

デジタイザの振幅分解能

はじめに：

振幅分解能は、デジタイザ (A/D ボード) の主要な仕様です。

この仕様は測定要件にどのように適合していますか？

デジタイザ (A/D ボード) の振幅分解能の選択に伴う技術的なトレードオフは何ですか？

その選択を行った後、取得したデータの解像度を改善するために何ができますか？

これらはすべて、デジタイザ (A/D ボード) または他のデジタル機器について回答する一般的な質問です。

振幅分解能：

振幅分解能は、デジタイザ (A/D ボード) の垂直精度を指定します。デジタイザ (A/D ボード) の信号の量子化は、アナログ-デジタルコンバータまたは ADC によって制御されます。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。振幅分解能の仕様は通常、ビット数として表されます。たとえば、8 ビットまたは 16 ビット。

8 ビットの振幅分解能を持つデジタイザ (A/D ボード) は、デジタイザの入力振幅範囲を 2^8 または 256 レベルに分割します。同様に、16 ビットデジタイザ (A/D ボード) は 2^{16} または 65,535 の量子化レベルを使用します。分解能が高いほど、入力電圧範囲の量子化が細くなることは明らかです。ただし、振幅分解能はデジタイザ (A/D ボード) の最大サンプリングレートと最大入力帯域幅にリンクしています。分解能の向上は、最大サンプリングレートと帯域幅の低下を犠牲にしてのみ利用可能です。

Spectrum の 3 つの異なるデジタイザ (A/D ボード)、M4i.4451-x8、M4i.2234-x8、および M2p.5966-x4 の比較を Table 1 に示します：

Model Number	Amplitude Resolution (bits)	Maximum Sample Rate (MS/s)	Bandwidth (MHz)	Dynamic range
M4i.2234-x8	8	5000/2500/1250	1500	256:1
M4i.4451-x8	14	500	250	16384:1
M2p.5966-x4	16	125	60	65536:1

Table 1 8/14/16 ビット PCIe デジタイザの比較。振幅分解能は、最大サンプルレートに反比例して変化します。理論的なダイナミックレンジは、振幅分解能に比例します。

この例から、振幅分解能は最大サンプリングレートに反比例し、振幅分解能が大きいほど最大サンプリングレートと帯域幅が小さくなるのがわかります。可能な最大帯域幅は、サンプルレートの半分のナイキスト制限です。デジタイザ (A/D ボード) の実際のアナログ帯域幅はこれとは異なる場合がありますが、一般的に比例しています。

ダイナミックレンジ：

デジタイザ (A/D ボード) は、選択可能な入力電圧範囲（一般にフルスケール範囲と呼ばれます）で動作し、入力波形をクリップすることなく印加できる最大電圧を設定します。デジタイザ (A/D ボード) が理論的に識別できる最小電圧は、最大電圧を量子化レベルの数で割ったものです。したがって、1V のフルスケール範囲を持つ 8 ビットデジタイザ (A/D ボード) は、1/256 または 3.9 mV のレベルを区別できます。一方、同じ範囲の 16 ビットデジタイザ (A/D ボード) は、1/65536 または 15.2 μ V のレベルを識別できます。測定される信号がデジタイザ (A/D ボード) の全振幅範囲に及ぶ場合この差は重要です。大きな信号が存在する状態で小さな信号を測定するには、より大きなダイナミックレンジが必要です。たとえば、5V の電源で 1 mV のリップルを測定するには、 $0.001/5 = 2 \times 10^{-4}$ または 5000 $\sim$ 1 より大きいダイナミックレンジが必要です。

