

オシロスコープ垂直軸確度は なぜ重要なのでしょうか？

オシロスコープの信号確度の評価

垂直軸精度とは

オシロスコープの横軸はタイムベース (s/div) で、縦軸は電圧 (V/div) を示しています。垂直軸精度とは、目視と測定値の両方で、画面に表示される電圧の精度を指します。オシロスコープの画面の読み値の電圧は、実際の信号の電圧にどれほど近いでしょうか？それは、垂直軸精度によります。

$$\text{最高ADCビット数} + \text{最低ノイズフロア} = \text{最高垂直軸精度}$$

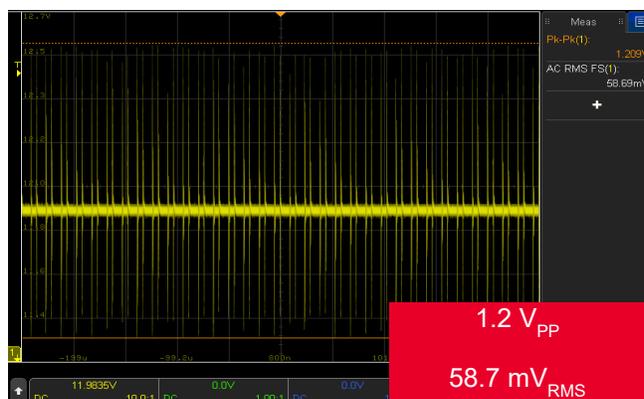
垂直軸精度は、以下の2つの主な仕様により定義されます：

- A/Dコンバーター (ADC) のビット数
- オシロスコープのフロントエンドノイズフロア

ADCビット数が多くなるほど、垂直軸分解能は高くなります。垂直軸分解能が高いほど、より信号を細かく見ることができます。さらに、フロントエンドのノイズフロアが低ければ、オシロスコープが測定中の信号に与える影響は少なくなります。すべての電子機器にノイズがあるのと同様に、すべてのオシロスコープにもノイズがあります。オシロスコープにノイズがあると、信号に重畳してしまい、測定値を歪めてしまいます。測定値に影響を与えないよう、できるだけノイズの少ないオシロスコープを使うことが重要です。これは、どのような種類の信号でも重要ですが、非常に微小な電圧を測定する場合はさらに重要になります。

ADCの分解能が低く、ノイズフロアの大きいオシロスコープを使用すると、測定が不正確になり、設計のやり直しや、部品の調達、ひいては貴重な時間の浪費につながったりすることがあります。検証や設計変更に費やす時間を最小限に抑えるために、オシロスコープの垂直軸精度を評価し、信頼性の高い測定を実現する必要があります。図1は、高い垂直軸精度により、視覚的にも電圧測定においても違いが出ることを示しています。

InfiniiVision 3000G X-シリーズ 8ビット分解能



InfiniiVision HD3シリーズ 14ビット分解能

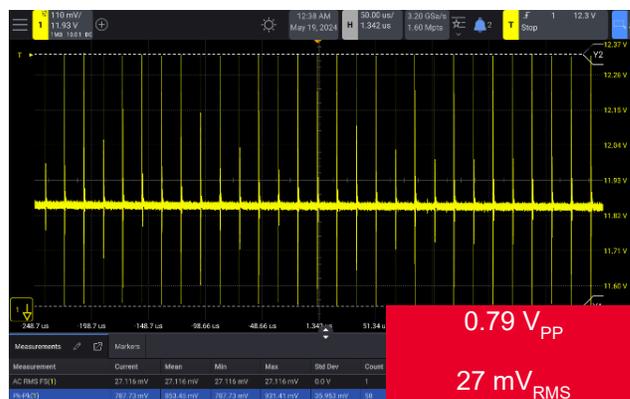


図1. キーサイトInfiniiVision 3000G X-シリーズオシロスコープと同じプロービングセットアップのHD3 シリーズで計測した測定値を比較すると、HD3シリーズの方がより正確な測定が可能です。HD3は、14ビットADCと50 μV_{RMS} の低ノイズフロアにより、垂直軸分解能が大幅に向上しています。一方、3000Gは8ビットで、ノイズは250 μV_{RMS} です。この違いは測定精度に大きく影響を与えます。

