

## 広帯域幅デジタイザでの高分解能の利点

### はじめに：

デジタイザ (A/D ボード) の主要な仕様は帯域幅と分解能です。これらの仕様は独立しているわけではなく、帯域幅を減らすと分解能が向上します。ユーザは、測定ニーズを満たすためにデジタイザ (A/D ボード) を選択する際にトレードオフを行う必要があります。この記事では、広帯域幅デジタイザ (A/D ボード) の高分解能の利点と制限について説明します。ここで、高分解能は 12 ビット以上、広帯域幅が 20 MHz 以上の場合です。

### 分解能とダイナミックレンジ：

デジタイザ (A/D ボード) は、アナログ-デジタルコンバータ (ADC) を使用して、アナログ信号をデジタルサンプル値に変換します。ADC の分解能は、入力信号をサンプリングして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、生成可能な離散デジタルレベルの数は  $2^n$  です。したがって、12 ビットのデジタイザは  $2^{12}$  または 4096 レベルに分解できます。最下位ビット (lsb) は、検出できる最小の間隔を表し、12 ビットのデジタイザ (A/D ボード) の場合、 $1/4096$  または  $2.4 \times 10^{-4}$  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 (電圧値) を、デジタイザ (A/D ボード) の分解能で除算します。Table 1 は、8~16 ビットの分解能を持つデジタイザ (A/D ボード) の 1 ボルト ( $\pm 500$  mV) 入力範囲の lsb を示しています。

Resolution	Ideal Dynamic range	Minimum Voltage Increment for $\pm 500$ mV input range
8 Bit	256:1	3.92 mV
10 Bit	1024:1	0.98 mV
12 Bit	4096:1	0.244 mV
14 Bit	16384:1	61 $\mu$ V
16 Bit	65536:1	15 $\mu$ V

Table 1 デジタイザのステップサイズと分解能

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。8 ビット ADC を備えたデジタイザ (A/D ボード) は、入力アンプの垂直範囲を 256 の離散レベルに分割します。1 V の垂直レンジでは、8 ビット ADC は理想的に 3.92 mV 未満の電圧差を分解できません。一方、65,536 の分解レベルを備えた 16 ビット ADC は、理想的に 15  $\mu$ V の小さな電圧差を分解できます。高分解能デジタイザ (A/D ボード) を使用する理由の 1 つは、小さな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、より低い分解能の機器とより小さなフルスケール範囲を使用して、より小さな電圧を測定することができます。ただし、多くの信号には、小信号成分と大信号成分の両方が含まれています。したがって、大小両方の電圧成分を持つ信号の場合、ダイナミックレンジが広く、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) の能力を備えた高分解能の機器が必要です。

ここで異なる分解能のデジタイザ (A/D ボード) を使用した場合の波形の形状を見てみましょう。

Figure 1 では、12、14、16 ビットの理想的なデジタイザ (A/D ボード) の応答を、 $\pm 200$  mV の減衰サイン波形のセグメントと比較しています。選択されたセグメントは、波形の終わり近くにあり小さな振幅を含みます。14 ビットと

16ビットのデジタル  
 イザ (A/D ボード)  
 は信号を正確にレ  
 ンダリングするの  
 に十分な分解能を  
 持っていますが、  
 100 $\mu$ V の分解能  
 (±200 mV のフル  
 スケールレベル  
 に基づく) の 12  
 ビットデジタルイ  
 ザ (A/D ボード) は  
 100 $\mu$ V 未満のレ  
 ベルを分解できませ

