

デジタル・オシロスコープ の有効ビット数(ENOB) Technical Paper

Products:

| R&S®RTO1012 | R&S®RTO1022
| R&S®RTO1014 | R&S®RTO1024

このテクニカル・ペーパーでは、信号品質の
パラメータである有効ビット数(ENOB)につい
ての紹介と合わせて、R&S®RTO デジタル・オ
シロスコープの有効ビット数の評価方法につ
いてご説明します。

内 容

1	有効ビット数(ENOB)の基本.....	3
1.1	アナログ・デジタル・コンバータと有効ビット数.....	3
1.1.1	理想的なアナログ・デジタル・コンバータ.....	3
1.1.2	理想的でないアナログ・デジタル・コンバータ.....	4
1.1.3	信号入力部.....	4
1.2	有効ビット数の評価.....	5
1.2.1	振幅値の選択.....	6
1.2.2	周波数の選択.....	6
1.2.3	サンプル数の選択.....	7
2	テスト・セットアップと測定結果.....	8
2.1	測定セットアップ.....	8
2.1.1	測定機器.....	8
2.1.2	R&S®RTO の設定.....	9
2.1.3	MATLAB によるリモート・コントロール.....	9
2.2	測定結果.....	10
2.2.1	R&S®RTO1024 50 mV/div, 500 mV/div で 95%フルスケールの場合.....	10
2.2.2	R&S®RTO1024 50 mV/div で OCXO オプションなしの場合.....	11
2.2.3	R&S®RTO1024 50 mV/div で異なるフルスケールの場合.....	11
2.2.4	R&S®RTO1012 50 mV/div の場合.....	13
2.2.5	R&S®RTO 単体での評価.....	13
2.3	結果についての検討.....	16
2.3.1	400 MHz から 1 GHz の間で発生する有効ビット数のくぼみの原因は？.....	16
2.3.2	仕様化されている帯域外での有効ビット数はどうなるのか？.....	16
2.3.3	R&S®OCXO オプションは本当に必要なのですか？.....	16
2.3.4	入力信号振幅による影響.....	16
2.3.5	有効ビット数 (ENOB) > 7 を実現した R&S®RTO1012!.....	16
3	参考文献.....	17
4	補足情報.....	17
5	オーダー情報.....	17

1 有効ビット数(ENOB)の基本

有効ビット数 (ENOB) は、アナログからデジタル変換時における信号品質を示すパラメータです。有効ビット数が高いということは、アナログからデジタル変換時における電圧レベルの記録値がより正確であるということを意味します。

オシロスコープの有効ビット数は、単にアナログからデジタルへの変換品質だけでなく、測定器のパフォーマンスを決める重要な指標にもなります。このテクニカル・ペーパーでは、オシロスコープの有効ビット数の評価方法と、異なる設定時における R&S®RTO デジタル・オシロスコープの評価結果を示します。

1.1 アナログ・デジタル・コンバータと有効ビット数

1.1.1 理想的なアナログ・デジタル・コンバータ

図 1 に、理想的なアナログ・デジタル・コンバータの単純化した概略図を示します。

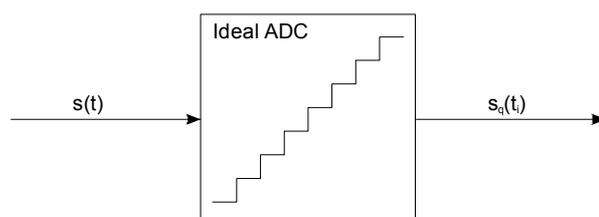


図 1: 理想的なアナログ・デジタル・コンバータの概略図

理想的なアナログ・デジタル・コンバータは、完全な線形特性を持ち、入力信号を単純に量子化します。通常は量子化時に、量子化誤差が発生します。信号のパワーとノイズのパワーを用いることで、アナログからデジタルに変換後の信号における信号対雑音比 (SNR) を求めることができます。仮に、フルスケールのサイン波が入力信号として使用されると、SNR は以下のように記述することができます。

$$\text{式 1} \quad SNR = 1.5 \times 2^{2B}$$

ここで、 B は ADC のビットを意味します。これを dB 値になるように変換すると、以下のようになります。

$$\text{式 2} \quad SNR_{dB} \approx 1.76 + 6.02B \text{ dB}$$

この等式を B となるように変換すると、最終的に以下のようになります。

$$\text{式 3} \quad B \approx \frac{SNR_{dB} - 1.76}{6.02}$$

この式は、ビット数が信号対雑音比より、どのように求められるのかを示しており、有効ビット数を計算する上での基本的な式になります。理想的な ADC の場合、 B は常に正の実数型整数になります。次のセクションで議論する非線形な ADC の場合は、 B は正の実数値をとります。

1.1.2 理想的でないアナログ・デジタル・コンバータ

理想的な ADC は、残念ながら存在しません。全ての ADC は、入力信号に対して必ず歪を生じます。典型的な歪としては、ノイズがあり、非線形な入力特性や、利得、そしてオフセット誤差などがあります。図 2 に、理想的でない ADC の例を示します。