ADCビット数と最小分解能

ADCは垂直信号精度にとってきわめて重要です。ADCビット数が多くなるほど、オシロスコープの分解能は高くなります。14ビットのADCを備えたオシロスコープは、8ビットのADCを備えたオシロスコープの64倍の分解能を実現します。

分解能とは、オシロスコープのADCによって決まる最小量子化レベルのことです。8ビット分解能のオシロスコープのADCの場合、 $2^8=256$ なので、アナログ入力を256段階の異なるレベルにエンコードできます。これらは、量子化レベルまたはQレベルと呼ばれます。

ADCは、オシロスコープの垂直軸のフルスケールの値で動作します。電流測定でも電圧測定でも、Qレベルのステップはオシロスコープのフルスケール垂直軸設定に依存します。ユーザーが垂直軸設定を100 mV/divに設定した場合、フルスケールは800 mV (8 div×100 mV/div) になります。このとき、Qレベル分解能は800 mVを256レベルで分割した3.125 mVになります。

図2に例を示します。2種類のオシロスコープのスケールは、フルスケールが800 mVです。8ビットADCを備えたオシロスコープの分解能は、800 mV / ($2^8=256$ Qレベル) より3.125 mVです。キーサイトInfiniiVision HD3シリーズのような、14ビットADCを備えたオシロスコープの分解能は、800 mV / ($2^{14}=4096$ Qレベル) より48.8 μ Vです。各オシロスコープは、最小Qレベルまでの信号しか識別できません。