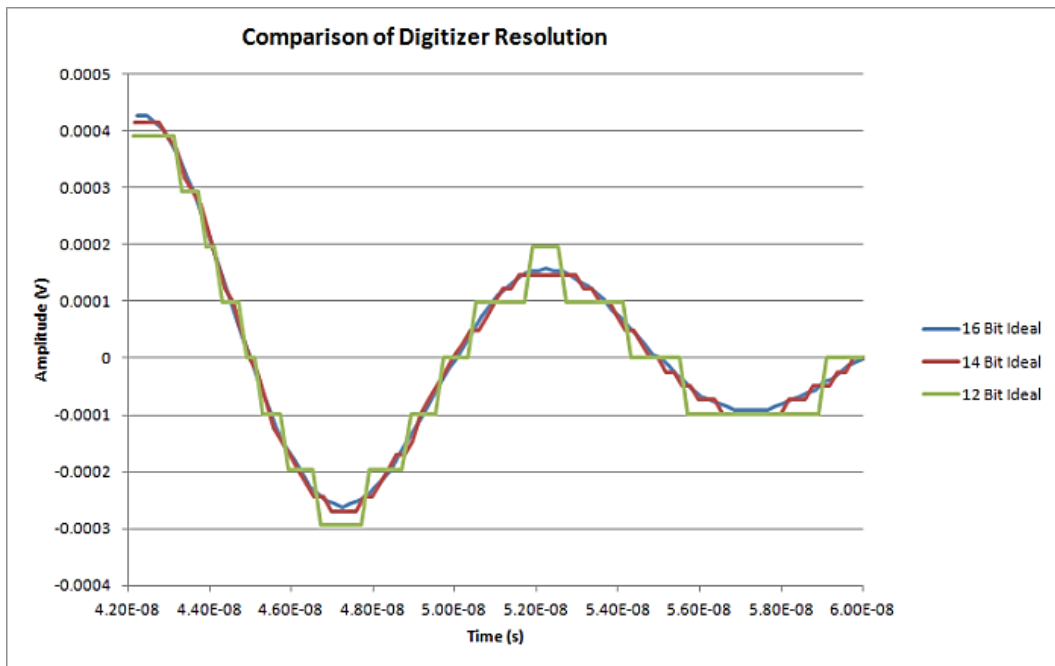


Figure 1 デジタイザの分解能と測定精度の比較

ん。読み取り誤差  
 は、分解能に関係

なく信号振幅が小さくなると増加します。これは理想的なケースであることに留意してください。後で、現実世界の正確さと精度を制限する問題を検討します。

**分解能とサンプルレート :**

前述のように、分解能と最大サンプルレート (=帯域幅) の間にはトレードオフがあることに注意してください。分解能を高くすると、最大サンプルレートが低くなります。これを Figure 2 に示します。ここでは、多数の競合モジュラーデジタイザ (A/D ボード) の最大サンプルレートが、分解能のビット数の関数としてプロットされています。Spectrum 製 M4i シリーズの 14 ビットおよび 16 ビットモデルがプロットされており、より高い有効サンプリングレートが示されています。

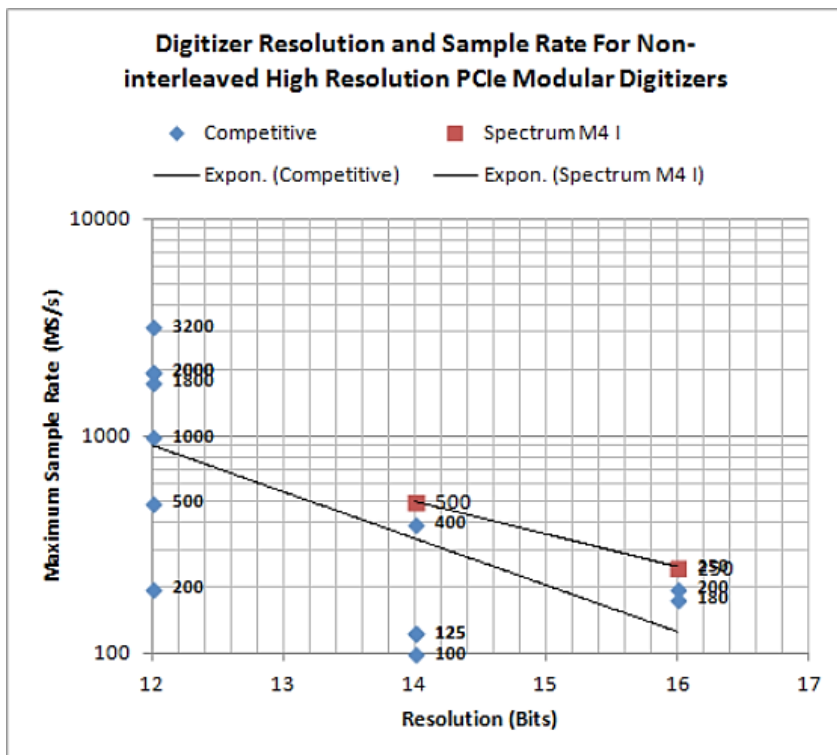


Figure 2 サンプルレートの関数としてのデジタイザ分解能のプロット。サンプルレートが遅くなる代わりに、より高い分解能が得られることに注意してください。プロットのトレンドラインは、Spectrum 製品と競合他社の違いを示しています。

