

キーワード：ADC、デルタ・シグマ、ENOB、SNR、SINAD、THD、S/N比、信号／ノイズ＋歪み、全高調波歪み、有効ビット数、A/Dコンバータ

アプリケーション・ノート6854

ADCの動的性能を把握するために、 ENOBの値を算出する方法

概要

A/D コンバータの動的性能を表すためには、様々な指標が用いられます。代表的なものとしては、S/N比（SNR：Signal to Noise Ratio）、信号／ノイズ＋歪み（SINAD）、THD（全高調波歪み）、有効ビット数（ENOB）が挙げられます。これらのうち、ENOB の値は、SNR と THD の既知の値を使って計算することができます。

はじめに

ENOB は、ADC の動的性能を表す指標の 1 つです。本稿では、SNR、SINAD、THD の各指標と ENOB の関係について説明します。また、分解能が 24 ビットのデルタ・シグマ ADC [MAX11216] を具体例として取り上げ、ENOB の計算値と実測値を比較してみます。

各種の指標の関係

まずは、SNR、SINAD、THD、ENOB の関係について押さえておきましょう。それに向けて、以下では各指標について詳しく説明することにします。

SNR

ADC の動的性能を評価する際には、特定の周波数の信号（基本波）を対象として、ノイズや歪みとの関係を数値化します。SNR は、その基本波の出力レベル（ P_S ）とノイズの出力レベル（ P_N ）の比です。数学的には、以下の式（1）によって表されます。

$$\text{SNR} = 10\log(P_S/P_N) = 10\log P_S - 10\log P_N \quad (\text{式 1})$$

また、理想的な ADC を想定した場合、その SNR の理論値は分解能を使用することで表現できます。具体的には、 $\text{SNR} = (6.02 \times N + 1.76)$ [dB] という式が成り立ちます。但し、現実の ADC の SNR はこの式によって一律に決まるわけではありません。例えば、デルタ・シグマ ADC である MAX11216 は、

プログラマブルなデジタル・フィルタ（ローパス・フィルタ）を内蔵しています。このタイプの製品の場合、フィルタの特性を調整することで、SNR を高められます。具体的には、フィルタの帯域幅を狭くしてフィルタの減衰量を増大させると、SNR の値は向上します。なお、フィルタの帯域幅を広げてフィルタの減衰量を抑えると、データ・レートを上げられます。

図 1 に示したのは、MAX11216 から出力されるデジタル・データを高速フーリエ変換（FFT）によって処理した結果です。この例では、連続モードでの動作、sinc フィルタを使用、バッファを使用という条件で同 ADC を動作させています。上述したように、SNR は基本波の出力レベル（ P_S ）とノイズの出力レベル（ P_N ）の比として求められます。この例の場合、データ・レートが 8ksps という条件における SNR は 110.4dB となりました。なお、FFT は周波数解析を行うために用いられる手法です。A/D 変換によって得られたデータに対して FFT の処理を適用することで、基本波とその高調波に加え、非高調波のスプリアス、ノイズ成分の振幅を算出できます。