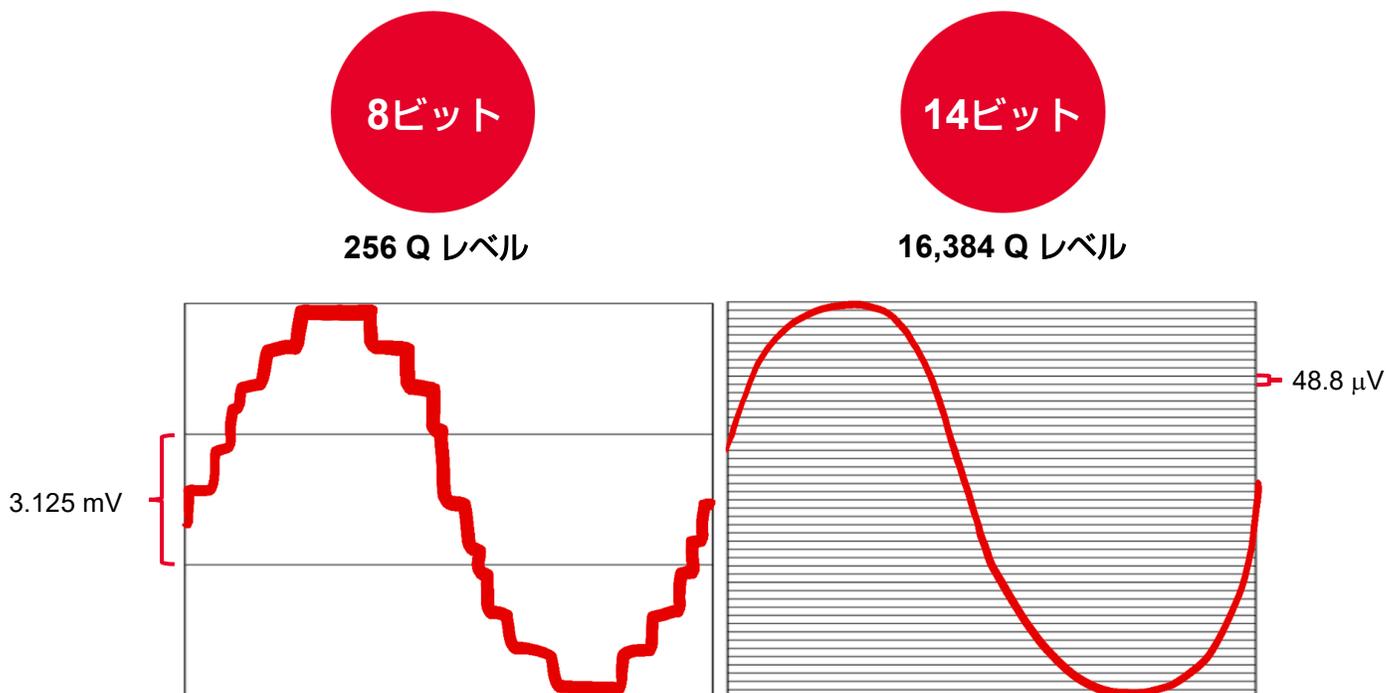


図2. ほとんどのオシロスコープが、8~12ビットのADCを搭載しているのに対し、HD3シリーズは14ビットADCを搭載しています。これは12ビットADCの4倍、8ビットADCの64倍の分解能です。より高いADC + 低ノイズ = より高い分解能。

多くのオシロスコープに高分解能モードがあります。オーバーサンプリング技術とデジタル信号プロセッサ (DSP) フィルターを組み合わせることで、垂直分解能を向上させることが可能です。メーカーは、多くの場合このような分解能の向上をビット単位で表現しています。InfiniiVision HD3シリーズの高分解能モードの場合は、本来の14ビットADC分解能から16ビット分解能に向上させることが出来ます。この技術は、測定に必要なハードウェア帯域幅に対して余裕のあるサンプリングレートで動作するADCが必要になります。

ADCのビット数が多くなれば、理論的には分解能が向上します。しかし、常にそれが成り立つとは限りません。垂直軸分解能はADCだけではなく、上記で学んだように、オシロスコープのフロントエンドノイズにも依存します。有効ビット数 (ENOB : Effective Number Of Bits) の仕様を参照すれば、システムのノイズを考慮した実際の測定時に有効なビット数がわかります。HD3シリーズは、14ビットADCと低ノイズ (50 mV) 性能により、高いENOBを備えています。ENOBの詳細については以下のセクション、および技術記事[ADCのビット数とENOBを理解する](#)にも記載しています。

ENOB : Effective Number Of Bits

有効ビット数は、実際の動的な性能を示す指標です。一部のオシロスコープメーカーはオシロスコープのADCそのもののENOB値を提供していますが、この値には意味がありません。重要なのは、オシロスコープとしてのシステム全体のENOBです。ADCのENOBが優れていても、オシロスコープのフロントエンドノイズが大きければ、測定システム全体のENOBは劇的に低下します。オシロスコープメーカーは総合的なENOB値をほとんど公表していませんが、通常は特性評価を行っていて、特定のモデル番号について要求されれば値を提供しています。

オシロスコープのENOBは特定の数値ではなく、連続した曲線です。ENOBの測定は、振幅が一定の正弦波を周波数掃引して測定します。各曲線は、周波数をスイープしながら特定の垂直軸設定で作成します。オシロスコープは、電圧の測定結果を捕捉し評価します。

タイムドメインで、ENOBを計算するためには、測定波から理論的に最も適合する正弦波を差し引く必要があります。これらの曲線間のエラーは、オシロスコープのフロントエンドから生じる可能性があり、全掃引周波数での位相の非線形性や振幅変動に起因しています。エラーはADCのインターリーブ歪みからも生じます。