## 最大分解能の達成に関する制限：

デジタイザシステムにはいくつかのエラーの原因があります。これらの原因は、最も単純にノイズと歪みに分類できます。

歪みは、測定対象の信号と高い相関性のある取得された波形のエラーです。歪みはランダムではありませんが、入力信号に依存します。歪みの最も一般的な形式は、高調波歪みです。高調波歪みの場合、歪み成分は、周波数ドメインで、入力周波数の整数倍で現れます。高調波歪みの典型的な原因は、飽和、クリッピング、スルーレート制限などを含むデジタイザシステムの伝達関数の非線形性です。複数の ADC をインターリーブしてより高いサンプリングレートを実現するデジタイザ (A/D ボード) 構成は、各 ADC のゲインとオフセットの不一致により、サンプリング周波数で大きな歪みを追加します。これはインターリーブの歪みです。

歪みとは対照的に、ノイズは入力と無関係であると想定されます。ノイズは、周波数位置が入力周波数の関数ではないエラー信号の任意の部分として定義できます。ノイズ自体は通常、ノイズの分布（つまり、誤差のヒストグラムの形状）またはノイズスペクトルの形状に応じてカテゴリに分類されます。

周波数領域の形状に基づいて分類された場合、すべての周波数に均等に広がるノイズは「ホワイトノイズ」と呼ばれます。オクターブ付近のノイズパワーが一定になるように分布するノイズは、「ピンクノイズ」と呼ばれます。他にも多くのノイズ形状がありま

す。ノイズは、ヒストグラムの分布によっても分類されます。正規分布のノイズは、「ガウスノイズ」と呼ばれます。ガウスノイズには多くの原因があります。ノイズは量子化によっても生成されます。これは、アナログ電圧をデジタル数値に変換する際の丸め誤差です。最も単純な量子化方法では、白色の均一な誤差分布が生成されます。ノイズはすべての電子デバイスで発生し、設計者は入力信号に追加されるノイズを減らすためにあらゆる努力をします。ゲインステージは、特にデジタルでノイズレベルを生成および増加させる傾向があります。