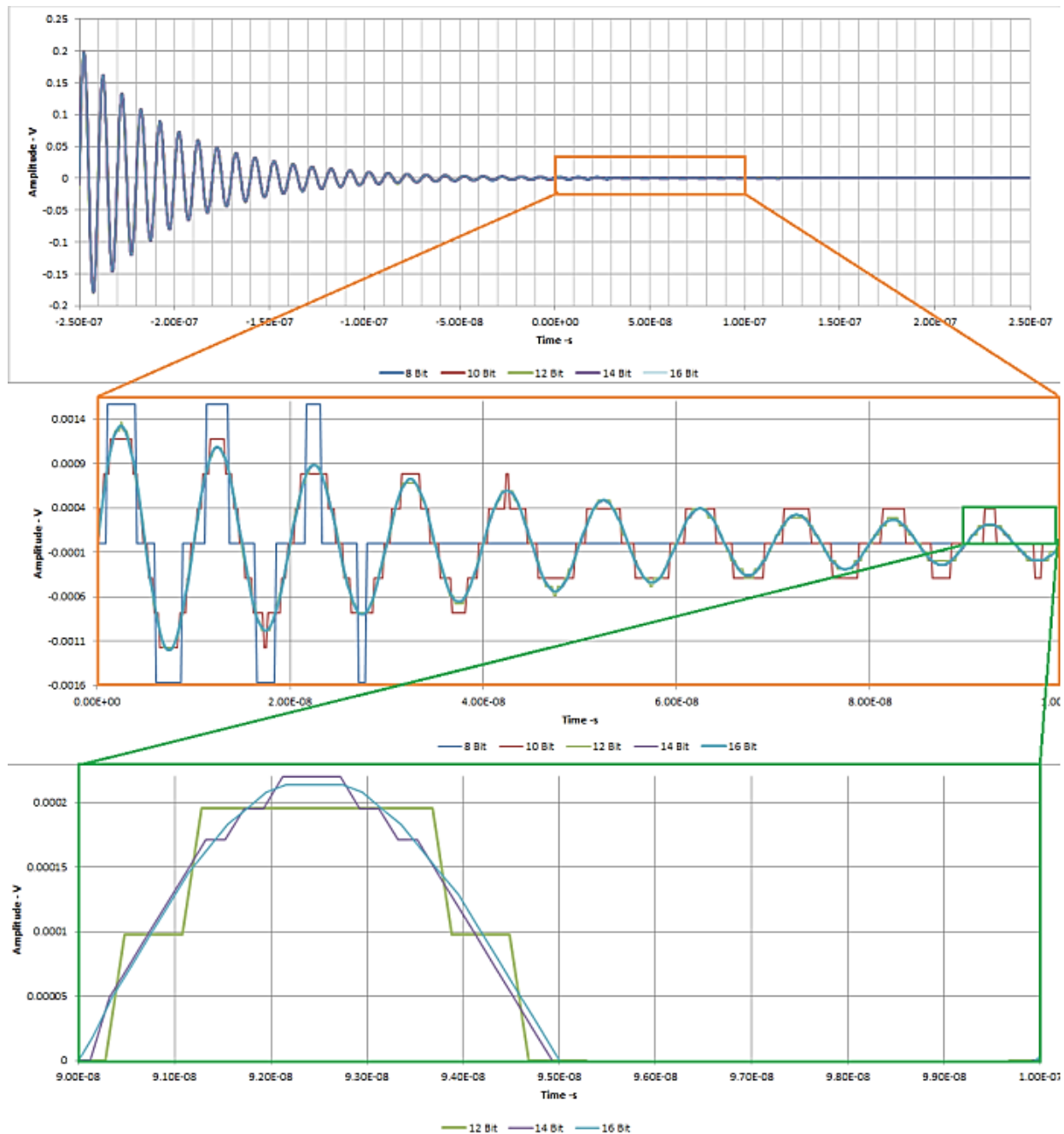


Figure 1 8/10/12/14/16 ビットの振幅分解能で 5 つの理想的なデジタルイザの応答を比較し、倍率を上げて小さな差を表示します

振幅分解能が波形のデジタル化にどのように影響するかを確認するには、Figure 1 を参照してください。減衰サインは、高いダイナミックレンジを持つ波形です。これは、8、10、12、14、および 16 ビットの振幅分解能を持つ 5 つの理想的なデジタルイザ (A/D ボード) の ± 200 mV 範囲に適用されます。上部のディスプレイには、デジタルイザ (A/D ボード) の応答が重ねて表示されます。そこに明らかな違いはありません。