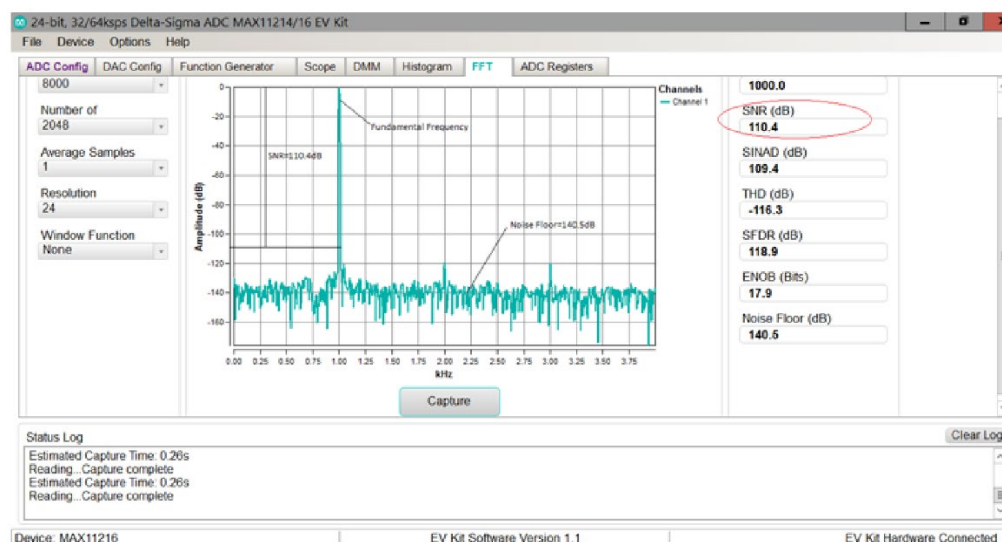


図 1. MAX11216 の出力の FFT 結果（その 1）。SNR は 110.4dB となっています。
サンプル・レートが 8ksps、 $f_{IN} = 1\text{kHz}$ 、 $V_{AVDD} = 3.6\text{V}$ 、 $V_{AVSS} = 0\text{V}$ 、 $V_{REF} = 3.6\text{V}$ 、 $T_A = 25^\circ\text{C}$ 、
外部クロックの周波数が 8.192MHz という条件で取得しました。

SINAD

SINAD は、基本波の出力レベル（ P_S ）と、ノイズと歪みの出力レベルを合算した値（ P_{N+D} ）の比です。数学的には以下の式で表されます。

$$\text{SINAD} = 10\log[P_S/(P_{N+D})] = 10\log P_S - 10\log P_{N+D} \quad (\text{式 2})$$

歪みには、高調波とそれ以外のスプリアスが含まれます。図 2 に示すように、MAX11216 の SINAD は、データ・レートが 8ksps という条件において 109.4dB となっています。なお、図 1 の場合と同じく、この結果は連続モード、sinc フィルタを使用、バッファを使用という条件で取得しました。

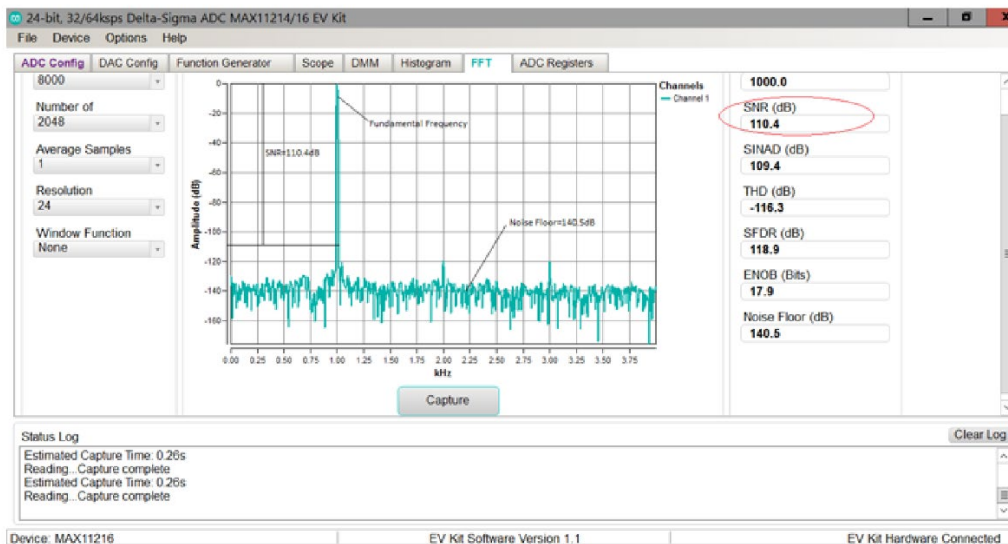


図 2. MAX11216 の出力の FFT 結果 (その 2)。SINAD の値は 109.4dB となっています。
 サンプル・レートが 8ksps、 $f_{IN} = 1\text{kHz}$ 、 $V_{AVDD} = 3.6\text{V}$ 、 $V_{AVSS} = 0\text{V}$ 、 $V_{REF} = 3.6\text{V}$ 、 $T_A = 25^\circ\text{C}$ 、
 外部クロックの周波数が 8.192MHz という条件で取得しました。