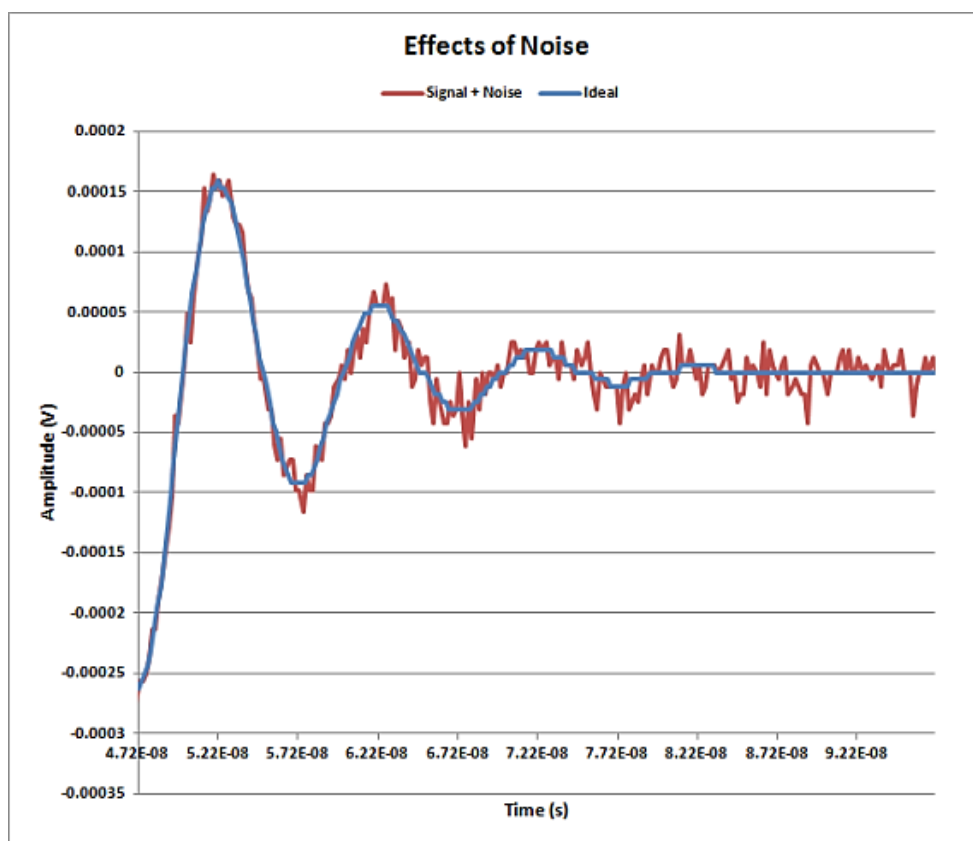


Figure 3 振幅ノイズがある場合とない場合の減衰サイン波形

歪みとノイズの両方が、デジタイザ (A/D ボード) で達成できる分解能を制限します。ノイズは、各サンプル値にランダム成分を追加することにより、デジタイザ (A/D ボード) の小さな振幅値を分解する能力を制限します。これは Figure 3 で見るすることができます。これは Figure 1 と同じ減衰サイン信号波形ですが、振幅ノイズがある場合とない場合の信号を時間領域で比較しています。ノイズが追加されたトレースは、実際の信号構造を覆い隠す表示波形の右側の信号ピーク振幅を超える振幅遷移を示しています。ノイズレベルが増加すると、さらに高い振幅値を持つ信号成分が不明瞭に

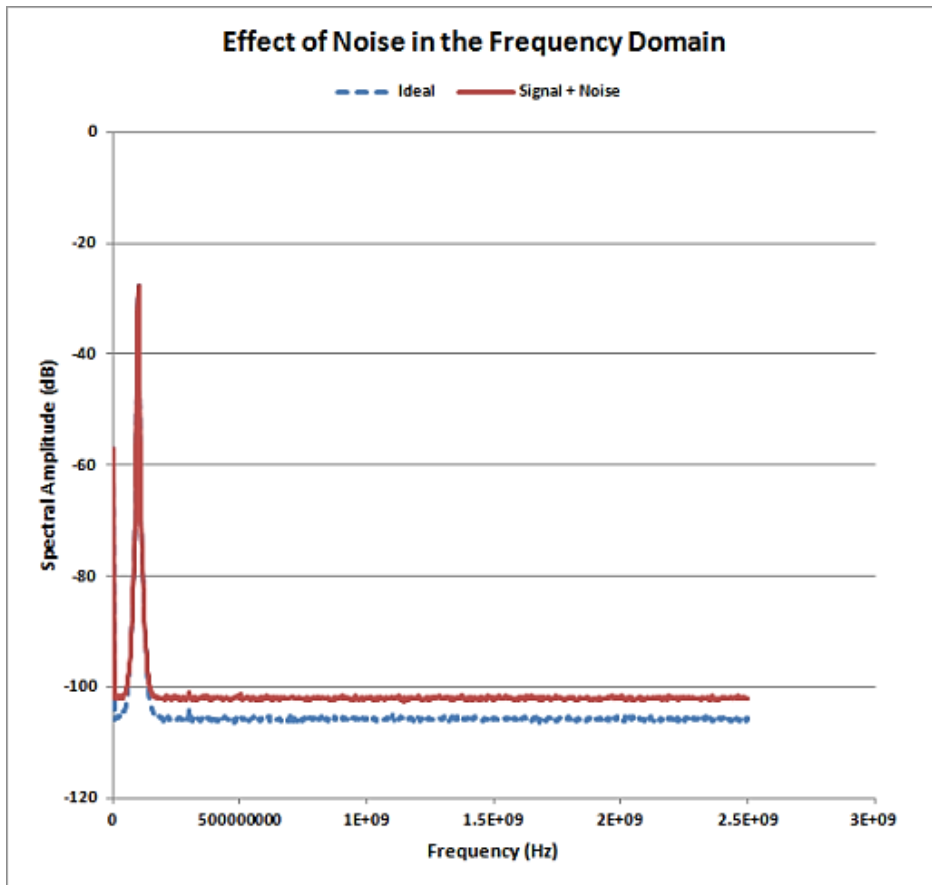


Figure 4 ノイズのある場合とない場合の減衰サインの周波数領域ビュー。ホワイトガウスノイズを追加すると、ノイズの振幅に比例してベースラインが上昇することに注意してください。

