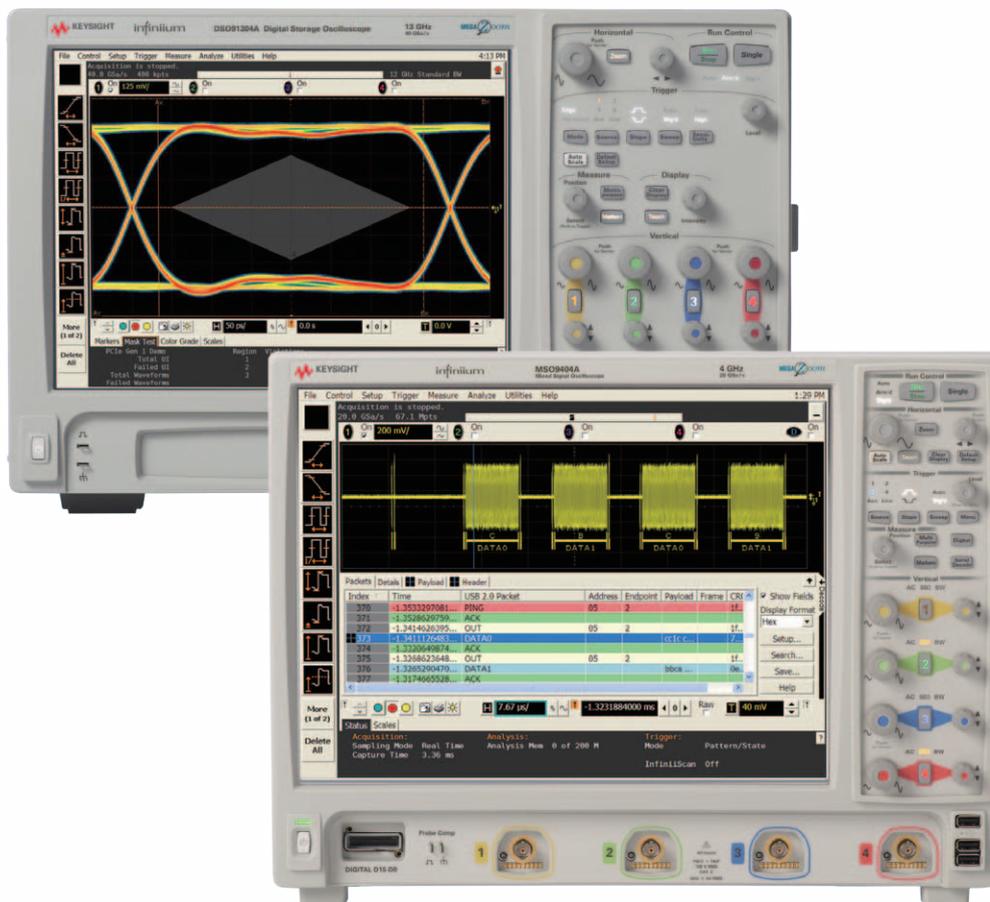


Keysight Technologies

オシロスコープの品質を評価する際の正しい指標について

Application Note



はじめに

オシロスコープは今日、エンジニアにとっては、必要不可欠なツールです。オシロスコープは、信号の電圧を表示する機能を備え、電子機器の不具合を診断し、科学、医療、工学、電気通信のさまざまなアプリケーションの電子回路をチェックすることができます。この際に重要なことは、適切なオシロスコープを選択することであり、その性能を評価する必要があるということです。帯域幅、サンプリングレート、メモリ長などの主要仕様は、さまざまなオシロスコープを比較する際のベースとなります。ただし、オシロスコープが優れた主要仕様を備えていても、今日のエンジニアが求める、正確な結果を提供できない場合があります。

オシロスコープの確度について

オシロスコープで確度が非常に重要になるのはなぜでしょうか？この質問に答えるには、A/Dコンバーター (ADC) が正しく信号をデジタル化できるように、オシロスコープのフロントエンドで信号が調整されているということを考える必要があります。このフロントエンドは、アッテネータ、プリアンプ、信号経路で構成されています。