セクションを $0 \sim 1E^{-7}$ 秒に拡大すると、中央のグリッドに表示されるように詳細が表示されます。左側では、8 ビットのデジタルイザはダイナミックレンジの限界に近づいています。これは、シングルビットを切り替えて、パルスのような外観になることで示されています。右に移動すると、同じことが $5E^{-8}$ 秒で始まる 10 ビットデジタルイザ (A/D ボード)

に発生します。このグリッドの最後のサイクルでズームインすると、下部のグリッドビューが取得されます。10 ビットトレースは削除されました。

12 ビット、14 ビット、および 16 ビットのデジタイザ (A/D ボード) の結果の違いは、12 ビットと 14 ビットのデジタイザ (A/D ボード) 出力の明らかな量子化ステップを示しています。観測では、振幅分解能が高いほど、波形の表現が良くなります。これは、測定帯域幅が十分な減衰なしで測定を可能にするのに十分であると仮定しています。

最大振幅分解能を達成するための制限は何ですか？：

すべての電子計測器と同様に、デジタイザ (A/D ボード) には、理想的な振幅分解能の達成を妨げるいくつかのエラー源があります。これらのエラーソースは、ノイズと歪みという 2 つの大きなカテゴリに分類できます。歪みは、入力信号に相関する決定論的誤差です。歪みの一般的な形式は、高調波歪みです。名前が示すように、入力周波数の整数倍の周波数のスペクトル成分で発生します。高調波歪みは、デジタイザ (A/D ボード) 回路の非線形性により発生します。原因には、飽和、クリッピング、スルーレート制限などがあります。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ートポロジは、各 ADC のゲインとオフセットの不一致による歪みを追加します。このタイプの歪みは、インターリーブ歪みと呼ばれます。

ノイズは、デジタイザ (A/D ボード) の入力信号に関係しないランダムな信号です。ノイズは、ヒストグラムを使用した確率密度関数 (pdf) によって分類されます。一般的なノイズ分類は、ガウス分布またはベル型分布に従う pdf を持つガウス分布ノイズまたは正規分布ノイズです。ガウスノイズには多くの電子源があります。アナログからデジタルへの変換プロセスに関連する別のノイズは、量子化ノイズです。量子化ノイズは、「ラウンドオフ」エラー、アナログ入力信号とデジタイザ (A/D ボード) のデジタル推定値との差です。量子化ノイズは、pdf 全体で発生確率が等しい均一な分布を持っています。

周波数領域では、ノイズは、信号周波数またはその高調波のいずれでも発生しないエラー成分と見なすことができます。一般的にブロードバンドです。すべての周波数に均等にスペクトル的に広がるノイズは、「ホワイト」ノイズと呼ばれます。ガウスノイズと量子化ノイズの両方にこの特性があります。

設計者は、デジタイザ (A/D ボード) 回路のノイズと歪みを最小限に抑えるためにあらゆる努力を払っています。どちらのタイプのエラーも、デジタイザの有効な振幅分解能を低下させる傾向があります。Figure 2 は、16 ビットデジタイザ (A/D ボード) の出力に対