THD

THD は、基本波の出力レベルと、その高調波の出力レベルの合算値（ノイズを除く）の比です。一般的には、歪みの大部分は最初の 5 つの高調波成分によって占められます。そのため、以下に示すように、THD の計算には最初の 5 つの高調波成分だけを使用します。

$$\text{THD (dB)} = 10\log(P_5) - 10\log(P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \quad (\text{式 3})$$

ここで、 P_5 、 $P_2 \sim P_6$ の単位は mW です。

例えば、 $P_5 = P_1 = 1\text{mW}$ 、 $P_2 = 0.1\text{nW}$ 、 $P_3 = 0.01\text{nW}$ 、 $P_4 = 0.001\text{nW}$ 、 $P_5 = 0.0001\text{nW}$ 、 $P_6 = 0.00001\text{nW}$ である場合、THD の値は以下のように計算します。

$$\begin{aligned} \text{THD(dB)} &= 10\log(1) - 10\log[(0.1 + 0.01 + 0.001 + 0.0001 + 0.00001) \times 10^{-6}] \\ \text{THD(dB)} &= -69.5074\text{dB} \end{aligned}$$

仮に 6 次高調波 (P_6) の値が 0.00002nW であった場合、THD の値は -69.5070dB に増加します。ただ、その増分はごくわずかであることがわかります。

図 3 に示すように、基本波の周波数が 1kHz、サンプル・レートが 8ksps という条件において、MAX11216 の THD は -116.3dB となっています。なお、図 1、図 2 の場合と同じく、この結果は連続モード、sinc フィルタを使用、バッファを使用という条件で取得しました。



図 3. MAX11216 の出力の FFT 結果 (その 3)。THD の値は 116.3dB となっています。
 サンプル・レートが 8ksps、 $f_{IN} = 1\text{kHz}$ 、 $V_{AVDD} = 3.6\text{V}$ 、 $V_{AVSS} = 0\text{V}$ 、 $V_{REF} = 3.6\text{V}$ 、 $T_A = 25^\circ\text{C}$ 、
 外部クロックの周波数が 8.192MHz という条件で取得しました。

ENOB

ENOB は、ノイズと歪みの両方を考慮に入れた事実上の分解能に相当します。数学的には以下の式で表されます。

$$\text{ENOB} = (\text{SINAD} - 1.76)/6.02 \quad (\text{式 4})$$

ENOB を SNR と THD で表したい場合、以下の手順に従って計算を行います。

1. 以下のように式 (1) と式 (2) を使用することで、式 (5) を導出します。

$$\text{SINAD} = 10\log[P_S/(P_{N+D})] = 10\log P_S - 10\log P_{N+D}$$

$$\text{SNR} = 10\log (P_S/P_N)$$

$$\log (P_S/P_N) = \text{SNR}/10$$

$$P_S/P_N = 10^{\text{SNR}/10}$$

$$P_N/P_S = 10^{-\text{SNR}/10}$$

(式 5)

2. 式 (5) は、以下のように表すこともできます。

$$P_D/P_S = 10^{-\text{THD}/10}$$

(式 6)

3. 式 (5) と式 (6) を加算すると、以下の式 (7) が得られます。

$$(P_N + P_D)/P_S = 10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10}$$

$$P_S/(P_N + P_D) = 1/(10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10}) = (10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10})^{-1} \quad (\text{式 7})$$

4. 式 (7) を式 (2) に代入すると、式 (8) が得られます。

$$SINAD = 10\log(10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10})^{-1}$$

$$= -10\log(10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10}) \quad (\text{式 8})$$