周波数ドメインで、ENOBを計算するためには、全体の信号パワーから主な信号成分のパワーを差し引く必要があります。どちらの手法でも同じ結果が得られます。

ENOB値は、オシロスコープのADCビット数よりも低い値になります。例えば、8ビットのInfiniiVision 3000G / 4000G XシリーズオシロスコープのシステムENOBは約6.9です。極めて低ノイズのフロントエンドを備えた14ビットのHD3シリーズオシロスコープのシステムENOBは、10.4ビット以上です。

一般的に、ENOBが高いほど優れています。しかし、エンジニアはシグナルインテグリティの評価をENOBだけに頼ることは注意が必要です。ENOBは、オシロスコープが注入するオフセットエラーや位相歪みを考慮していません。

ENOBの重要性と、ADCのビット数との違いについては、技術記事[ADCのビット数とENOBを理解する](#)を参照してください。

スケール設定が分解能に与える影響

スケール設定は、オシロスコープの分解能を最大化する上で重要な役割を果たします。波形をオシロスコープの画面全体を使用するようにスケールすると、オシロスコープのADCコンバーターの分解能を最大限有効に活用できます。例えば、信号を画面の垂直軸の半分の大きさにスケールした場合、使用されるADCのビット数は14ビットから12ビットに減少します。垂直軸の1/4にスケールすると、ビット数は14ビットから10ビットに減少します。波形を表示する際、画面の垂直軸のほぼすべてを使用するようにスケールすれば、オシロスコープのADCの14ビットをフルに活用できます。最高の分解能を実現するには、最も感度の高い垂直軸スケールを設定して波形を表示します。

ADC、オシロスコープのフロントエンドアーキテクチャー、プローブの組み合わせにより、垂直軸スケールの感度が決まります。ノブを回しても、あるポイントまでくると、オシロスコープのハードウェアが最高感度に達し、垂直軸スケールをそこから下げることができなくなります。ここは、オシロスコープがソフトウェアベースの拡大機能に移行するポイントになります。垂直軸スケールを小さくしても、信号が表示上拡大されるだけで、分解能は向上しません。従来のオシロスコープの多くは、2 mV/div未満でソフトウェアによる拡大機能に切り替わります。さらに、一部のメーカーでは、フロントエンドのノイズが大きいため、小さな垂直軸設定（2 mV/div未満）でオシロスコープ自体の帯域幅を制限しています。この場合、微小信号を全帯域幅で見ることが難しくなります。

2種類のオシロスコープを比較します。垂直軸のスケールを、16 mVでフルスケールにし、画面をほぼすべて使いきるような振幅を持つ信号を考えます。

- 8ビットADCを搭載しているInfinium 3000G / 4000G X-シリーズなどの従来のオシロスコープの場合、7 mV/divでソフトウェアベースの拡大機能に移行するので、最小のフルスクリーン分解能は56 mV ($7 \text{ mV/div} \times 8 \text{ div}$) /256のQレベルになります。すなわち、最小分解能は218 μV です。
- InfiniiVision HD3シリーズ オシロスコープは、1 GHz 帯域でありながら14ビットのADCを搭載し、2 mV/divまで帯域幅の制限なしでハードウェアベースの拡大機能を維持できます。最小のフルスクリーン分解能は、16 mV ($2 \text{ mV/div} \times 8 \text{ div}$) /16,384のQレベルになります。すなわち、最小分解能は0.15 nVです。これは図2に示すように、従来の8ビットのオシロスコープの64倍の分解能です。

オシロスコープのノイズ

微小な電流や電圧、あるいは大きな信号のわずかな変化を観測するためには、低ノイズ（高いダイナミックレンジ）のオシロスコープが不可欠です。

注記：オシロスコープのノイズレベルよりも小さい信号を確認することはできません。信号が「ノイズの中」に埋もれていたら、その信号はノイズフロアより小さいことを意味します（図3）。