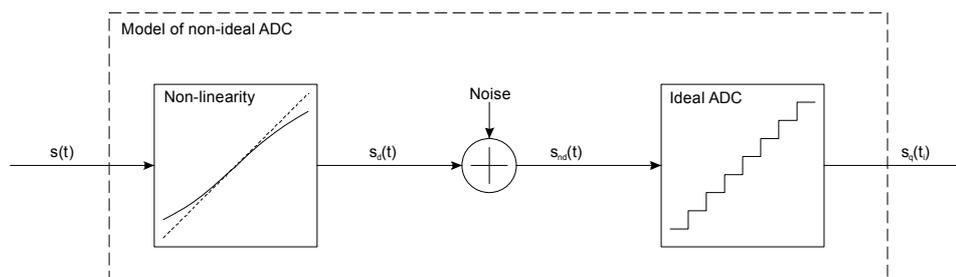


図 2: 理想的でないアナログ・デジタル・コンバータのモデル

ノイズは、ADC の SNR に直接影響します。非線形性は、高調波歪を発生させ、SNR を悪化させます。このように、12 ビットの ADC であったとしても、有効ビット数に換算すると 10.5 ビット程度に劣化するかもしれません。つまり、ADC の出力が 12 ビットあったとしても、実現できる SNR は、理想的な 10.5 ビットで達成可能な範囲に限定されてしまうということです。

有効ビット数は、ADC の設計や入力周波数などに依存します。高周波においては、回路内部の非線形性が悪化するため、有効ビット数も低下します。このように、通常 ADC の詳細仕様には、入力周波数に応じた有効ビット数の情報が含まれています。

1.1.3 信号入力部

オシロスコープにおいては、理想的な使い勝手を実現するために、ADC の前段にいくつかの回路が設けられています。こうした回路の概要を図 3 に示します。最前段には、可変の利得アンプ (VGA) があり、これはオシロスコープへの入力信号を ADC のダイナミックレンジに合うように最適化します。次段には、エリアジングを防ぐためのローパス・フィルタがあります。この 2 つの回路は、入力信号に対してさらなる歪をもたらします。可変利得アンプ (VGA) にはアクティブ素子が含まれているため非線形な動作をするだけでなく、周波数依存性のある部品も含まれています。アナログ・フィルタは、比較的安定していますが、理想的でない周波数応答を持つ場合があります。信号入力部の設計が優れている製品は、入力信号に対して与える影響を最小限に留めます。

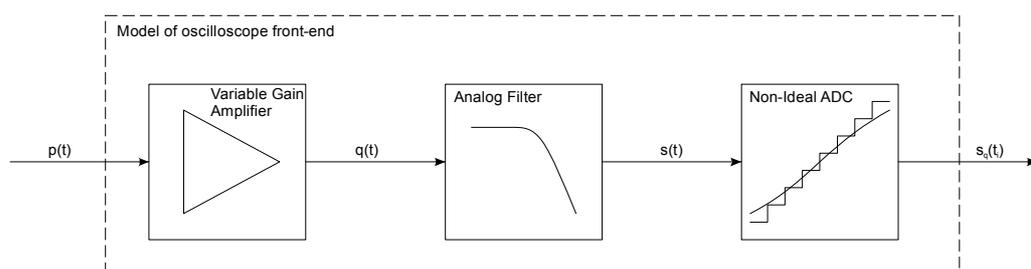


図3: オシロスコープの信号入力部の概略図

1.2 有効ビット数の評価

IEEE は、アナログ・デジタル・コンバータに関する定義用語や評価手法を決めています[1]。この中には、以下に述べる有効ビット数の定義も含まれています。

$$\text{式 4 } \text{ENOB} = 0.5 \log_2(\text{SINAD}) - 0.5 \log_2(1.5) - \log_2\left(\frac{A}{V}\right)$$

以下の定義が適用されます:

V : 被測定物のフル・スケール・レンジ

A : 出力信号に合わせたサイン波の最大振幅値 (V_{p-p})

SINAD : 信号対 雑音 + 歪み比

このペーパーでは、SINAD は以下のように定義します。

$$\text{式 5 } \text{SINAD} = \frac{P_S}{P_{NAD}}$$

以下の定義が適用されます:

P_S : 信号パワー; 入力周波数に対応した FFT ビンのパワー

P_{NAD} : ノイズと歪パワー; ナイキスト周波数の範囲内において 0 周波数ビンを除く、その他全ての周波数ビンのパワー合計

ここにおける SNR と SINAD ([1]で定義されている)は、'rms' (平均二乗偏差) 値は、通信工学などで一般に使用されているパワーの比とは異なる値です。このペーパーでは、2つのパワー値の測定比を常に示しています。

[1]には、SINAD を時間領域あるいは周波数領域を使用して計算する方法が定義されています。このペーパーでは、周波数領域を使用した解析方法についてご説明します。テスト周波数の正しい選択方法については、**Error! Reference source not found.**章で述べられています。また、高速フーリエ変換 (FFT) は、上記で定義されている P_S と P_{NAD} の計算に使用されます。

1.2.1 振幅値の選択

IEEE スタンドアードは、有効ビット数測定における特に入力信号の振幅値を定義していません。[1]によれば、どのような入力振幅でも使用して良いことになっています。なぜなら、フルスケールの振幅と実際のテスト信号の振幅の差が、有効ビット数の定義において考慮されているからです (式 4 の最後の項を参照)。