5. 最後に式 (8) を式 (4) に代入すると、次のように SNR と THD で ENOB を表すことができます。

$$ENOB = \{[-10\log(10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10})] - 1.76\}/6.02 \quad (\text{式 9})$$

MAX11216 の ENOB

表 1 は、MAX11216 の SNR のシミュレーション結果をまとめたものです。各シミュレーションは、データ・レートと PGA のゲインを変更して実施しました。また、デジタル・フィルタは sinc フィルタとして構成しています。それ以外の条件は、 $V_{IN} = 0V$ 、 $V_{AVDD} = 3.6V$ 、 $V_{AVSS} = 0V$ 、 $V_{REF} = 3.6V$ 、 $T_A = 25^\circ C$ です。

表 1. MAX11216 の SNR (dB) のシミュレーション結果。各シミュレーションは、データ・レートと PGA のゲインを変更し、連続モード、sinc フィルタを使用という条件で実施しました。

データ・レート [sps]	バッファ	ゲイン：1 低ノイズ	ゲイン：8 低ノイズ	ゲイン：128 低ノイズ
1.9	139.8	136.5	140.5	128
3.9	139.4	135.3	139.2	125.4
7.8	139.2	134.7	137.9	122.5
31.2	135.8	132.1	134.3	116.5
62.5	133.8	129.4	131.5	114
500	125.8	121.2	123.3	104.8
1000	123.1	118.5	120.4	101.8
4000	117.7	113.1	115.1	96.5
16000	114.6	109.9	112	93.4
64000	107.8	103.2	105.8	88.2

表 2 は、ENOB の値についてまとめたものです。各値は、SNR の値を使用し、式 (9) によって算出しました。その際、THD の値は 120dB としています。これは、MAX11216 のデータシートで THD の

代表値として記されている値です。それ以外の条件は、 $V_{IN} = 0V$ 、 $V_{AVDD} = 3.6V$ 、 $V_{AVSS} = 0V$ 、 $V_{REF} = 3.6V$ 、 $T_A = 25^{\circ}C$ です。

表 2. MAX11216 の ENOB (ビット) の計算結果。各計算は、データ・レートと PGA のゲインを変更し、連続モード、sinc フィルタを使用という条件で実施しました。

データ・レート [sps]	バッファ	ENOB		
		ゲイン：1 低ノイズ	ゲイン：8 低ノイズ	ゲイン：128 低ノイズ
1.9	19.6336811	19.62522357	19.63479484	19.53506307
3.9	19.6329602	19.62021353	19.63257437	19.45838575
7.8	19.63257437	19.61715616	19.62958982	19.3193091
31.2	19.62246601	19.59803115	19.61487866	18.79339941
62.5	19.6117322	19.56278581	19.59185023	18.4828525
500	19.4727366	19.23395095	19.3643726	17.09481505
1000	19.35361828	19.00585701	19.17360407	16.60710288
4000	18.92511435	18.36098144	18.62499223	15.73432624
16000	18.56137578	17.89619095	18.20615941	15.22101479
64000	17.57240744	16.83558105	17.25547296	14.35832751

表 3 は、ENOB の実測結果をまとめたものです。

表 3. MAX11216 の ENOB (ビット) の実測結果。各測定は、データ・レートと PGA のゲインを変更し、連続モード、sinc フィルタを使用という条件で実施しました。

データ・レート [sps]	バッファ	ENOB		
		ゲイン：1 低ノイズ	ゲイン：8 低ノイズ	ゲイン：128 低ノイズ
1.9	24.6	25.2	24.8	24.5
3.9	23.4	24.7	23.9	24.4
7.8	23.6	23.4	23.3	23.1
31.2	22.3	22.3	22.1	22
62.5	21.6	21.7	21.5	21.4
500	20.2	20.1	20.2	20
1000	19.7	19.6	19.5	19.3
4000	18.8	18.8	18.7	18.5
16000	18.3	18.8	18.5	18.6
64000	17.2	17.3	17.3	17.3