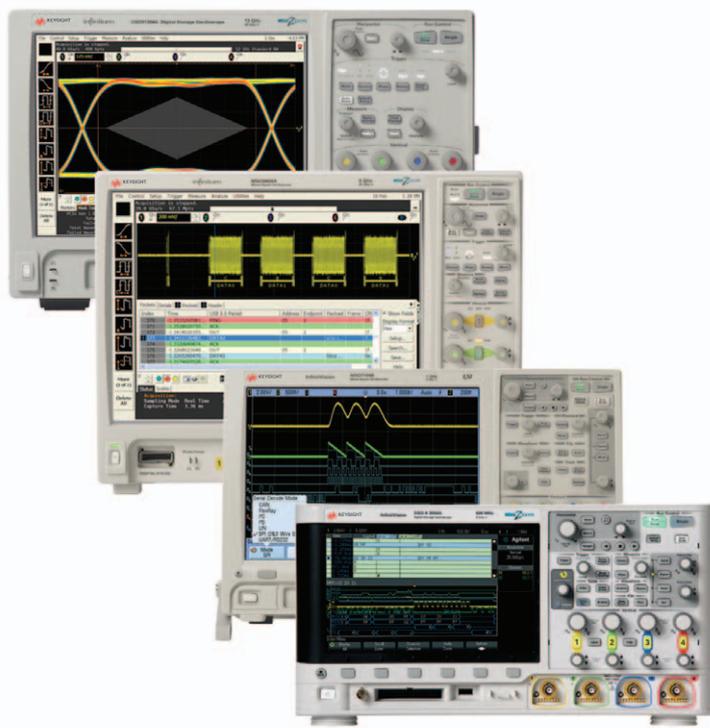
オシロスコープの確度を議論する場合、フロントエンドとADCの両方のブロックを含んだ信号経路全体を考慮する必要があります。設計者は、平坦な周波数応答、低ノイズ、広帯域を備えたフロントエンドチップを長年にわたって設計しています。また、オシロスコープ、特に高GHzレンジで動作するオシロスコープには、最先端のADCテクノロジーが必要なので、オシロスコープのベンダーは専用のADCチップを設計することになります。このような開発には、何年もの設計作業と何百万ドルもの費用がかかります。ただし、この投資は、努力に見合う価値があります。オシロスコープの確度を最大限に向上することができるからであり、またフロントエンドとADCテクノロジーの両方のブロックによって、測定信号の変化が最小限に抑えられるからです。

オシロスコープの品質を正確に評価するには、エンジニアは、主要仕様とその他の仕様(更新レート、ジッタ測定フロア、ノイズフロア、測定の再現性など)の両方を考慮する必要があります。有効ビット数(ENOB)は、この評価で役立つもう1つの仕様です。ベンダーは、オシロスコープの「有効性」を評価する最適な指標として、この仕様を公表しています。エンジニアは、ENOBにのみ頼ってオシロスコープを評価してよいものでしょうか？あるいはENOBはエンジニアが考慮すべき数多くの性能指数の1つにすぎないのでしょうか？以下で詳細に説明します。

オシロスコープの測定品質の評価

オシロスコープの測定品質の評価に使用できる主要な基準の1つがノイズフロアです。正確な信号測定を保証するためには、オシロスコープのノイズフロアが小さくなくてはなりません。この要件をよく理解するために、デジタル信号のリアルタイム・アイに対してマージンテストを行う場合を考えます。この場合、オシロスコープのノイズは、アイの高さを減少させ、立ち上がり時間を悪化させることにより、アイの幅に影響を与え、さらにジッタを増加させます。このため、デバイスの合否に影響する可能性のあるゴーストノイズが生じます。

通常、オシロスコープの帯域が広くなると、発生する内部ノイズが増加します。これはオシロスコープの下側帯域幅の低域周波数がロールオフすることによって通常抑圧される高域周波数によるノイズが累積するからです。オシロスコープのノイズによって、不要なジッタが付加され、貴重な設計マージンが損なわれることになるため、正確な測定を行うには、オシロスコープのノイズフロアが小さいことが求められます。