なり、測定の分解能がさらに低下します。同様に、減衰正弦波信号の周波数ドメインスペクトルを、アダプティブホワイトノイズありとなして Figure 4 に示します。スペクトル的にフラットなノイズが追加されると、スペクトルのベースラインが高くなります。そのノイズフロアよりも低い振幅を持つ信号は、デジタイザ

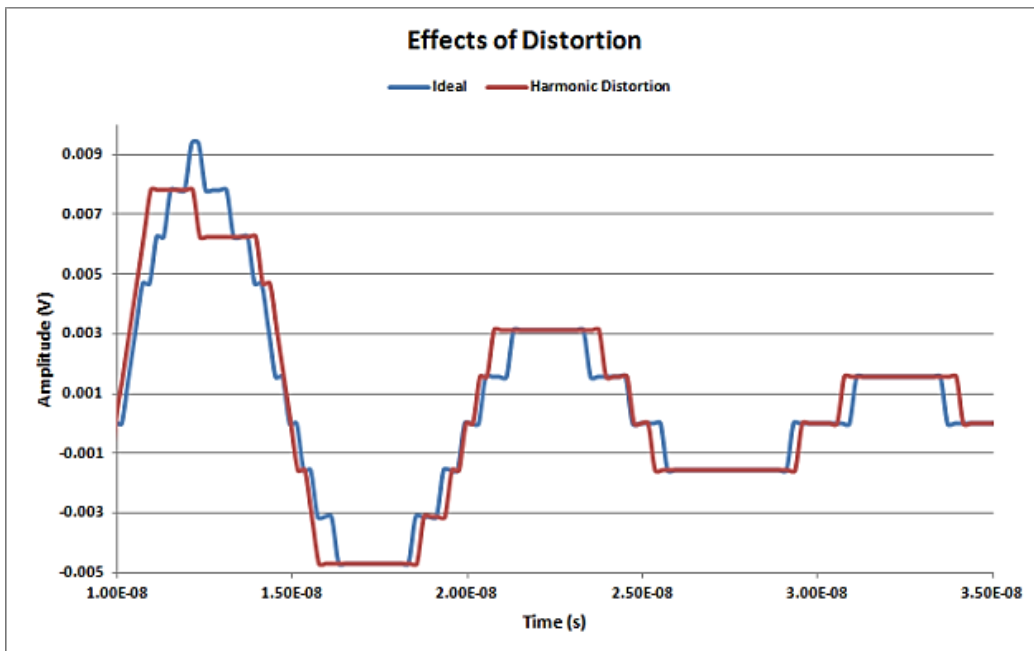


Figure 5 時間領域でデジタル化された波形に対する高調波歪みの影響

(A/D ボード) のダイナミックレンジを制限して見えなくなります。

Figure 5 は、デジタル化された波形に対する高調波歪みの影響を示しています。この例では、比較的大きな第3次高調波(20%)がデジタル化された波形の形状を変更します。前述のように、ソース波形と同期した歪みが繰り返し追加されます。通常、高調波歪みははるかに低いレベルで発生し、時間領域の波形には表示されません。