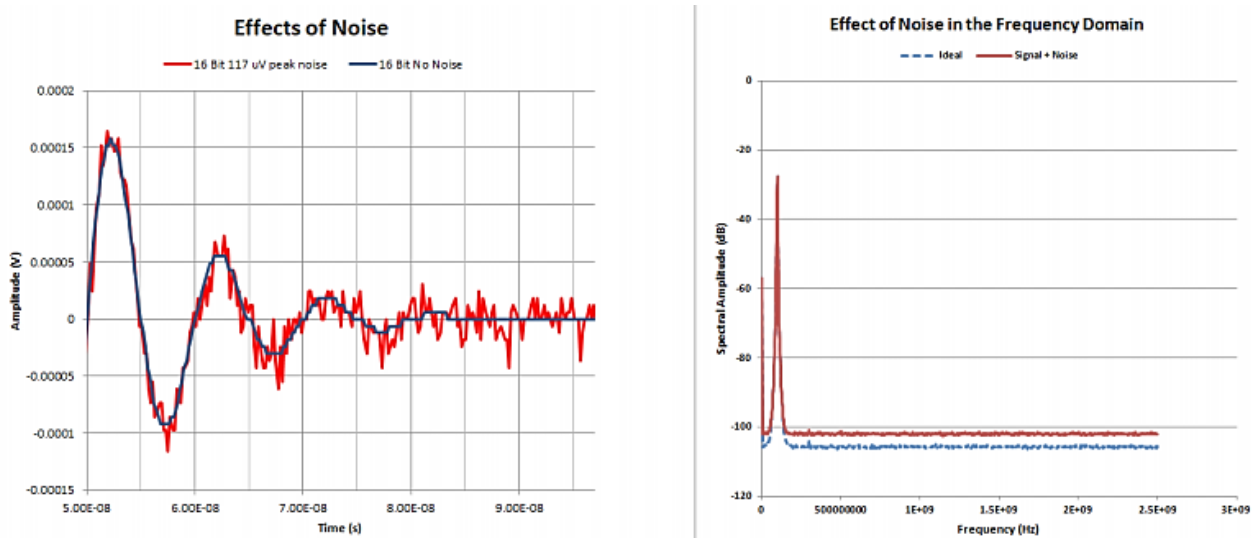


Figure 2 時間領域と周波数領域の両方で見られる 16 ビットデジタイザの出力に対するノイズの影響。

するノイズの影響の例を示しています。効果は、時間領域と周波数領域の両方で表示できます。図の左側の時間領域表示では、理想的な 16 ビットのデジタリ化された波形（青いトレース）に、117 V のガウスノイズが追加された同じ波形（赤いトレース）が重ねられています。ノイズスパイクにより、理想的な波形の量子化ステップが不明瞭になり、有効な振幅分解能が大幅に低下します。図の右側の周波数ドメインビューで、ノイズのないスペクトル（青いトレース）と追加されたノイズ（赤いトレース）のスペクトル形状が、主にベースラインオフセットで異なることを確認します。広帯域のホワイトノイズ成分はスペクトル的に広がり、このベースラインを上げます。高調波歪みは、入力信号と同期するエラー成分を追加します。これにより、時間信号の瞬時位相が変化します。高調波歪みのある信号の周波数スペクトルには、元の信号にはない高調波が含まれます。

デジタイザの品質を比較するメリットの数値：

性能指数は、さまざまな機器、この場合はデジタイザ (A/D ボード) の比較を容易にする一般的な測定値です。

デジタイザ (A/D ボード) の振幅性能の一般的な性能指数を Table 2 にまとめます。

Table 2 デジタイザやオシロスコープなどの入力信号をデジタル化する機器の比較に使用される一般的な性能指数。

Figure of Merit	Abbreviation	Analysis Domain	Description
Baseline Noise		Time	RMS noise level, expressed in Volts, with no signal applied.
Total Harmonic Distortion	THD	Frequency	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	Frequency	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 or THD+N	Frequency	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	Frequency	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.

これらの性能指数は、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) のサブライヤーは、データシートでこれらの値を指定しています。これらの性能指数を使用してデジタイザ (A/D ボード) 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、および帯域幅に対してデジタイザ (A/D ボード) が指定されていることを確認してください。

Table 3 に、8 ビット、14 ビット、および 16 ビットの振幅分解能を持つ Spectrum 社 PCIe デジタイザ (A/D ボード) の主要な動的仕様を示します。ベースラインノイズは帯域幅に比例して変化することに注意してください。これは、ノイズの物理的性質に基づいて予想されます。振幅分解能が細かくなると、最下位ビット (lsb) に比例したノイズが大きくなります。これは、量子化ノイズを除くノイズレベルが回路構成によって固定されており、デジタイザ (A/D ボード) の分解能とは関係がないためです。これが、ENOB が振幅分解能のビット数を増やしても劇的に改善しない理由です。