理想的には、さまざまな垂直設定とオフセットで、オシロスコープのノイズフロアの特性を評価する必要があります。これによりエンジニアは、オシロスコープの設計者がどの程度ノイズの少ないフロントエンドとADCを効果的に設計しているのかがわかります。オシロスコープのノイズは、以下の手順で測定できます。

1. オシロスコープのチャンネルからすべての入力を切り離します。図1に示したような測定画面になります。
2. 1つのチャンネルをオンにします。
3. 測定する必要がある垂直設定を選択します。例として、100 mV/divが極めて一般的な垂直設定です。
4. サンプリングするデータの少なくとも500 Kポイントを選択します。
5. タイムスケールを500 ns/divに変更します。各ベンダーによって異なることに注意してください。サンプリングレートが一定に保たれていることを確認してください(図2)。

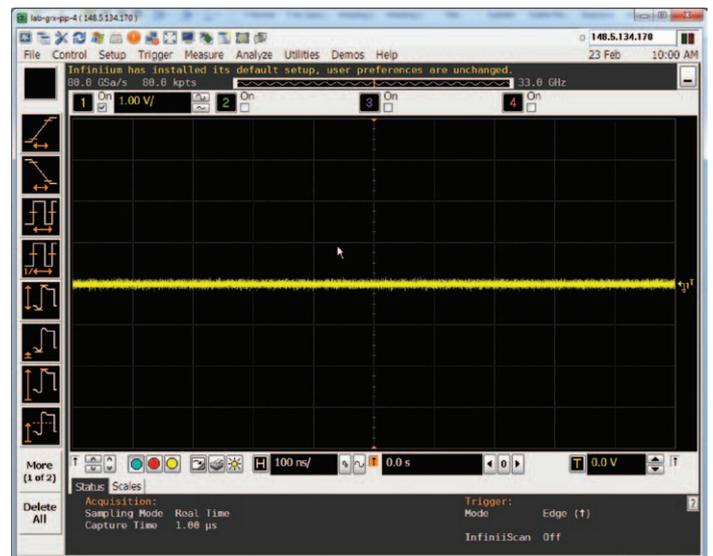


図1. いずれの入力も測定していないオシロスコープの画面

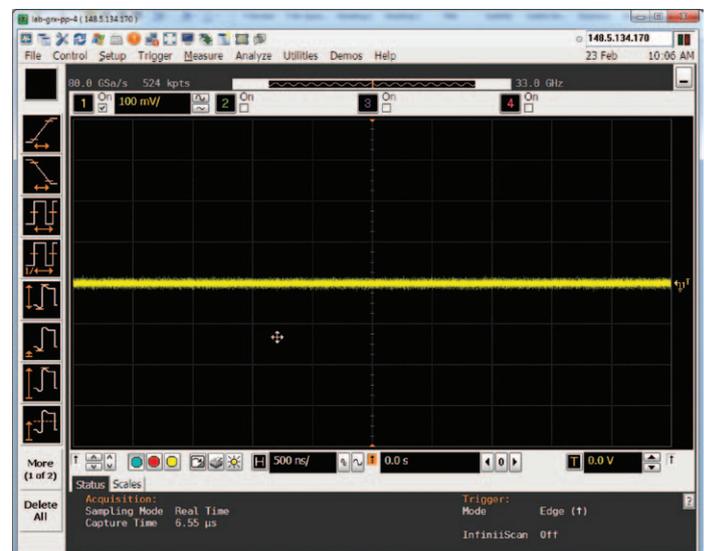


図2. この例でのサンプリングレートは80 GSa/sです。

オシロスコープの測定品質の評価(続き)