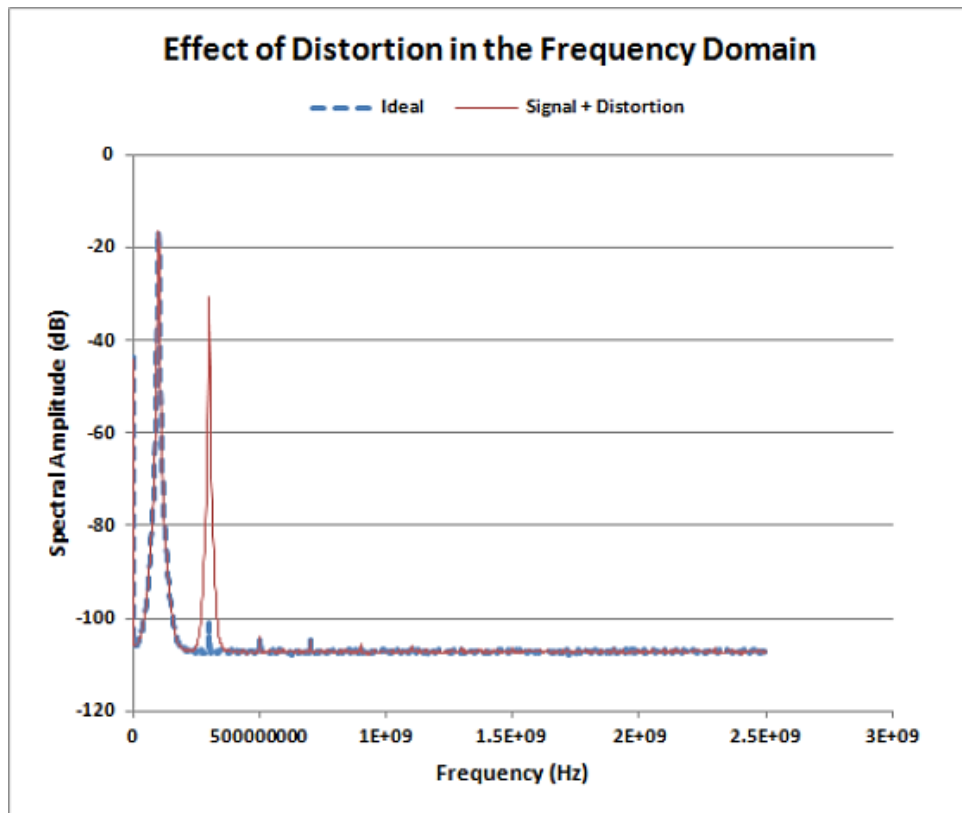


Figure 6 歪みのない波形と高調波歪みのある波形のスペクトルの比較

高調波は通常、Figure 6 に示すように、高速フーリエ

変換 (FFT) のスペクトル解析を使用して、周波数領域で評価されます。周波数領域では、第3次高調波をはっきりと見ることができます。高調波やその他の歪みが存在すると、デジタルイザ (A/D ボード) のダイナミックレンジを制限する小さなスペクトルが隠される可能性があります。デジタルイザ (A/D ボード) 出力のスペクトル純度の尺度の1つは、スプリアスフリーダイナミックレンジ (SFDR) です。SFDR は、出力での RMS 信号周波数成分と、次に大きなスペクトル成分 (「スプリアス」と呼ばれる) の RMS 値との比として定義されます。Figure 6 の理想的なスペクトルの SFDR は約 81 dB です。

### ノイズと歪みの影響を最小限に抑える：

歪みの影響を最小限に抑えることは、主にデジタルイザ (A/D ボード) 設計者の能力です。設計では、非線形性、高調波歪み、およびその他の歪みの原因を減らす必要があります。ユーザは、デジタルイザ (A/D ボード) をオーバードライブしないこと以外は、歪みの低減をほとんど制御できません。

ユーザは、ノイズの影響を最小限に抑えることができます。ここにいくつかの簡単なヒントを示します。

1. デジタルイザ (A/D ボード) の入力範囲で信号を最大化します。これにより、信号対雑音比が最大化されます。複数のレンジを持つデジタルイザ (A/D ボード) はこれを容易にしますが、ノイズレベルは入力減衰に比例しないことを確認してください。
2. アプリケーションと一致する最小測定帯域幅を使用します。ノイズレベルは帯域幅に比例します。これは、入力帯

域幅制限またはデジタルフィルタリングを使用して実装できます。

3. 平均化などの信号処理を使用して、平均化された測定値の数に比例してノイズレベルを低減します。これには繰り返し可能な信号と複数の取得が必要になることに注意してください。
4. 低レベルの信号の場合、外部の低ノイズアンプを使用して信号レベルを上げ、信号対ノイズ比を最大化します。
5. 完全な信号経路で適切な終端を使用します。高帯域幅の場合、信号ソース、ケーブル、デジタイザ (A/D ボード) の終端には 50 オーム終端が適しています。