図 4、図 5、図 6、図 7 は、ENOB の実測値と計算値を比較したものです。それぞれ、バッファを使用、ゲインが 1、ゲインが 8、ゲインが 128 の場合に対応しています。

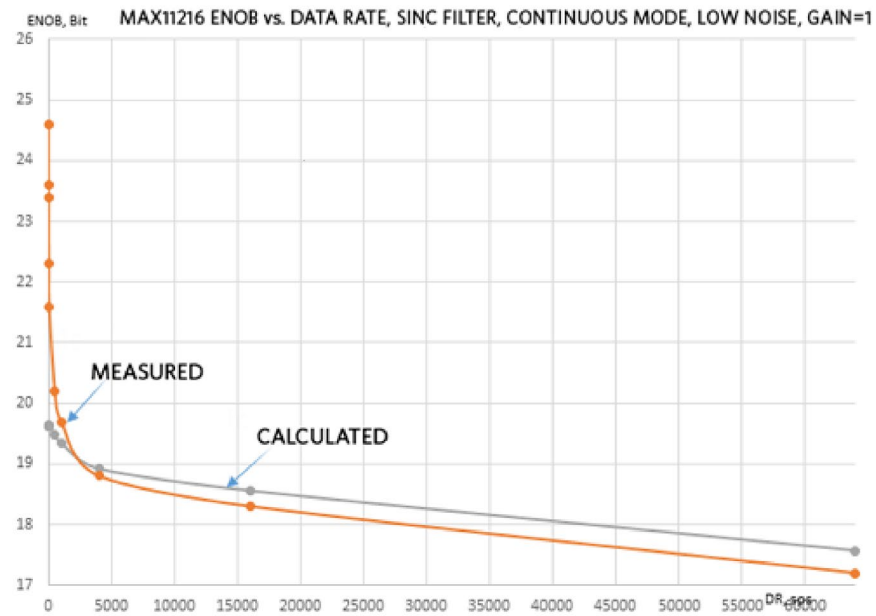


図 4. MAX11216 の ENOB の実測値と計算値 (その 1)。バッファを使用した場合の結果です。連続モード、sinc フィルタを使用という条件で比較しています。

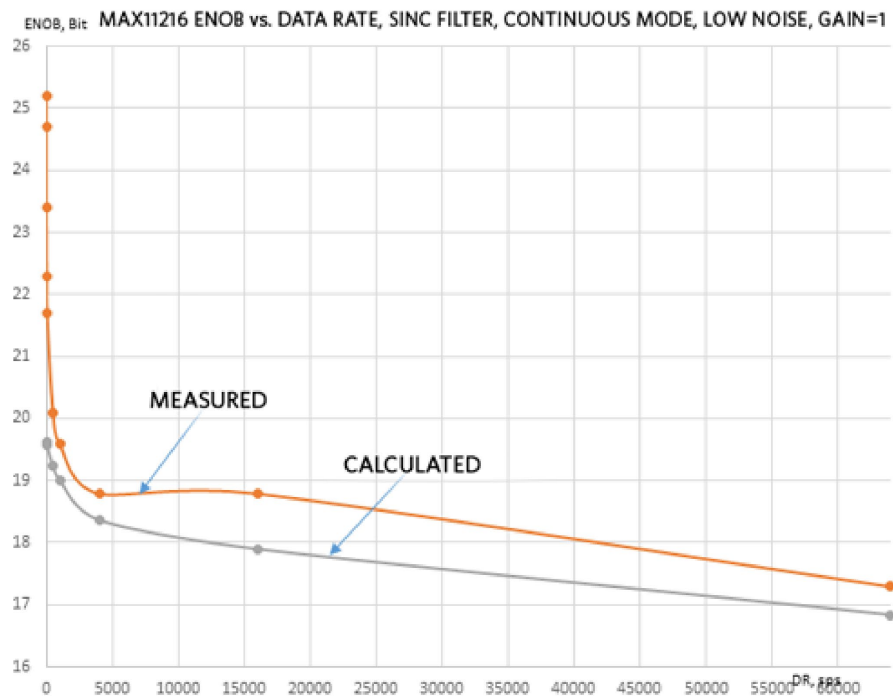


図 5. MAX11216 の ENOB の実測値と計算値 (その 2)。ゲインが 1 の場合の結果です。連続モード、sinc フィルタを使用という条件で比較しています。