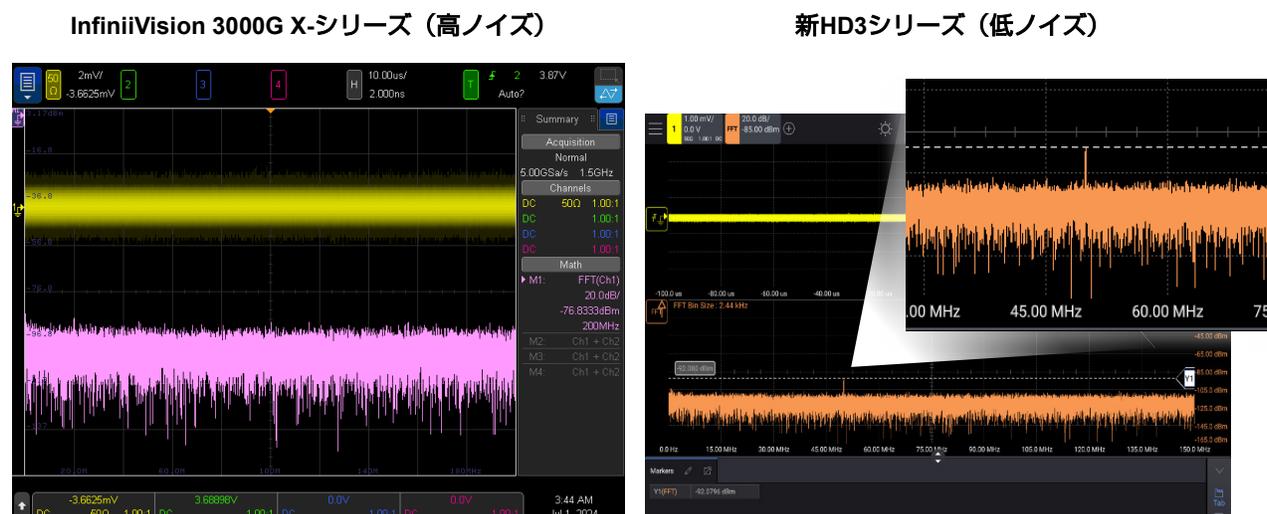


図3. この例では53 μ Vの信号を測定しています。左側の3000G Xシリーズオシロスコープでは、2 mV/divの設定でノイズフロアが372 μ V_{RMS}であり、フロントエンドのノイズが高いため、高速フーリエ変換（FFT）で53 μ Vの信号成分を確認することができません。右側のHD3シリーズでは、同じ設定でもノイズフロアが50 μ V_{RMS}以下の、なので、FFTで極めて小さな53 μ Vの信号成分をはっきり確認できます。このようにフロントエンドのノイズ性能は、信号の細部の観察に大きな影響を与えます。

ノイズレベルがADCの量子化レベルを超える場合、ADCビットの利点を活かすことができません。

ノイズはさまざまな原因から発生します。例えば、オシロスコープのフロントエンドやADC、さらに、デバイスの接続に使用されたプローブやケーブルからも発生する可能性があります。ADC自体にも量子化誤差が存在します。オシロスコープの場合、ノイズ全体に対して量子化ノイズの寄与は比較的小さく、オシロスコープのフロントエンドの影響が支配的となります。

多くのオシロスコープメーカーは、特定の帯域幅のノイズを特性評価して、そのノイズ性能値を製品のデータシートに記載しています。記載されていない場合は、メーカーに問い合わせるか、自分で測定することもできます。ノイズは、数分で簡単に測定できます。オシロスコープの前面パネルのすべての入力を取り外して、オシロスコープを50 Ω入力に設定します。テストは、1 MΩ入力でも可能です。十分なメモリ長（例：1 Mポイント）を設定し、て高いサンプリングレートに固定し、オシロスコープのフル帯域幅を使用できる十分に高速なサンプリング速度に固定します。オシロスコープを無限残光表示で十分長い時間重ね描きさせ、測定波形の太さを確認します。波形が太いほど、多くのノイズがオシロスコープ内部で発生しています。「AC RMS（全画面 標準偏差）」をオンにすれば、各V/div設定でのノイズレベルを確認することもできます。