- ACRMS電圧測定をオンにします。この測定が必要になるのは、すべてのオシロスコープで垂直ヒストグラムが利用できるとは限らないからです。オンにした測定が「単一サイクル」に設定されていることを確認してください。Tektronix 70000Cオシロスコープの場合は、オシロスコープがデフォルトで「パルスモード」に設定されているので、「アイモード」をオンにする必要があります。LeCroy社のオシロスコープでは、「フラット」周波数応答をオンにして同じ比較をする必要があります。
- キーサイトとTektronix社は垂直ヒストグラム機能を備えています。これは、結果をACRMS測定と比較するための優れた手段です。これらのベンダーのオシロスコープでは、垂直ヒストグラム測定をオンにしてください。キーサイトのオシロスコープの場合は、以下を選択することによりこの垂直ヒストグラムをオンにできます。[Analyze]→[Histogram]→[Enable Histogram]→[Orientation to Vertical](図3)ヒストグラムウィンドウのStd Dev(標準偏差)測定を使用します。ACRMS測定と同じでなければならないことに注意してください。
- 測定を記録します。
- さまざまな帯域ポイントでステップ3～8を繰り返し、波長感度曲線ごとの真のノイズを取得します。
- 図4に示すように、画面上で1つ上の目盛りに信号を上げることでオフセットを変更します。
- ステップ3～9を繰り返します。

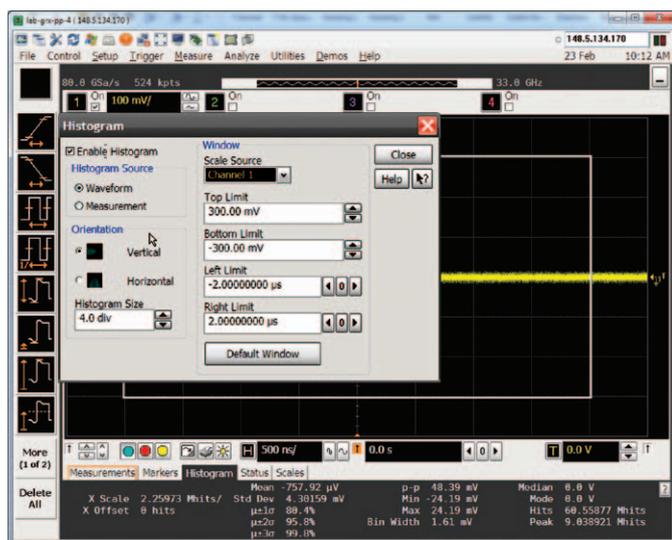


図3. キーサイトのオシロスコープのヒストグラム測定ウィンドウ

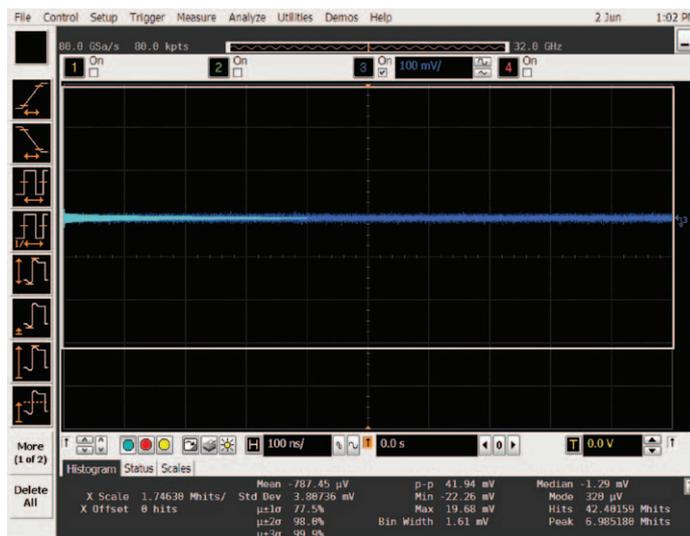


図4. 信号を1 div上に調整することでオフセットを変更できます。

ENOBについて

ノイズフロアの仕様はオシロスコープの測定品質の判断に非常に役立つ場合がありますが、この評価を行うための1つの手段にすぎません。IEEEは、ENOB仕様に基づいてオシロスコープのADCの「有効性」を評価するという、別の手法を1900年代の後半に定義しました。基本的にENOBは、システム全体の分解能をビット数で表したもので、周波数レンジ全体にわたる累積誤差を表します。通常、ENOBは、周波数が高くなるにしたがって減少します。