振幅の処理には、2つの方法があります。

1. 有効ビット数は、特定の入力振幅で仕様化されています。一般的な仕様では、有効ビット数の 90%フルスケール、あるいは 95%フルスケールとなっています。式 4 の定義を使用すると、有効ビット数は低い入力振幅の方が値が良くなります。なぜなら、テスト振幅に対する非線形性のみが測定結果に影響するためです。
2. 式 4 では振幅の正規化が省かれているため、有効ビット数の測定は SINAD によるものになります。この方法を使用すると、被測定システムの最適な動作ポイントは、入力パワーに対する非線形歪が発生する最も良いトレード・オフとして見つけることができます。この定義は公式な有効ビット数の定義には対応していないため、有効ビット数 (ENOB*) の結果を議論する章において詳しく述べます。

注) 有効ビット数 (ENOB*) は、システム設計やテストにおいてより実用的な方法です。この方法は、測定しているデバイスから観測されている信号品質を直接反映します。有効ビット数の測定は、異なるシステムの比較の基礎データとして提供されますが、測定された入力振幅が同じである場合の比較においてのみ使用することができます。

2種類の測定結果については、入力振幅の異なる値として2.2.3章に述べられています。その他の全ての測定は、フルスケールの 95%で行っています。

1.2.2 周波数の選択

入力周波数は FFT の周波数ビンに正確に合うように選択する必要があります。これは、連続したサンプル数はテスト信号の周期を、全て含むように設定するという事です。これは、どのようなウィンドウ関数を使用した場合でも、その影響を取り除くことができるため、測定を複雑にしないためにも非常に重要なポイントとなります。

さらに、より信頼性の高い測定を行うために、入力信号のサンプル数はできる限り高くする必要があり、ADC の出力コードは全て有効にする必要があります。5.4.1 章の [1] の表記から、最適なテスト周波数は以下ようになります。

$$\text{式 6 } f_{\text{opt}} = f_s \frac{J}{M}$$

以下の定義が適用されます:

f_{opt} : 有効ビット数を計算するのに使用される周波数

f_s : 被測定物のサンプリング・レート

M : 各シーケンス毎におけるテスト信号のサンプル数

J : テスト・シーケンス内の入力周波数の周期で、 M に対して互いに素になる整数

互いに素になるという意味は、公約数が存在しないという意味です。例えば、100 (2と5が因数) は9 (3が因数) と互いに素になりますが、15 (3と5が因数) は違います。以下の測定においては、式6によって導かれる周波数のみを使用します。

1.2.3 サンプル数の選択

[1]において、最小のシーケンス長は

$$\text{式 7 } M = \pi 2^B$$

で規定されます。以下の測定においては、切りの良い数字として 10,000 を使用しており、この数値は上記の式を満足するものです。これにより、テスト信号に対して十分なサンプル数が取れるため、信頼性の高い結果を得ることができます。

2 テスト・セットアップと測定結果

R&S® RTO オシロスコープで使用されている 8 ビット AD コンバータは、Rohde & Schwarz が独自に設計したものであり、高ダイナミックレンジ、すなわち高い有効ビット数を実現しています。[2]で述べられているように、この AD コンバータの有効ビット数は 4 GHz までの入力周波数に対して 7 ビット以上あります。但し、オシロスコープとしての性能は、入力部分のアナログ設計に大きく依存します。この章では、測定手法と合せて、測定結果についてご説明します。

2.1 測定セットアップ

2.1.1 測定機器

図 4 に、測定で使用する測定機材のセットアップの概要図を示します。

テスト信号源は R&S® SMA100A シグナル・ジェネレータを使用します。R&S® SMA100A の高調波は、30 dBc に仕様化されています。有効ビット数の測定において、こうした高調波の影響を最小限に抑えるために、R&S® SMA の出力は、スイッチ切替可能なアナログ・ローパス・フィルタによりフィルタリングされます。

そして、次に実際に測定する製品が接続されます。ここでは、2 GHz, 4 チャンネル R&S® RTO1024 と、1 GHz, 2 チャンネル R&S® RTO1012 デジタル・オシロスコープをテストします。R&S® RTO1024 には、OCXO (恒温槽付水晶発振器) オプション (R&S® RTO-B4) が搭載されています。このオプションは、R&S® SMA100A から出力されるリファレンス信号の入力ポートを提供します。R&S® RTO1012 については、外部リファレンスを使用しないでテストを行います。