InfiniiVision HD3シリーズオシロスコープは、驚異的な低ノイズフロア（2 mV/div、50 Ωで50 μ V_{RMS}未満）を実現した全く新しいカスタムフロントエンドを搭載しています。

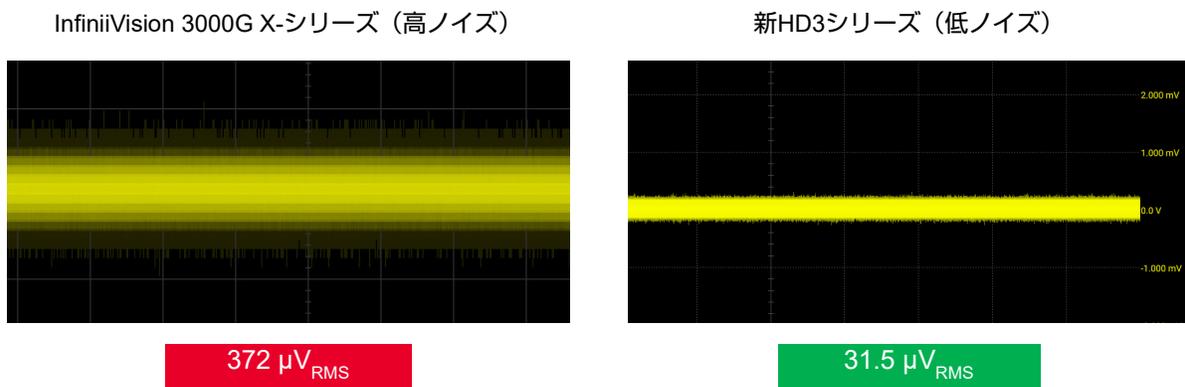


図4. 各オシロスコープで、1mV/divおよび50Ω入力でAC RMSノイズを測定 オシロスコープの基本ノイズレベルは、測定するすべての信号に影響を与えるため、他のオシロスコープと比較する際には、その点を考慮してください。HD3シリーズのフロントエンドチャンネルは、業界で最も低ノイズであり、信号や測定への影響を最小限に抑えます。

オシロスコープの各チャンネルは、それぞれの垂直軸設定において独自のノイズ特性を持ちます。ノイズを評価するには、波形の厚みを観察する方法がありますが、より分析的なアプローチとして、 V_{rms} ACを測定して定量化することも可能です。これらの測定により、オシロスコープの各チャンネルのさまざまな垂直設定でのノイズ量が把握でき、オシロスコープのノイズの影響を最小限に抑えて微小信号を測定することができます。収集されるすべての垂直軸の値は、オシロスコープのノイズの影響を受けます。ノイズは、水平軸および垂直軸の測定に影響を与えます。

オシロスコープのノイズが低いほど、測定結果は良くなります。

周波数応答

オシロスコープは、それぞれ固有の周波数応答を持っており、これはそのオシロスコープが定格の帯域幅まで正確に信号を収集できる能力を示します。オシロスコープが正確に波形を収集するためには、以下の3つの要件を満たす必要があります。

- オシロスコープの周波数応答がフラットであること。
- オシロスコープの位相応答がフラットであること。
- 捕捉した信号がオシロスコープの帯域幅内であること。

上記の要件から1つでも外れれば、オシロスコープによる波形の捕捉／描画が不正確になります。これらの要件との差が大きくなるほど、捕捉／描画される波形のエラーが大きくなります。

高速な立ち上がりの信号エッジには複数の高調波が含まれます。ユーザーは、オシロスコープが適正な振幅を使用して正確に各高調波成分を測定できることを期待しています。理想的にはオシロスコープの振幅応答は最大帯域幅まで均一かつフラットで、信号はすべての周波数（位相）で同じ時間だけ遅延するべきです。周波数応答がフラットならばオシロスコープはすべての周波数を同等に扱えます。位相応答がフラットでないとオシロスコープには歪んだ波形が表示されます。