現代のオシロスコープでは、2つのADCアーキテクチャー(パイプラインまたはフラッシュ)のうちのどちらかを使用しています。パイプライン型のADCは、2つ以上のサブレンジステップを使用して、より高いサンプリングレートを達成しています。例として、90000 Xシリーズ オシロスコープは、80個の256 MSa/sのサブレンジを組み合わせて20 GSa/sという高サンプリングレートを達成しています。一方、フラッシュ型のADCは、多数のコンパレータ(比較器)を並列に並べてアナログの入力信号を、基準信号と一斉に比較し、1回の比較でアナログ値をデジタル値に変換することができます。ここで分解能がnビットの場合には、 $2^n - 1$ 個のコンパレータが必要になり、分解能に合わせて、ステップ幅の小さい参照信号を用意する必要があります。各ADCテクノロジーにはそれぞれに固有の制限があることに注意してください。フラッシュ型のADCは、リニアリティー誤差を生じやすく、またパイプライン型のADCは通常、インタリーブ誤差が多くなります。

ADCへのリミッタを決定するために、ベンダーは、ほとんどの場合、オシロスコープシステム全体のENOB特性を評価します。結果として得られるENOBは、ADC単独のENOBよりも小さくなります。オシロスコープのADCはシステム全体の一部であって単独で使用することはできないため、システム全体のENOBの結果のみが有効になります。ENOBの結果が周波数によって変化すること、また各オシロスコープモデルに固有のENOBプロットがあることに注意してください(図5)。

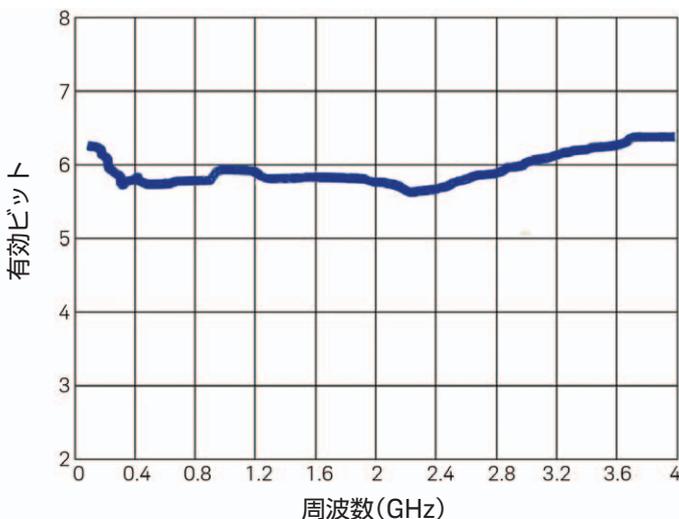


図5. これは、キーサイトのInfiniium 9000シリーズ オシロスコープのENOBサンプルプロットを示しています。プロットは、オシロスコープシステム全体のENOBで、8ビットADC単独のものではありません。

現代のほとんどのオシロスコープは通常8ビットであり、したがって256レベルでの表示が可能です。ただし、エンジニアは、8ビットのフル分解能を達成する性能を備えたオシロスコープを利用することはできません。オシロスコープの有効ビット数を最大化するには通常、垂直レンジ全体を信号が使用する必要があります。当然、非常に多くの信号がADCに入力されるというマイナス面があるため、飽和が生じ、信号に対して望ましくない影響が生じます。例えば、垂直レンジの90%を利用するように信号を調整した場合は、オシロスコープの8ビットのコンバータは7.2ビット(0.9×8ビット)に減少します。理想的な状況であっても、オシロスコープのユーザーは通常、フル8ビットよりも少ないビットしか使用できません。さらに、フロントエンドのノイズ、高調波歪み、インタリーブ歪みによってオシロスコープが影響を受ける実際の環境では、さらにENOBが低下します。