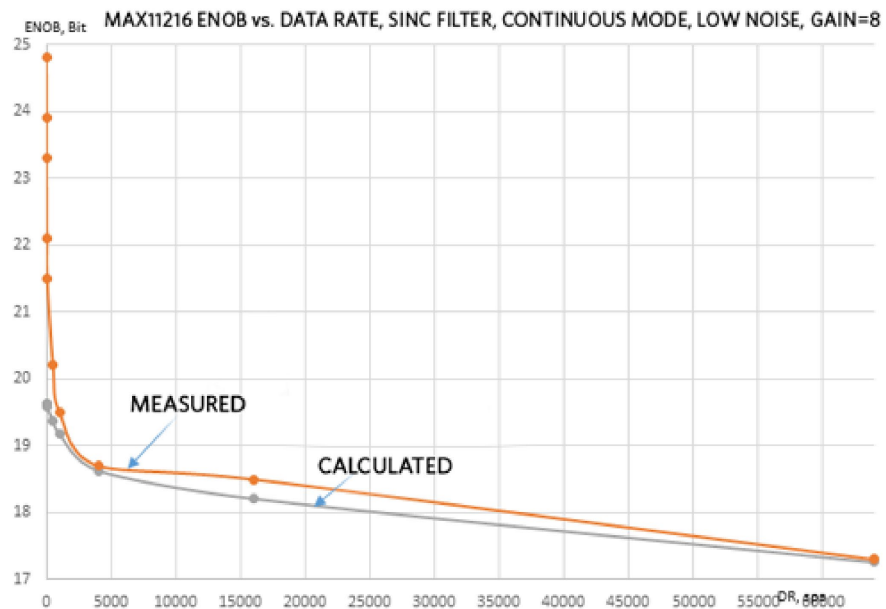


図 6. MAX11216 の ENOB の実測値と計算値（その 3）。ゲインが 8 の場合の結果です。
連続モード、sinc フィルタを使用という条件で比較しています。

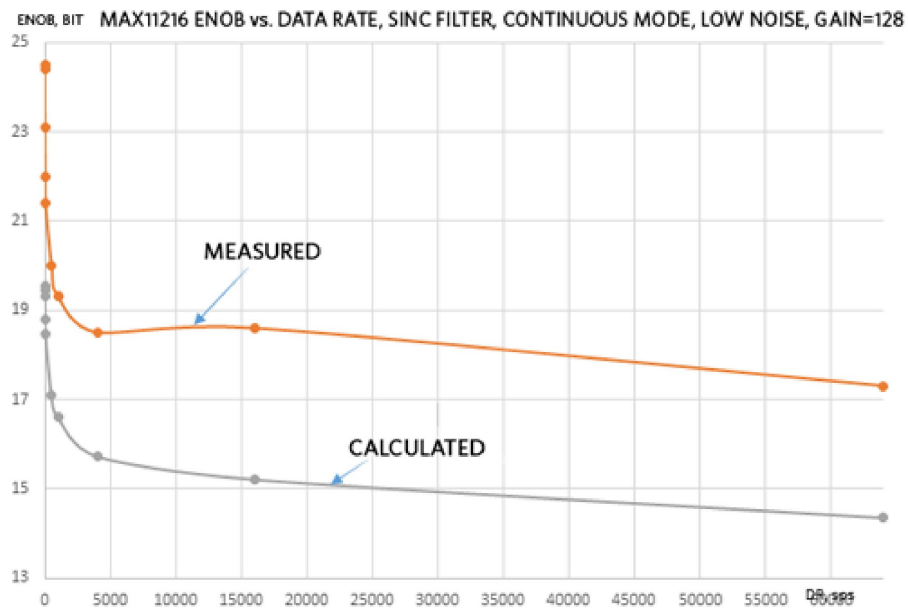


図 7. MAX11216 の ENOB の実測値と計算値（その 4）。ゲインが 128 の場合の結果です。
連続モード、sinc フィルタを使用という条件で比較しています。