## デジタイザ (A/D ボード) のノイズと歪みを比較するための性能指数：

性能指数は、数値が説明されている測定システムの品質を即座に伝えるような一般的な定義がある測定値です。Table 2 にデジタイザ (A/D ボード) に適用される一般的な性能指数を示します。

Table 2 デジタイザに適用される一般的な性能指数

Figure of Merit	Abbreviation	Description
Baseline Noise		RMS noise level, expressed in Volts, with no signal applied.
Total Harmonic Distortion	THD	The ratio of the RMS sum of the significant harmonics to the RMS value of the fundamental expressed in dB.
Signal to Noise Ratio	SNR	The ratio of the RMS signal amplitude to the RMS sum of all other spectral components other than distortion and offset error expressed in dB.
Signal to Noise and Distortion Ratio	SINAD THD+N	The ratio, expressed in dB, of the RMS signal to the RMS sum of all other spectral components, including the harmonics except DC.
Effective number of Bits	ENOB	ENOB is the number of bits in a digitizer that produces the same SINAD value as a system whose only source of noise is quantization itself.
Spurious Free Dynamic Range	SFDR	The ratio of the RMS signal frequency component to the RMS value of the next larger spectral component expressed in dB.

ベースラインノイズ以外のこれらの性能指数はすべて、正弦波入力のデジタイザ (A/D ボード) 出力の周波数領域分析に基づいています。これは IEEE 規格 1057 および 1241 で定義されています。ほとんどのデジタイザ (A/D ボード) サプライヤは、データシートでこれらの値を指定しています。性能指数を比較する場合、同じ入力周波数、入力振幅、サンプルレート、帯域幅が指定されていることを確認してください。

## 高ダイナミックレンジのデジタイザ (A/D ボード) を必要とするアプリケーション：

大きなダイナミックレンジと高い分解能を持つデジタイザ (A/D ボード) を必要とするアプリケーションは、対象となる信号に高振幅成分と低振幅成分の両方が含まれるアプリケーションです。

典型的なアプリケーションは次のとおりです。

- エコー測距：レーダ、ソナー、LiDAR、超音波、医療画像などのエコー測距測定。これらのアプリケーションでは、大きな送信パルスの後にはるかに弱いリターンエコーが続き、デジタイザ (A/D ボード) は両方の振幅信号を正確

に処理できる必要があります。

- リップル測定：オフセット値が高く、オフセットの上に乗る変動が小さい信号の測定が必要です。両方のコンポーネントを特性評価する必要があります。
- 変調解析：振幅変調信号（AM、SSB、QAM など）は、信号振幅に大きな変動を示します。
- 質量分析：質量/電荷比が大きく異なる粒子を検出するか、質量分析計の感度を改善する必要があります。
- 位相測定：位相測定では、小さな位相差を区別するために振幅の非常に小さな差の測定が必要です。
- 伝搬研究：さまざまな経路および異なる媒体を通る信号経路の減衰を測定すると、多くの場合、振幅値の範囲が広くなります。
- 部品のテスト：大きな電圧降下または電流降下を特性評価する必要があります。

### 測定例：

この測定例では、Spectrum 製 M4i シリーズのデジタル (A/D ボード) を使用しています (Figure 7)。

Figure 8 は、14 ビット Spectrum 製 M4i デジタル (A/D ボード) を使用した測定の例を示しています。ENOB 仕様は、10 MHz で > 11.6 ビットです。その測定に重ねられるのは、10 ビットの ENOB を持つデジタル (A/D ボード) のシミュレーションです。このデータは、Spectrum 社の SBench ソフトウェアを使用してグラフィカルに表示されます。



Figure 7 最新のデジタルファミリ Spectrum M4i シリーズは、最大 3.4 GB/s の転送速度をサポートする PCIe x8 Gen2 インターフェイスで、14 または 16 ビットの分解能、2ch および 4ch バージョン