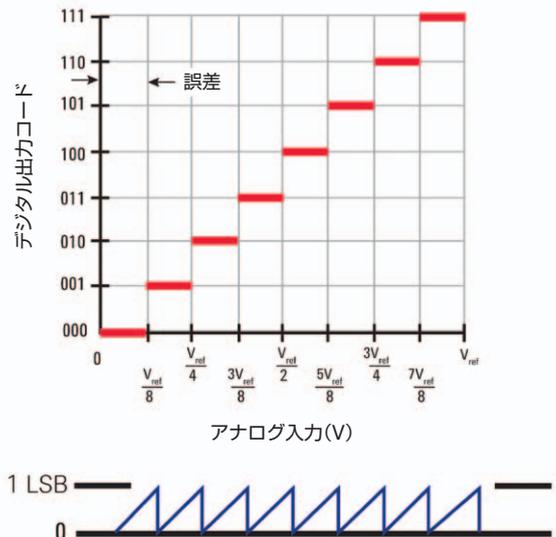


図6. 誤差の大きさはゼロ～1 LSBの範囲です。

図6は、最大8の量子化レベルを備えた3ビットのADCを示しています。この例では、信号の電圧が増加すると、量子化誤差も $V_{ref}/(2^3)$ だけ増加します。このときの最大誤差は、 $V_{ref}/8$ または最下位ビットの $\pm 1/2$ です。システムのビット数が増えるほど、誤差の影響は少なくなります。このことは、8ビットと14ビットのADCの最大誤差の違いを調べればわかります(表1)。

表1. ビットが多いシステムは誤差の影響が少ない

分解能のビット数	量子化レベル	1 Vがフルスケールのときの1 LSB=
8ビット	256	3.9 mV
10ビット	1,024	976 μ V
12ビット	4,096	244 μ V
14ビット	16,384	61 μ V

ENOBの測定

オシロスコープのENOBは、周波数が掃引される固定振幅の正弦波として測定されます。結果として得られる電圧測定値は、MathWorks MATLABなどのポスト・プロセッシング・ツールを使用して評価されます。これは、タイムドメインまたは周波数ドメインのどちらかで測定することができます。タイムドメイン手法で信号を評価する場合は、ENOBは、時間に対する理論的な最適フィッティング電圧を測定値から減算することにより計算されます。この数値の差は、オシロスコープのフロントエンドによるノイズであり、位相の非線形性や周波数掃引での振幅変動などによって生じるものです。また、ノイズは、ADCによるインタリーブ歪みによっても生じる可能性があります。周波数ドメインで同じ信号を評価する場合は、ENOBは、帯域全体のパワーから基本波トーンに伴うパワーを減算することにより計算されます。アルゴリズムは、以下のようになります。

1. 指定されたチャンネルに帯域幅の範囲内の周波数でRF正弦波を入力します(図7)。
2. 正弦波のVppを記録します。各ステップで同じ信号を使用することが非常に重要になります。
3. オシロスコープのメモリ長を2000ポイントに設定してファイルに保存します。
4. ファイルをMathWorksにロードし、データの2乗平均誤差を計算します。キーサイトは、オシロスコープユーザーに、2乗平均誤差とENOBを計算するスクリプトを提供しています。
5. 別の正弦波周波数でステップ1～4を繰り返し、各ステップでVppが同じであることを確認します。これは極めて重要なステップです。Vppの変動によってENOBが増加または減少することになるからです。