高性能なケーブルを、測定器間の信号接続に使用します。これにより、信号源の歪を最小限に抑えることができます。

最後に、外部 PC にインストールされた MATLAB により、測定器をリモート・コントロールし、R&S® RTO から測定結果のデータを読み出します。

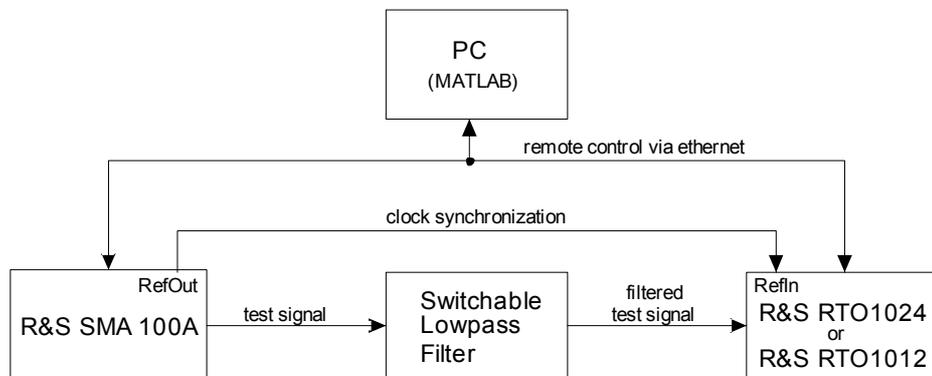


図 4: テスト用測定器のセットアップ

2.1.2 R&S[®]RTO の設定

R&S[®]RTO のサンプリング・レートを 10 G サンプル/秒 (デシメーションや補間処理を行わない)、分解能は 100 ps に設定する。レコード長は 10,000 サンプルを使用することで、正確な測定を行うのに、十分なデータが得られます (1.2.3 章を参照)。

2.1.3 MATLAB によるリモート・コントロール

R&S[®]RTO の便利な機能の 1 つに、リモート・コントロールがあります。この機能を使用することで、測定の高度な自動化を可能にします。

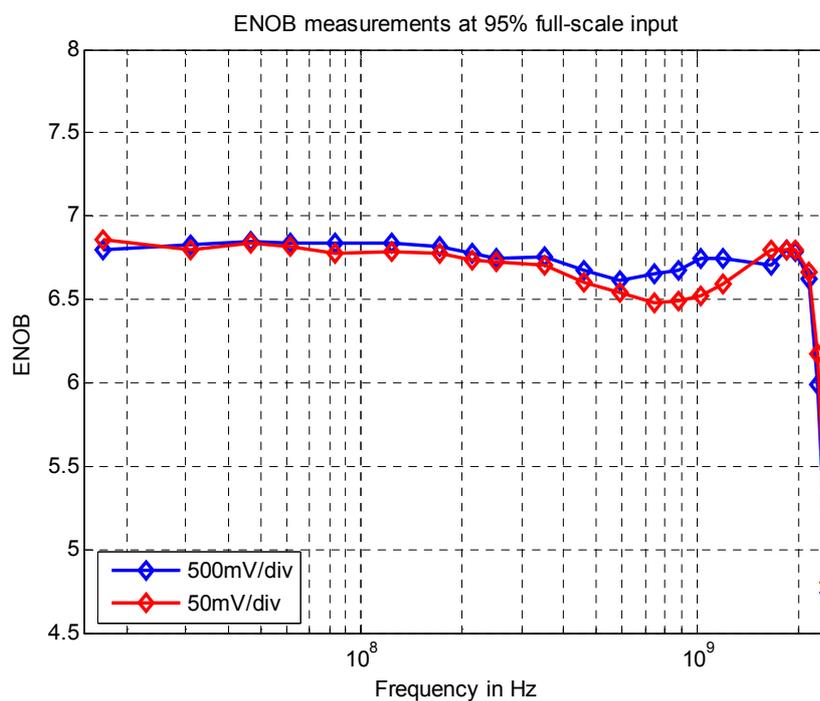
例えば、フルスケールの 95%における有効ビット数を、全周波数範囲にわたって測定します。ここで、R&S[®]SMA100A の正確な出力レベルは、出力周波数に依存します。さらに、切替可能なローパス・フィルタにはリップルが存在するため、R&S[®]RTO は独自の振幅周波数応答特性を持ちます。MATLAB スクリプトを使用した自動測定により、R&S[®]SMA から出力される振幅は、測定される各周波数において 95% フルスケールになるように調整されます。

R&S[®]RTO のリモート・コントロールに関する、詳しい情報は[3]を参照してください。

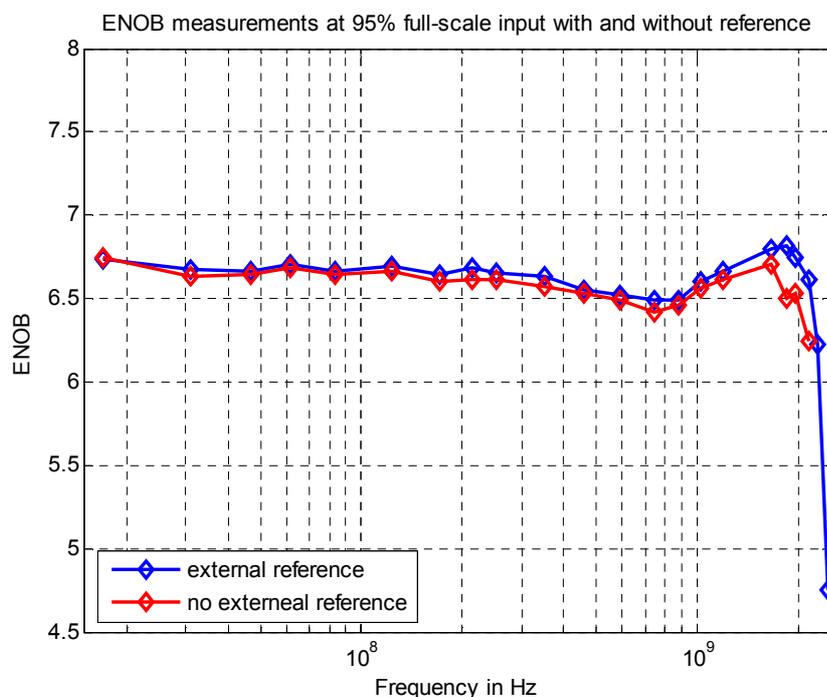
2.2 測定結果

特に指定のない限り、全ての測定結果は OCXO オプションを使用して R&S®RTO を R&S®SMA に周波数同期させて得られた値になります。

2.2.1 R&S®RTO1024 50 mV/div, 500 mV/div で 95%フルスケールの場合



2.2.2 R&S®RTO1024 50 mV/div で OCXO オプションなしの場合



■ 6: 50 mV/div における 95%フルスケール測定での有効ビット数の結果(外部リファレンスありなしの場合)