HD3シリーズオシロスコープは、補正フィルタを使用して、極めてフラットな振幅応答と位相応答を実現しています。

周波数応答がフラットでないと、表示信号に歪みが生じます。オシロスコープの周波数応答は、オシロスコープメーカーに問い合わせることができます。通常、これらの性能はデータシートに掲載されていませんが、入手可能です。

全体的な周波数応答は、オシロスコープの周波数応答に、被試験デバイスと測定器を接続するプローブやケーブルの周波数応答を合成したものです。4 GHzのオシロスコープの入力に1.5 GHzのBNCケーブルを取り付けた場合、システム全体の帯域幅を制限するのは、オシロスコープではなくケーブルです。同じ原則が、プローブや、プローブに接続されるアクセサリにも当てはまります。プローブやケーブルにも独自の周波数応答があります。正確な測定が求められる場合には、プローブ、アクセサリ、ケーブルが制限要因にならないようにしなければなりません。

補正フィルター

オシロスコープの中には、周波数特性を決定するためにアナログ・フロントエンド・フィルターを使用するものがあります。また、リアルタイムで補正フィルターを適用するものもあります。これらの補正フィルターは、フラットな振幅と位相応答を実現するために、通常、特定のオシロスコープのシリーズ用に調整されたハードウェアDSPブロックに実装されています。補正フィルターをアナログフィルターに組み合わせることにより、アナログフィルターだけを使用するよりもさらにフラットな振幅／位相応答を実現できます。HD3のような高品質のオシロスコープには、均一でフラットな周波数応答を実現するために、アナログフィルターと補正フィルターの両方が搭載されています。

周波数応答の特性は、一般的に、そのロールオフ特性に由来する名前が付けられています。ブリックウォールフィルターは、急峻に帯域外の信号を減衰させてノイズを低下させたいときに使用されます。高速エッジに対して、帯域外の高次高調波を急峻に減衰させるため、わずかなアンダーシュートおよびオーバーシュートが生じます。ガウシアンロールオフ応答はリングングが少ないが、トレードオフとしてノイズが増えます。

要約

新しいオシロスコープを評価する際には、広い周波数範囲にわたって測定対象信号を忠実に表示できることが重要です。シグナルインテグリティに関するすべての性能（高分解能、低ノイズ、フラットな周波数応答、優れたENOB）に関して優れた特性を備えているオシロスコープを選択してください。確度が必要な場合は、HD3において他にありません。

垂直軸確度のメトリック	オシロスコープのブロック	調べる方法
分解能	ADC	製品データシート
ノイズ	フロントエンドチャンネル	製品データシート
ENOB	ADC／フロントエンド	データシートに記載されている場合と記載されていない場合があります。データシートに情報が記載されていない場合は、問い合わせる必要があります
ハードウェア垂直スケール	ADC／フロントエンド	ソフトウェアによる表示拡大が始まるポイントはデータシートに記載されていない場合もあります。メーカーによっては小さい感度では帯域幅を制限しています。
周波数応答のフラットネス	アナログフィルターおよび補正フィルター	ほとんどのメーカーが製品データシートに記載しています。評価対象モデルの振幅および位相応答については、メーカーに問い合わせる必要があります。
タイムスケール確度	タイムベース	製品データシート

用語集

アナログ／デジタルコンバータ（ADC）

オシロスコープに内蔵されているADCは、入力信号の電圧をデジタル値に変換するデバイスです。ADCの量子化レベルまたは出力レベルは、 2^n となり、 n はADCのビット数を示します。