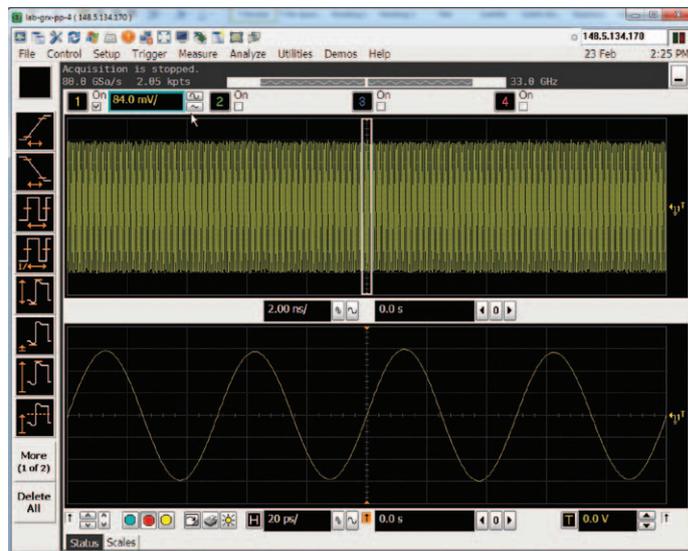


図7. 指定されたチャンネルに入力された正弦波。

オシロスコープのベンダーは、ENOBを測定／解析する際に測定の手続きの設定を同じにすることをユーザーに求めています。同じでなければ、使用する信号源のスペクトル純度がENOBの結果に影響を与える可能性があります。この場合、信号源とそれに関連するフィルターによって、信号源のENOBがオシロスコープのENOBよりも大きくなるようにすることが必要です。また、ENOBの値は、オシロスコープの全画面振幅に対するソース信号の振幅の比に依存します。例えば、全画面の90%の場合(JEDEC規格が推奨する設定)と、全画面の75%の場合(ほとんどのユーザーが利用しているオシロスコープの設定)とで、ENOBの値は異なることとなります。したがって、ENOBやテストを比較するときには、テスト信号の周波数だけでなく、その振幅も考慮する必要があります。

品質指標としてのENOB

ENOBは、オシロスコープの内部誤差に起因する外部効果によってどの程度ADCが影響を受けるかを示す良好な指標ですが、正しいオシロスコープを選択する場合の独立した基準として使用できるというわけではありません。理論的には、オシロスコープのENOBが良好であれば、タイミング誤差、周波数スプリアス(通常はインタリーブ歪みに起因)、低ブロードバンドノイズが最小限に抑えられます。したがって、対象が主として正弦波の場合には、ENOBはオシロスコープ選択の有効な基準であると言えます。

ただし、残念ながら、ENOBはオシロスコープのADCとフロントエンドの指標をエンジニアに提供しますが、いくつかの属性については考慮されていません。ENOBは、オフセット、位相の不規則性、周波数応答が含まれていません。振幅や位相のフラットネスの影響を考慮していません。この制限をさらに明確に理解するには、図8のグラフを確認してください。これは、入力信号と、2つの異なるオシロスコープ上でこの信号の表示を示しています。どちらの測定器も同じENOBですが、一方の測定器の方がはるかに正しく入力信号を表示しています。

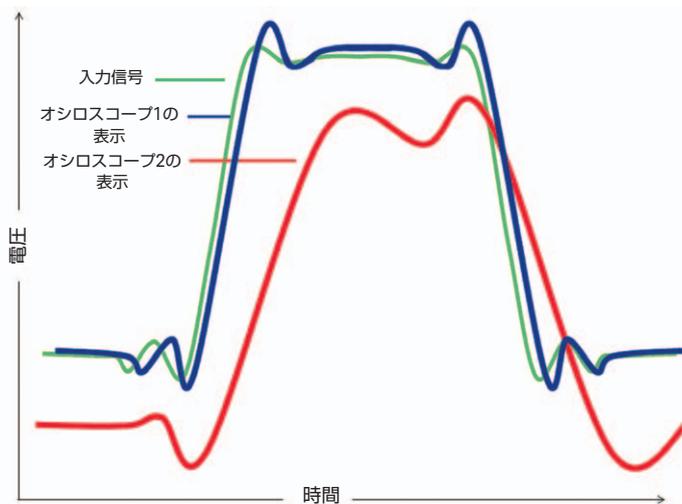


図8. オシロスコープ1と2は同じENOBですが、オシロスコープ2にはオフセットと位相歪みがあるため、入力信号を正確に表示する能力が制限されています。

ENOBで考慮されないもう1つの要素は、オシロスコープによるオフセット誤差です。このため、ENOBの等しい2つのオシロスコープは、同じ波形を示しますが、絶対電圧の差だけオフセットされます。この場合は、オフセットの調整、ノイズの測定、DC利得仕様の評価を行うことによって、より良い指標が得られます。