2.2.3 R&S®RTO1024 50 mV/div で異なるフルスケールの場合

図 7 は、異なるフルスケールにおける有効ビット数の測定結果を示します。予想通り、式 4 により計算した結果は入力信号の振幅レベルが低い場合の方が、より高い有効ビット数が得られています。これは、入力振幅が低いことで、システム内部に発生する非線形が抑えられるためです。

ノーマライゼーションを行っていない場合の、有効ビット数 (ENOB*) の測定結果を図 8 に示します。これらの結果は、純粋に SINAD に依存します。

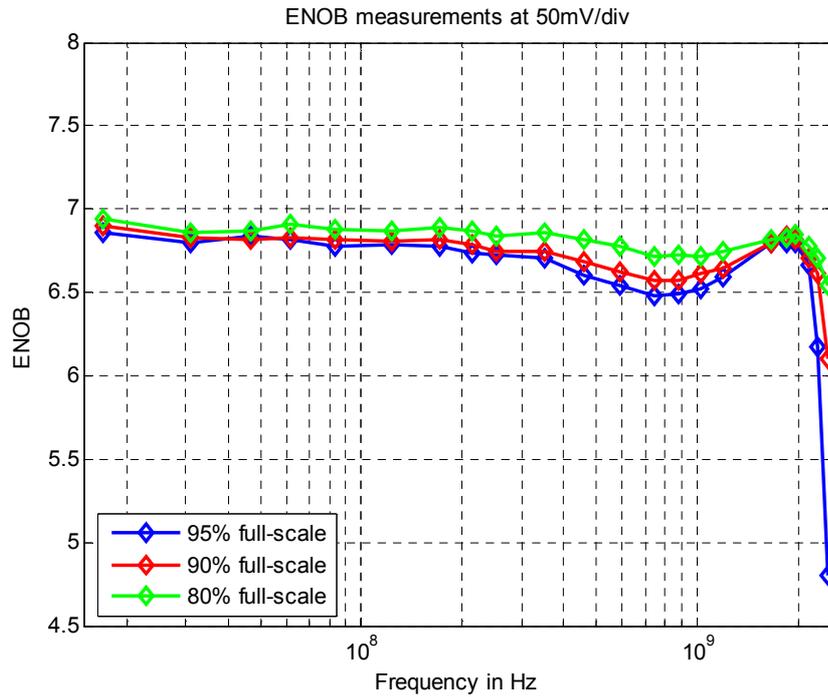


図 7: 50 mV/div で、異なるフルスケールの場合における有効ビット数の結果です。振幅の差は、有効ビット数を計算する場合に補正されるため、低い入力振幅の場合に良い結果が得られます。これは、入力信号がシステムの非線形性に大きく依存しないためです。

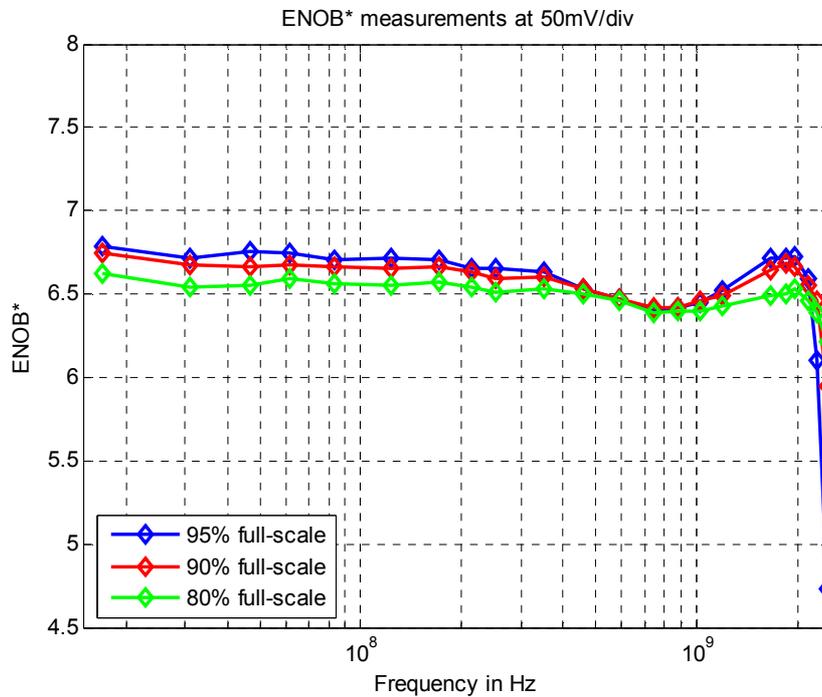


図 8: 50 mV/div で、異なるフルスケールにおける有効ビット数 (ENOB*) の結果です。有効ビット数 (ENOB*) は、異なる入力振幅において補正されていないため、測定結果は、純粋に SINAD に依存します。