分解能のビット数

分解能のビット数は、オシロスコープのADCのビット数だけでなく、高分解能モード、アベレーシングを使って算出できる総合的な分解能です。

有効ビット数（ENOB：Effective Number of Bits）

ADCまたはオシロスコープのダイナミックレンジは、多くの場合、そのENOBで表されます。ENOBは、ノイズや、垂直歪みの多くの要因を考慮しています。このためオシロスコープ全体のENOBは、ADCのENOBよりも低い値になります。

フィルター

フィルターは、特定の周波数応答特性を示す回路またはアルゴリズムです。ユーザーは、ディスクリートのアナログ回路からフィルターを実装することも、DSPのハードウェアフィルターを実装することもできます。ソフトウェアで実行されるフィルタは、より高い柔軟性を提供しますが、一般的に動作速度が遅くなります。

周波数応答

周波数応答は、特定の帯域幅範囲での振幅／位相特性を表します。理想的な周波数応答プロットは、フラットなブリックウォールロールオフになります。

フロントエンド

フロントエンドとは、オシロスコープ上のBNC入力からADCまでの回路です。フロントエンドには、アナログフィルター、1 M Ω 入力と50 Ω 入力の切り替え、ADC用に適切にスケールリングするために必要なアッテネータが含まれます。

ジッタ

ジッタは、理想的な水平位置からの偏差を表します。オシロスコープは、デジタル回路のジッタを測定できる有用なツールです。オシロスコープにも本質的に内部にジッタがあるので、ジッタ測定への影響を最小限するためには、高品質なオシロスコープが必要です。

ノイズ

ノイズは、真の信号値からの垂直方向の偏差を表します。オシロスコープのノイズレベルよりも微小な信号はノイズに埋もれて確認することはできません。ノイズレベルがADCの量子化レベルよりも大きいと、高分解能ADCビットの利点を活かすことができません。オシロスコープ全体のノイズに最も大きく影響を与えるのはフロントエンドの性能です。

分解能

オシロスコープのADCの分解能は、検出できる最小の量子化レベルです。オシロスコープは、複数回にわたって捕捉した波形データをアベレーシングしたり、またはオーバーサンプリングとDSPフィルターを組み合わせることで、さらなる高分解能を実現できます。

タイムベース

タイムベースは、水平軸確度に影響するオシロスコープの回路で、サンプリング・クロック・ジッタを低い状態に維持します。

関連資料

タイトル	カタログ番号
InfiniiVision HD3シリーズ オシロスコープ — データシート	3124-1567JAJP
ADCのビット数とENOB（有効ビット数）を理解する — 技術記事	5992-3675JAJP
リップル／ノイズ測定のための5つのヒント — アプリケーションノート	5992-0946JAJP
オシロスコープ測定ツールによる車載用シリアルバスの効果的なデバッグ — アプリケーションノート	5991-0512JAJP

見逃していたものを発見：解像度は4倍で、ノイズは半分

InfiniiVision HD3シリーズ オシロスコープは、低ノイズフロントエンドと14ビットADCにより、小さい信号を正確に捕捉することができます。これは、他の12ビット汎用オシロスコープと比較して4倍の垂直軸分解能を提供します。妥協のない波形更新速度、キーサイトのフォルトハンターなどの強力な新機能、大容量メモリ、ハードウェアによるテストと組み合わせることで、HD3シリーズはデザインのデバッグを可能にします。

HD3 シリーズオシロスコープの詳細情報：[keysight.com/find/HD3](https://www.keysight.com/find/HD3)



図5. HD3シリーズは、オシロスコープ測定用に最適化されたカスタムコンポーネントを使用しています。

キーサイトは、設計、エミュレーション、テストの課題を迅速に解決し、最高の製品体験を生み出すことで、技術革新の限界を押し広げます。

イノベーションのスタートはこちらから：www.keysight.co.jp



本書の情報は、予告なしに変更されることがあります。© Keysight Technologies, 2019 – 2024, Published in Japan, August 28, 2024, 5991-4088JAJP