理想的な状況では、オシロスコープは周波数応答と位相をすべて同様に処理します。これにより、購入の決断を行う前に、測定器の性能をエンジニアが容易に評価できるようになります。ただし、位相と周波数のプロットは通常、ベンダーのデータシートにはありません。代わりに、フラットな周波数応答とリニア位相のプロット、またはガウス分布のロールオフとリニア位相のプロットなどが使用されています。ENOBは、周波数応答や位相の不規則性は考慮されておらず、オシロスコープによりそれぞれ異なります。

定格がそれぞれ6 GHzの2つのオシロスコープモデルを想定します。2.1 GHzの正弦波を表示すると、どちらの測定器も異なる波形を示します。一方は、遅い帯域ロールオフと最小限の位相補正アルゴリズムを備え、他方は、ロールオフする前に6 GHzよりも上でピークを示す周波数応答と、位相補正用の大規模なアルゴリズムを備えています。ENOBが大きい方のスコープが必ずしも正しく入力信号を表現しているとは限りません。

まとめ

ノイズフロアと同様に、ENOBは、オシロスコープを評価するための1つの評価基準を提供します。ただし、この指標には、オシロスコープの品質を判断するために重要ないくつかのパラメータが考慮されていません。正しいオシロスコープを選択する際の基準としてENOBを使用すべきかどうかは、何を測定するのか、および測定結果にENOBが影響するかどうかによって決まります。例えば、主として基本波の正弦波信号の場合、ENOBは、優れた品質基準として機能し、対象のオシロスコープモデルに固有のENOBプロットを確認する必要があります。ENOBは周波数によって変動するため、選択したオシロスコープの有効ビットの性能を全仕様帯域にわたって知ることが重要となります。

ただし、ENOBプロットをノイズフロアの測定とともに確認することが、さらに重要です。高速シリアルデータには、オシロスコープを通過する可能性があるが、有効ビットの減少によって実質的に影響を受けない特定の周波数における高調波が含まれているからです。この場合は、オシロスコープのノイズフロアの方が優れた測定精度の指標になります。ENOBとノイズフロアはともにオシロスコープの品質の正確な評価を保証することができ、最終的にエンジニアが正しい測定器を選択するために役立ちます。



myKeysight



www.keysight.co.jp/find/mykeysight
ご使用製品の管理に必要な情報を即座に手に入れることができます。



www.axiestandard.org

AXIe (AdvancedTCA[®] Extensions for Instrumentation and Test) は、AdvancedTCA[®] を汎用テストおよび半導体テスト向けに拡張したオープン規格です。Keysight は、AXIe コンソーシアムの設立メンバーです。



www.lxistandard.org

LXI は、ウェブへのアクセスを可能にするイーサネットベースのテストシステム用インターフェースです。Keysight は、LXI コンソーシアムの設立メンバーです。



www.pxisa.org

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) モジュール測定システムは、PC ベースの堅牢な高性能測定 / 自動化システムを実現します。



www.keysight.com/go/quality

Keysight Technologies, Inc.
DEKRA Certified ISO 9001:2008
Quality Management System

契約販売店

www.keysight.co.jp/find/channelpartners
キーサイト契約販売店からもご購入頂けます。
お気軽にお問い合わせください。

キーサイト・テクノロジー合同会社

本社 〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1

計測お客様窓口

受付時間 9:00-18:00 (土・日・祭日を除く)

TEL ☎ 0120-421-345 (042-656-7832)

FAX ☎ 0120-421-678 (042-656-7840)

Email contact_japan@keysight.com

ホームページ www.keysight.co.jp

記載事項は変更になる場合があります。
ご注文の際はご確認ください。



Unlocking Measurement Insights

© Keysight Technologies, 2011 - 2015
Published in Japan, October 29, 2015
5990-8093JAJP
0000-00DEP
www.keysight.co.jp