ノイズと歪みの影響を最小限に抑えます：

ノイズと歪みの影響を最小限に抑えることは、主にデジタイザ (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。ノイズ低減は、コンポーネントの選択、ゲイン分布

と回路レイアウトの最適化に依存します。

ユーザーは、デジタイザ (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。

ユーザーは、ノイズへの影響を最小限に抑えることができます。以下に簡単なヒントを示します：

1. デジタイザ (A/D ボード) の入力範囲で分析される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。複数の範囲を持つデジタイザ (A/D ボード) はこれを容易にしますが、ノイズレベルが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。ホワイトノイズの単位帯域幅あたりの電力は固定されており、総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。加算平均には繰り返し可能な信号と複数の収集が必要であることに注意してください。移動平均またはボックスカー平均は、シングルショット測定に適用できます。
4. 低レベルの信号の場合、外部の低ノイズ増幅器を使用して、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。50Ωの終端は、利用可能な最高の帯域幅を提供し、信号源のインピーダンスとケーブル接続を一致させるという点で良い選択です。

Table 3 最大サンプリングレート、10 MHz 入力周波数、±1 V レンジ、50 Ω での Spectrum デジタイザの動的特性。

Model Number	Amplitude Resolution (bits)	Bandwidth (MHz)	Voltage Resolution (μV)	RMS Baseline Noise (lsb)	RMS Baseline Noise (μV)	THD (dB)	SNR (dB)	ENOB (bits)
M4i.2234-x4	8	1500	7800	<0.3	<2300	<-60.3	>44.8	>7.1
M4i.4451-x4	14	250	122	<1.9	<232	<-75.8	>67.9	>10.9
M2p.5966-x4	16	60	35	<5.5	<168	<-68.7	≥72.7	≥11.0

測定例：

高振幅と低振幅の両方の信号成分が同時に存在するアプリケーションでは、ダイナミックレンジが大きく、したがって分解能が高いデジタイザ (A/D ボード) が必要です。

レーダー、ソナー、ライダー、超音波、および医療用イメージングはすべて、高振幅送信信号の後にはるかに低い振幅のエコー信号が続くエコー測距アプリケーションです。デジタイザは、両方の振幅信号を正確に処理できる必要があります。Figure 3 に超音波測定例を示します。



Figure 3 Spectrum M4i. 4451-x8 14bit デジタイザを使用して、超音波距離計に関連する信号を測定します。取得した信号は、Spectrum の SBench6 ソフトウェアを使用してグラフィカルに表示されます。

超音波距離計は一連の 5 つの 40 kHz バーストを放出し、ターゲットからのエコーは各パルスバーストの約 2ms 後に戻ります。エコーは約 33 dB 減衰されます。上のトレースは、5 つのバーストすべてを示す完全な収集を表示します。14 ビットの収集に加えて、シミュレートされた 8 ビットの収集が比較のためにオーバーレイされます。上のトレースには目に見える違いはありません。

下のトレースは、最初のエコーのセグメントの拡大ビューまたはズームビューです。ソースの場所は、上のトレースの赤と青のカーソルでマークされています。ズームトレースでは、14 ビット（黄色のトレース）と 8 ビット（緑色のトレース）のデジタル化の違いが非常にはっきりしており、8 ビットバージョンでは有意な量子化が示されています。時間内のエコー位置のみを測定する場合、8 ビットの解像度で十分です。振幅または位相の詳細を測定する場合、14 ビットの分解能が必要になります。

まとめ：

測定帯域幅が制限の問題でない場合、可能な限り最高の振幅分解能を使用することが常に最良の選択です。トレードオフを行う必要がある場合は、デジタイザ（A/D ボード）を選択するときに最初に決定する必要があるのは帯域幅です。適切な感度を確保するために、次に振幅分解能が必要です。デジタイザ（A/D ボード）には、平均化やフィルタリングなどのダイナミックレンジを改善できる追加の信号処理機能も備わっていることに注意してください。



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。