2.2.4 R&S®RTO1012 50 mV/div の場合

R&S®RTO1012 の測定は、95% フルスケールで R&S®OCXO オプションなしの場合です。R&S®RTO1012 は 1 GHz で 2 チャンネル入力を持っています。

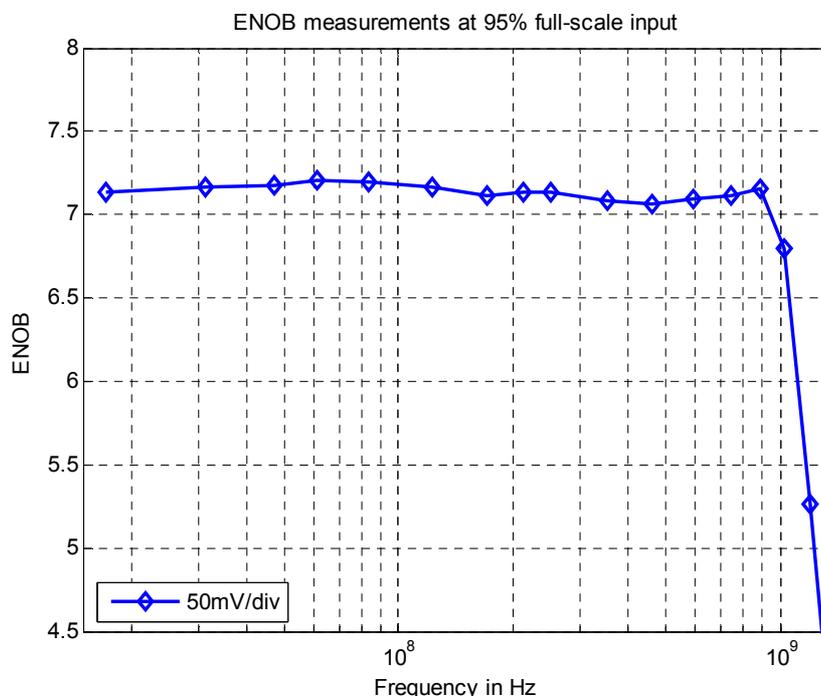


図9: R&S®RTO1012 の有効ビット数の結果 (1 GHz 帯域 2 チャンネル)

2.2.5 R&S®RTO 単体での評価

おおよその有効ビット数は、R&S®RTO の FFT 機能を使用することで簡単に求めることができます。

以下の例では、107 MHz のテスト周波数を使用し、サンプリング・レートは 10 G サンプル/秒、そしてレコード長は 10,000 サンプルとしています。

図 10 に示すスクリーン・ショットから、以下の情報が得られます:

- 画面上部の Diagram 1 は、入力信号を表示しています。
- 画面上の Measurement 1 は、入力信号が 95%フルスケールよりも、若干大きいことを示しています。この場合、フルスケールは 500 mV であり、フルスケールの 95% は 475 mV となります。
- 画面下部の Diagram 2 は、入力周波数範囲が 0 Hz から 5 GHz における FFT の結果を表示しています。
- Measurement 2 は、周波数範囲が 120 MHz から 5 GHz における信号のパワーを示しており、約 -45.4 dBm となっています。
- Measurement 3 は、周波数範囲が 90 MHz から 120 MHz における信号のパワーを示しており、約 -2.45 dBm となっています。

