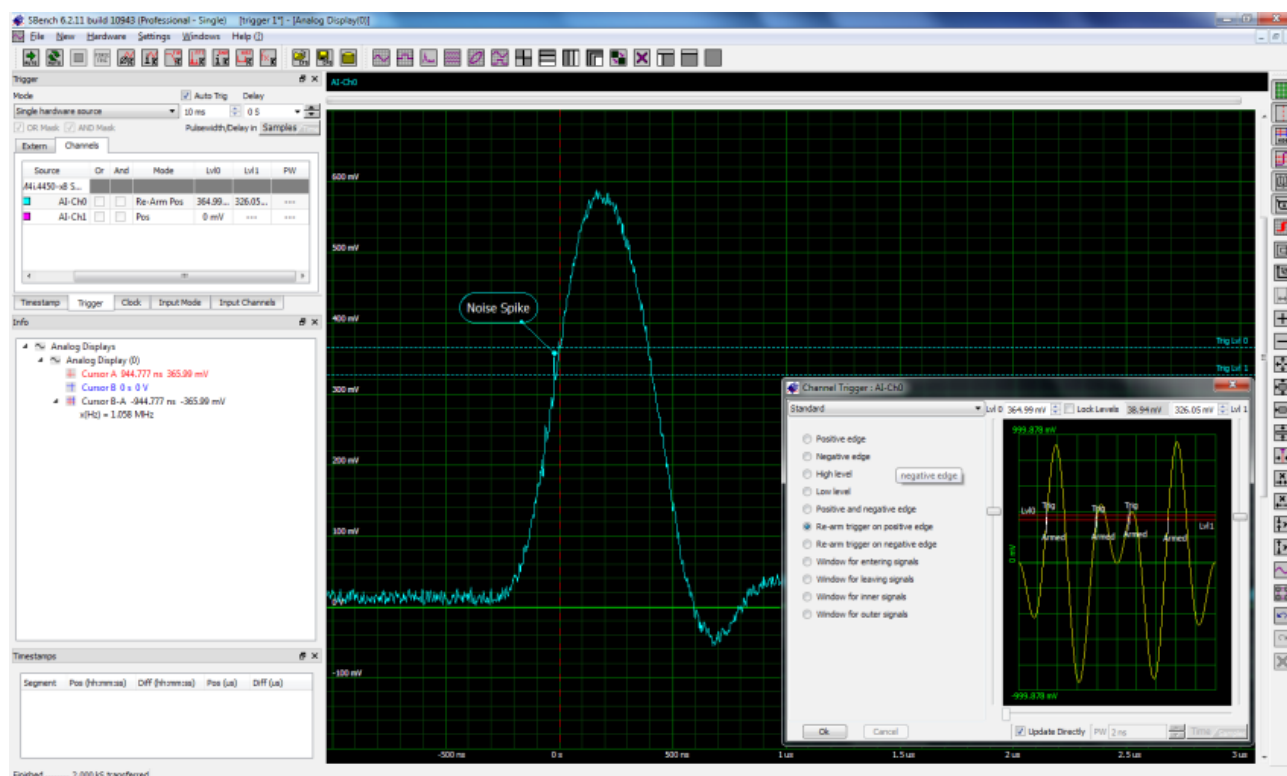


Figure 8 トリガ信号を表示して、トリガ設定の問題を回避します。SBench6はトリガレベルをオーバーレイし、使用されているトリガモードの詳細な説明を提供します。

トリガソース波形を表示すると、適切なトリガレベルを選択できます。この場合、ポジティブアームまたはヒステリシストリガモードが使用されています。トリガソースはノイズの多いパルス波形です。目的は、ノイズの影響を最小限に抑えながら、信号でデジタイザ (A/D ボード) をトリガすることです。このトリガモードには2つのトリガレベルがあります。最初の TrigLvl1 がトリガを有効にします。波形が立ち上がりでこのレベルを超えると、2番目の TrigLvl 0 がデジタイザの集録をトリガします。これは、図に示すチャンネルトリガポップアップで説明されています。リアームトリガは、ノイズがある場合に確実にトリガするために使用されます。2つのトリガレベルの違いはトリガヒステリシスで、これは波形上の標準的なノイズスパイクよりも大きくなるように設定されています。この場合、デジタイザ (A/D ボード) はアームレベルとトリガレベルの間のノイズスパイクを無視します。デジタイザのトリガは低いトリガレベルで作動しますが、ノイズスパイク振幅はヒステリシスを超えていなかったため、波形の立ち上がり再開したときにデジタイザ (A/D ボード) がトリガします。

ノイズと干渉：

高分解能デジタイザ (A/D ボード) は内部ノイズを最小限に抑えるように設計されており、ダイナミックレンジが大きいため、外部ノイズや干渉信号が混在しないようにすることが重要です。干渉信号は、信号ケーブルまたは放射信号により測定値に影響します。

伝導ノイズは一般的に、2つ以上の回路要素が異なるグラウンドを基準としているグラウンドループによるものです。正確な測定には適切な接地が不可欠です。グラウンドループは 50/60 Hz とそれに関連する高調波をシステムに誘導しま

す。これらはフィルタすることができますが、可能な限りそれを避けることをお勧めします。その他の伝導経路は、電源バスから結合されたスプリアス信号が含まれます。このタイプの干渉の例を Figure 9 に示します。