図 8 は、ENOB の実測値とデータ・レートとの関係を示したものです。バッファを使用、ゲインが 1、ゲインが 8、ゲインが 128 の場合の結果を比較しています。

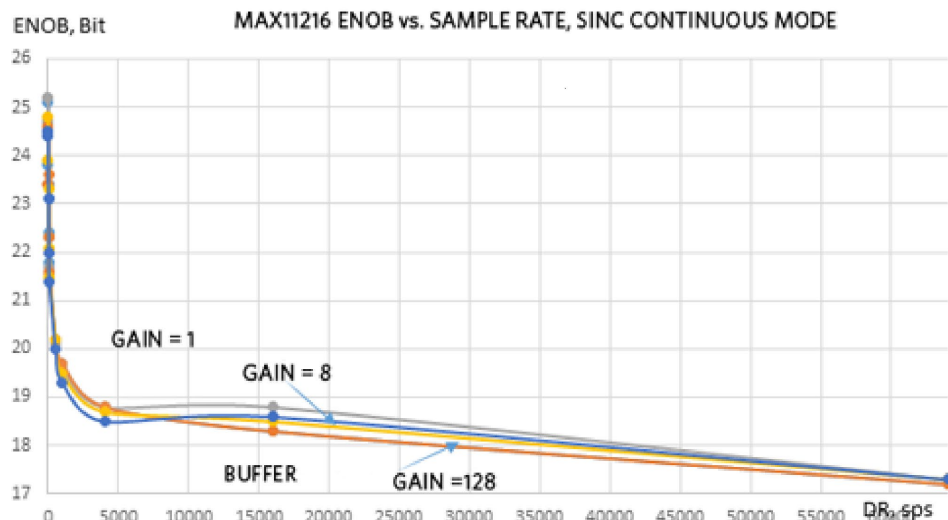


図 8. MAX11216 の ENOB の実測値とデータ・レートとの関係。
バッファを使用、ゲインが 1、ゲインが 8、ゲインが 128 の場合の結果を比較しています。

まとめ

SNR、SINAD、THD、ENOB は、ADC の動的性能を表す一般的な指標です。ENOB の値は、SNR と THD の値を使用することで、正確かつ簡単に計算できます。本稿では、MAX11216 の ENOB の値を実測し、その結果が理論式に基づく ENOB の計算値とほぼ一致することを確認しました。また、プログラマブルなデジタル・フィルタを内蔵するデルタ・シグマ ADC では、フィルタの減衰量を増大させると SNR と ENOB が向上します。そのことも、本稿で示した実測結果から確認できました。

関連製品

MAX11216 PGA内蔵、24ビット、10mW、140dB SN比、64ksps デルタシグマADC

[サンプル](#)

詳細については、以下をご覧ください。

技術サポートに関するお問い合わせ：<https://www.analog.com/jp/support.html>

サンプルのご依頼：<https://www.analog.com/jp/support/sample-products.html>

その他のご質問やご意見：<https://www.analog.com/jp/contact-us.html>

アプリケーション・ノート 6854：<https://www.analog.com/jp/resources/technical-articles/how-to-calculate-enob-for-adc-dynamic-performance-measurement.html>

アプリケーション・ノート 6854, AN6854, AN 6854, APP6854, Appnote6854, Appnote 6854

© 2019 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

本ウェブページに掲載されているコンテンツは、米国およびその他の国の著作権法によって保護されています。

このコンテンツのコピーをご希望される方は、[弊社まで](#)お問い合わせください

その他の法的注意事項：<https://www.analog.com/jp/who-we-are/legal-and-risk-oversight.html>