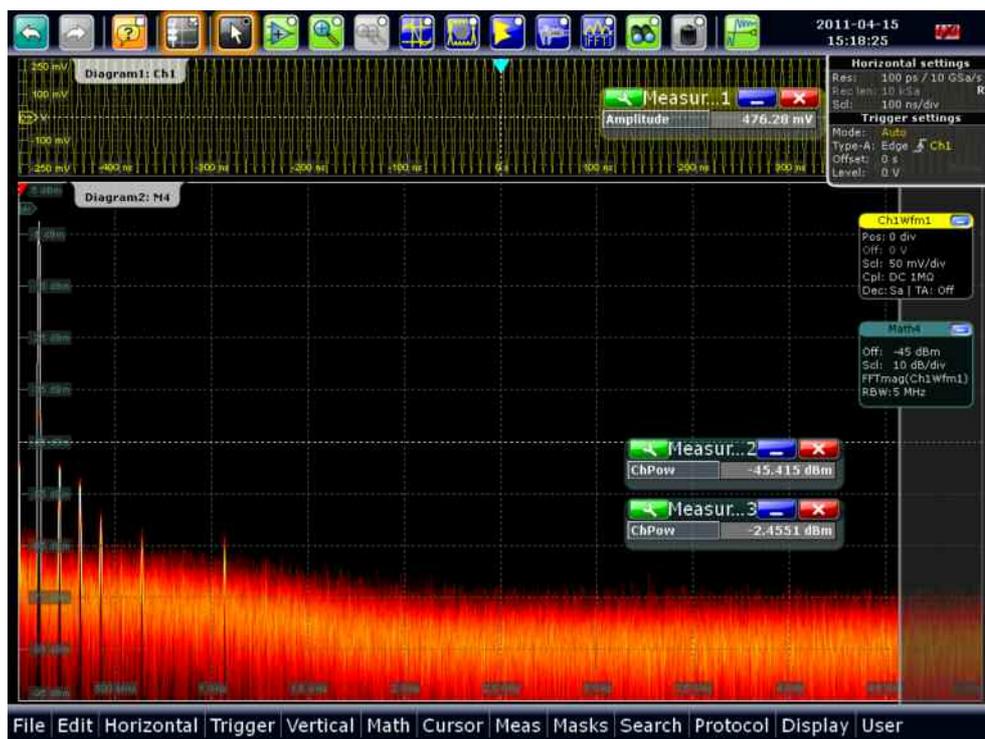


図 10: RTO から直接有効ビット数を測定したスクリーン・ショットの例

式 4 を用いると、以下のようになります。

$$\begin{aligned} \text{ENOB} &= 0.5 \log_2 \left(10^{\frac{-2.45 - (-45.4)}{10}} \right) - 0.5 \log_2(1.5) - \log_2(0.95) \\ &= 7.13 - 0.29 - (-0.074) \end{aligned}$$

結果として、有効ビット数は約 6.9 となります。

これらの結果は、MATLAB を使用した場合と一致しますが、以下のような理由から注意が必要です：

- 1つ目に、最も正確な有効ビット数の結果は、FFT 長がレコード長と全く等しい場合に得られます。この測定は MATLAB を使用することで非常に簡単に行えます。測定結果は、R&S®RTO から直接得られますが、上記の条件には当てはまりません。なぜなら、R&S®RTO に搭載されている FFT 機能は、測定スピードを優先して最適化されているため、FFT 長に対して任意にレコード長を決められないためです。これは、なぜ全周波数範囲にわたって測定された信号のパワーが、90 MHz から 120 MHz までの主要な信号範囲での値と一致するのか？の理由となります。
- 2つ目に、すばやく結果を得ることが目的なので、DC から 90 MHz におけるノイズ・パワーの測定が欠落しています。この値を加えると、有効ビット数の測定結果は、若干悪くなります。

図 11 と 図 12 は、Measurements 2 および 3 のパワー測定結果を得るためのセットアップ情報を示しています。



図 11: ノイズおよび歪パワーのゲート測定 (Measurement 2) のセットアップ・スクリーン情報

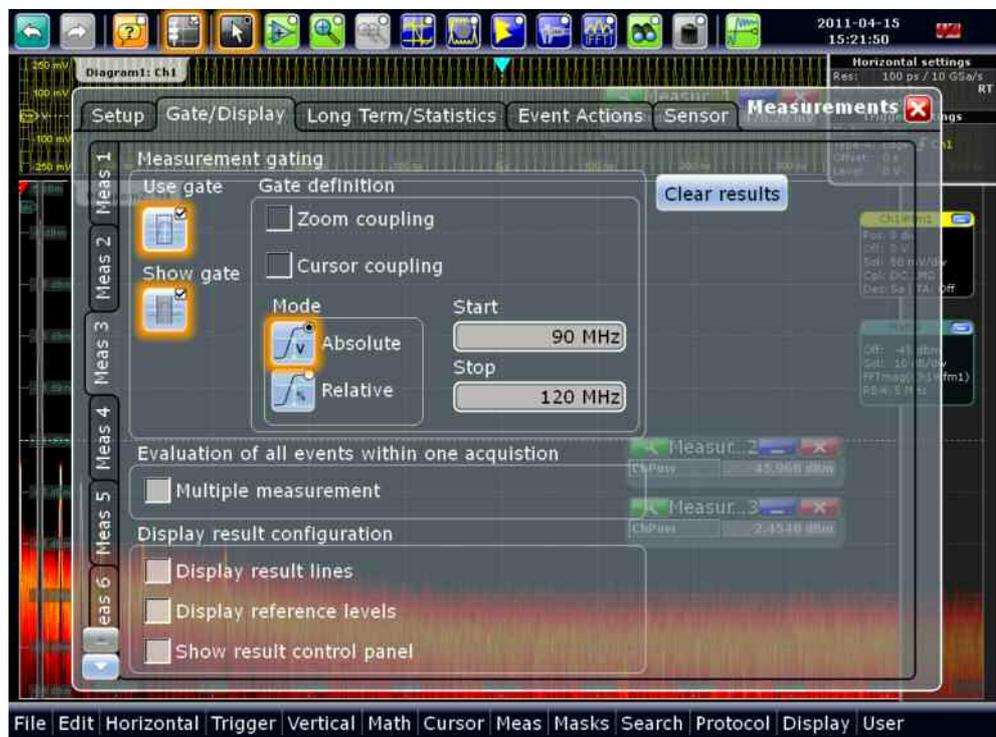


図 12: 信号パワーのゲート測定 (Measurement 3) のセットアップ・スクリーン情報

2.3 結果についての検討

今回の結果より、R&S[®]RTO1024 は 6.4 を超える有効ビット数を 2 GHz の測定帯域、全てにおいて実現しています。R&S[®]RTO1012 では、6.7 を超える有効ビット数を 1 GHz の測定帯域、全てにおいて実現しております。また、900 MHz 帯域まででは、7.1 の有効ビット数を達成しています。これらの実験は、以下に述べるような興味深い結果をもたらします。