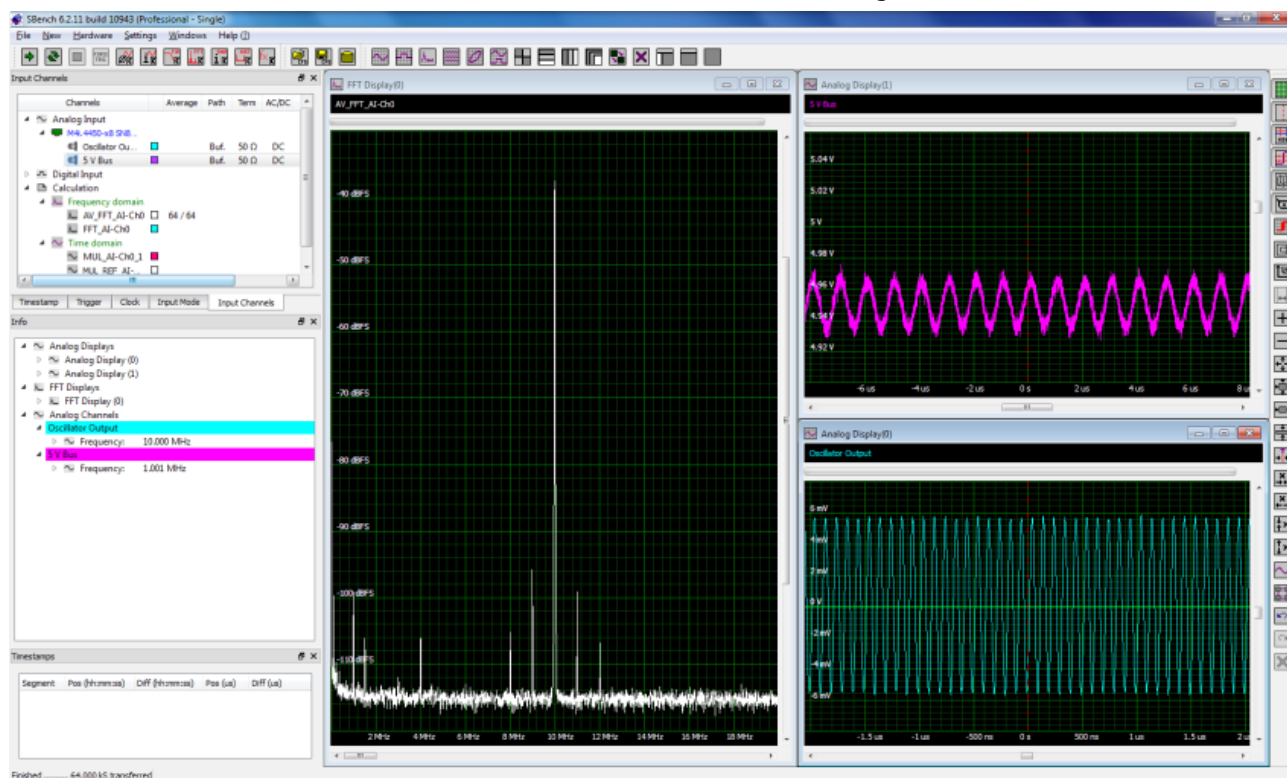


Figure 9 5V 電力バス接続を介して 10 MHz 発振器に伝達される 1 MHz 干渉信号の例

10 MHz 発振器の出力が右下のグリッドに表示されています。発振器出力の FFT（左グリッド）を見ると、10 MHz の搬送波から 1 MHz の間隔でサイドバンドが見られます。これは、発振器の出力が 1 MHz のソースによって変調されていることを示しています。発振器に供給する 5V の電源が右上のグリッドに表示されていますが、振幅 40 mV、1 MHzp-p のリップルがバスに乗っていることがわかります。これがオシレータ出力の 1 MHz 変調の原因となります。放射ノイズは、容量結合、誘導結合、または RF 結合によるものです。干渉は、信号源から被試験回路の配線に直接放射されます。この干渉の影響は、結合の性質と回路構造によって異なります。

外部ノイズや干渉はデジタイザ（A/D ボード）側の問題ではありませんが、測定の設定アップが測定の不確かさの原因となる可能性があることに注意してください。測定システムでノイズとスプリアスを低減するための手法を以下に示します。

- 可能な限り低インピーダンス終端（50Ω）を使用する
- 正確な測定に必要な最小帯域幅を使用する
- 測定器側で低ノイズのアースに接続されたシールドケーブルを使用する
- 低周波信号には、差動入力を備えたデジタイザ及び差動ケーブルを使用する
- 被試験回路からできるだけ離れた場所に放射源を配置する
- 磁気シールドを使用してモーターや他の電磁装置の放射ノイズを減らす
- すべての測定器を共通の低ノイズのアースに接地する

- 高品質、低損失のケーブルを使用する
- ケーブルが動いたり振動したりすることがないようにケーブルを固定して摩擦電気の発生を減らす
- 被試験回路内のすべての電源接続を適切にフィルタリングする

まとめ：

この記事では、モジュール式デジタイザ（A/D ボード）ベースの測定システムにおける一般的な誤差の原因をいくつか紹介しました。デジタイザ（A/D ボード）製造元の Web サイトを参照して、デジタイザ（A/D ボード）をより効果的に適用する方法の詳細については、アプリケーションノートを参照してください。



Spectrum Instrumentation 社について

Spectrum 社は、Spectrum Systementwicklung Microelectronic GmbH として 1989 年に設立され、2017 年に Spectrum Instrumentation GmbH に改名されました。最も一般的な業界標準（PCIe、LXI、PXIe）で 500 を超えるデジタイザおよびジェネレータ製品を作成するモジュール設計のパイオニアです。これら高性能の PC ベースのテスト & メジャーメントデザインは、電子信号の取得・生成および解析に使用されます。同社はドイツの Grosshansdorf に本社を置き、幅広い販売ネットワークを通じて世界中に製品を販売し、設計エンジニアによる優れたサポートを提供しています。Spectrum 社の詳細については、www.spectrum-instrumentation.com を参照してください。