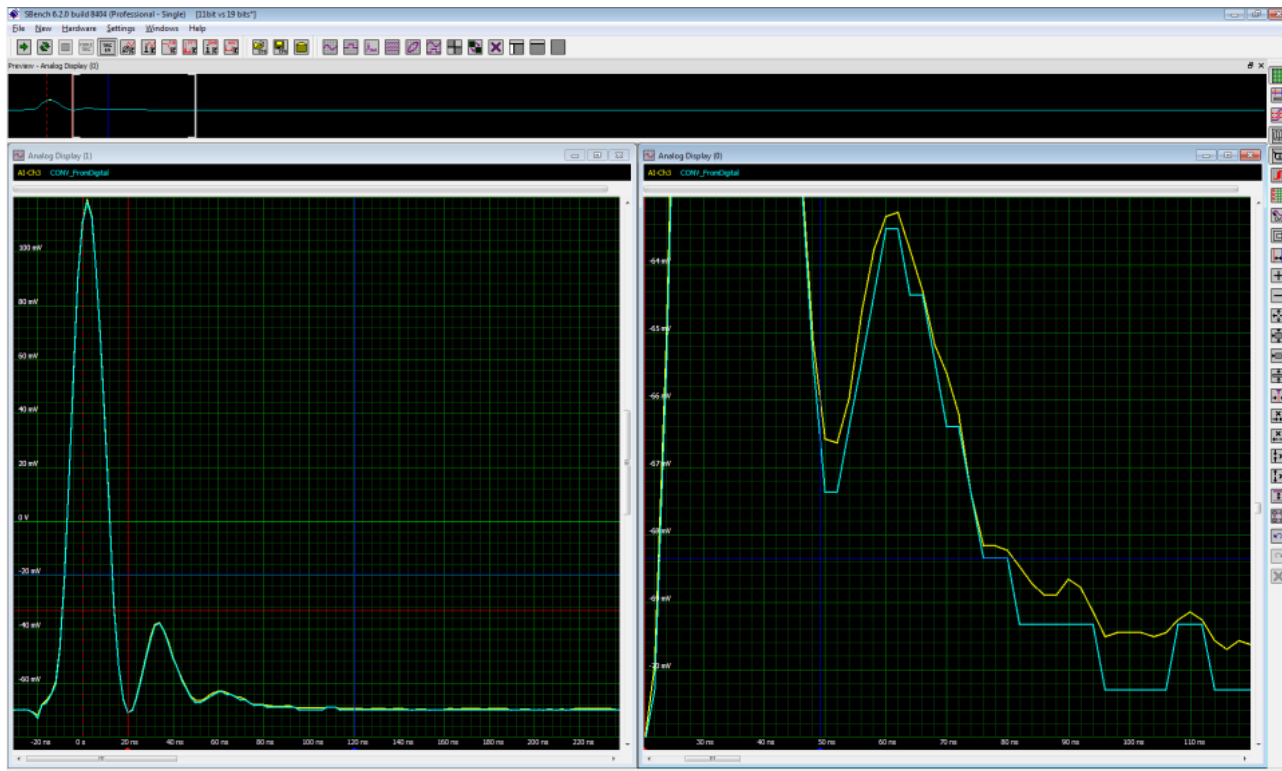


Figure 8 11.6 (黄色のトレース)と10 (青のトレース)の有効ビットでの測定値の比較。右側のグリッドには、同じデータが拡大されています。分解能が不足しているため、青いトレースの詳細が失われていることに注意してください。

両方の測定値は、左側のグリッドに取得されたものとして表示され、Spectrum デジタイザ (A/D ボード) のトレースは黄色で表示され、他のトレースは青色で表示されます。右側のグリッドは、水平と垂直の両方に展開された同じデータです。青いトレースでは、解像度がより制限されているため、低振幅の詳細を表示できません。

### まとめ：

デジタイザ (A/D ボード) は、ADC のビット数に基づいて理想的な分解能を指定します。この理想的な解像度は、ノイズと歪みの積が存在するため低下します。実際の分解能は、ベースラインノイズ、SNR、SINAD、および ENOB の形式で指定されます。デジタイザを選択するときは、デジタイザ (A/D ボード) の実際の分解能を測定ニーズに合わせる必要があります。また、低ノイズのコンポーネントとレイアウト、複数の入力範囲、特殊な信号パス、信号調整など、設計に組み込まれたハードウェアツールにも留意する必要があります。これらすべてを念頭に置いて、用途に適したデジタイザ (A/D ボード) を選択できます。





## 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](http://www.spectrum-instrumentation.com) を参照してください。