2.3.1 400 MHz から 1 GHz の間で発生する有効ビット数のくぼみの原因は？

上図に示した各測定においては、400 MHz と 1 GHz の間において、有効ビット数の値にくぼみが生じています。この理由は、VGA 製品が強い高調波を入力周波数に対して重畳させているためです。有効ビット数は、1 GHz を超えると再び改善されます。これは、高調波が R&S[®]RTO の入力部に搭載されているローパス・フィルタにより減衰させられているためです。このため、有効ビット数が再び良くなるのです。

2.3.2 仕様化されている帯域外での有効ビット数はどうなるのか？

R&S[®]RTO1024 は 2 GHz まで、そして R&S[®]RTO1012 は 1 GHz まで仕様化されています。仕様化されている周波数を超えた入力信号は、入力部分にあるローパス・フィルタにより減衰されます。オシロスコープの表示において 95%フルスケールを実現するという事は、入力信号による VGA をオーバー・ロードさせるということになり、結果として特定の高調波成分が大きくなるため、有効ビット数が急激に減少します。

2.3.3 R&S[®]OCXO オプションは本当に必要なのですか？

より信頼性の高い結果を得るためには、R&S[®]OCXO オプションを使用して、外部リファレンスを使用する必要があります。しかしながら、図 6 (0.05 ビット差) に示すように、使用しない場合においてもある程度の良好な測定結果を得ることができます。

2.3.4 入力信号振幅による影響

図 5 に示すように、縦軸のスケール 500 mV/div. の方が 50 mV/div. と比較して 400 MHz と 1 GHz の間における有効ビット数のくぼみが小さくなります。これは、VGA は入力信号が大きい方が、振幅レベルが低いからです。これにより高調波が抑えられ、より高い有効ビット数が得られるのです。

2.3.5 有効ビット数 (ENOB) > 7 を実現した R&S[®]RTO1012!

図 9 に示すように、R&S[®]RTO1012 は、900 MHz までは有効ビット数として約 7.1 を実現しており、1 GHz 付近では 6.75 となっています。なぜ、R&S[®]RTO1024 よりも良いのでしょうか？ 両製品ともに 10 G サンプル/秒のサンプリング・レートですが、測定帯域が異なります。測定帯域が 1 GHz と狭いことによりノイズや高調波成分が少なくなるため、有効ビット数が向上するのです。

3 参考文献

[1] IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters, IEEE Standard 1241-2010

[2] R&S® RTO デジタル・オシロスコープ, プロダクト・ガイド

[3] R&S® RTO デジタル・オシロスコープ, リモート・コマンド・リファレンス

4 補足情報

このテクニカル・ペーパーは、予告なしに内容の見直し、および変更が行われます。最新の情報は、弊社ウェブサイトにてご確認ください。

<http://www.rohde-schwarz.co.jp>

5 オーダー情報

製品名	型番	オーダー番号
同梱製品 (500 MHz パッシブ・プローブ (10:1)がチャンネル分, アクセサリ・ポーチ, クイック・スタート・マニュアル, CD とマニュアル, 電源ケーブル)		
Digital Oscilloscopes		
1 GHz, 10 G サンプル/秒, 20/40 M メモリ, 2 チャンネル	R&S®RTO1012	1316.1000.12
1 GHz, 10 G サンプル/秒, 20/80 M メモリ, 2 チャンネル	R&S®RTO1014	1316.1000.14
2 GHz, 10 G サンプル/秒, 20/40 M メモリ, 2 チャンネル	R&S®RTO1022	1316.1000.22
2 GHz, 10 G サンプル/秒, 20/80 M メモリ, 2 チャンネル	R&S®RTO1024	1316.1000.24

詳細な製品情報に関しては、ローデ・シュワルツ・ジャパンにお問い合わせ下さい。

ローデ・シュワルツについて

Rohde & Schwarz グループ(本社:ドイツ・ミュンヘン)は、エレクトロニクス分野に特化し、電子計測、放送、無線通信の監視・探知および高品質な通信システムなどで世界をリードしています。創業 75 年、世界 70 カ国以上で販売と保守・修理を展開している会社です。

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社

本社/東京オフィス

〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-20-1

住友不動産西新宿ビル 27 階

TEL : 03-5925-1288/1287 FAX : 03-5925-1290/1285

神奈川オフィス

〒222-0033 神奈川県横浜市港北区

新横浜 2-13-13 KM 第一ビルディング 8 階

TEL : 045-477-3570 (代) FAX : 045-471-7678

大阪オフィス

〒564-0063 大阪府吹田市

江坂町 1-23-20 TEK 第 2 ビル 8 階

TEL : 06-6310-9651 (代) FAX : 06-6330-9651

サービスセンター

〒330-0075 埼玉県さいたま市浦和区

針ヶ谷 4-2-20 浦和テクノシティビル 3 階

TEL : 048-829-8061 (代) FAX : 048-822-3156

E-mail : info.rsjp@rohde-schwarz.com

URL: <http://www.rohde-schwarz.co.jp>

Certified Quality System
ISO 9001
DQS REG. NO 1954 QM

Certified Environmental System
ISO 14001
DQS REG. NO 1954 UM

R&S®は Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG の商標登録になります。

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

Mühlendorfstraße 15 | D - 81671 München

Phone + 49 89 4129 - 0 | Fax + 49 89 4129 - 13777

www.rohde-schwarz.com