

## アナログ・デバイセズの AD7380 SAR ADC ファミリにおける オンチップ・オーバーサンプリング

著者：Jonathan Colao

### はじめに

このアプリケーション・ノートでは、逐次比較型 (SAR) A/D コンバータ (ADC) でのオンチップ・オーバーサンプリングについて説明します。オーバーサンプリング技術には、一般的に相加平均と移動平均の 2 つがあります。これらの技術は、AD7380/AD7381 やその高スループット・レート SAR ADC ファミリの内部で実行されます。その結果、平均した変換データが直接利用でき、デジタル・コントローラの負担が軽減されるため、データ・アキュイジション・システムにとって利点となります。

高精度のデータ・アキュイジション・システムでは、S/N 比と有効ビット数 (ENOB) が高ければ高いほど、広帯域ノイズのある中でシステムが信号電力を測定する場合に有利になります。

ノイズが原因でシステム性能が低下する可能性もあります。ノイズを低減するには、システムを  $\Sigma\Delta$  ADC や SAR ADC などの高分解能の ADC に置き換える方法や、オーバーサンプリングしてデジタル・フィルタリング技術を使用する方法などがあります。

オーバーサンプリング技術は、 $\Sigma\Delta$  ADC アーキテクチャ設計の中で使用されてきた歴史があります。 $\Sigma\Delta$  ADC は、 $\Sigma$ 変調器と、後段のデジタル信号処理部、つまりデジタル・フィルタから構成されています。 $\Sigma$ 変調器は 1 ビット量子化器と同じくらいに小型化が可能で、何千ものサンプルを集め、それらのサンプルをデシメートして高分解能の変換値を得ることができます。平均するサンプル数が多ければ多いほど、ますます分解能が上がります。変換がサンプル値に近づきます。一般的な  $\Sigma\Delta$  アプリケーションとしては、温度監視システムや重量測定システムがあります。

$\Sigma\Delta$  ADC アーキテクチャは、対象となる帯域幅よりも非常に高いレートで小さな電荷量をサンプリングすることに基づいています。サンプルを多く取れば取るほど、バイト数は小さくなります。代表的な  $\Sigma\Delta$  ADC のオーバーサンプリング範囲は、 $32 \times$  最大  $1000 \times$  対象となる信号の間になります。オーバーサンプリングをノイズ・シェーピング (変調方式) と組み合わせると、

結果的にインバンド・ノイズを対象となる帯域から移動させることができます。その後、より高い帯域に移動したノイズは、デジタル・フィルタリングによって取り除かれます。この結果、対象となる帯域ではノイズが低減し、分解能が向上します。サンプル値は小さいものの、サンプリングが頻繁に行われるため、 $\Sigma\Delta$  ADC から各変換値が出力されます。

SAR ADC は、逐次比較を使用して値を算出しています。SAR ADC はサンプリングした 1 つの瞬時値をデジタル表現にする場合に、段階的なアプローチを使用して、各ビットがどの値になるかを確定します。SAR は、電荷再配分式コンデンサと D/A コンバータ (DAC) アレイを使用しています。サンプリングされたデータは、バイナリの重み付けされたキャパシタ・アレイのそれぞれの値と比較されます。バイナリの重み付けされたキャパシタの総数が SAR ADC のビット数、つまり分解能を決定します。変換処理は内部の高速クロックと容量性の DAC アレイによって制御され、変化している信号を高速に変換することができます。SAR ADC は、広い帯域幅が要求されるデータ・アキュイジション・システムで使用されています。

SAR ADC は、一般に 1 つの標本を時間内に変換し、特定の時点に関わるデジタルの答えを出します。高速の SAR コンバータの出現に伴って、対象となる主要な帯域の分解能を向上させるために、オーバーサンプリングの使用が増加しています。今日、SAR ADC ではオーバーサンプリング技術がよく使用されていますが、この技術はマイクロコントローラやフィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ (FPGA) での後処理で用いられます。アナログ・デバイセズは、SAR ADC のシリーズにオーバーサンプリング機能を内蔵して提供しています。このオーバーサンプリング機能は、ノイズ性能を向上させ、インターフェース条件を簡素化し、しかも FPGA やマイクロコントローラに関して設計する必要や、資源を多く使用する平均化を行う必要もないため、すぐに使用することができます。また、オーバーサンプリング機能は、処理しやすいデータ・レートでデータ処理性能を最大限に向上させます。

表 1. アナログ・デバイセズのデュアル同時サンプリング SAR ADC ファミリ

Input Type	16-Bit	14-Bit	12-Bit
Differential	AD7380	AD7381	
Single-Ended	AD7386	AD7387	AD7388

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。※日本語版資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

## 目次

はじめに.....	1	ノイズの改善.....	7
改訂履歴.....	2	分解能の向上 (N) .....	8
オーバーサンプリング.....	3	分解能の増強.....	8
相加平均オーバーサンプリング.....	3	アプリケーション例.....	9
移動平均オーバーサンプリング.....	5	まとめ.....	10
オーバーサンプリングの利点.....	7		

## 改訂履歴

6/2020—Revision 0: Initial Version

## オーバーサンプリング

A/D 変換中、アナログ信号は ADC によってデジタル化されます。オーバーサンプリングとは、オーバーサンプリングではないソリューションと比較して、必要とするレートよりもはるかに高いレートでアナログ信号をサンプリングし、この信号をデジタルに変換することにより、デジタル化された信号の有効な分解能を上げるために適用される技術のことです。オーバーサンプリングを行うと、より広い帯域幅にわたりコンバータのノイズを平均化することができます。特定の帯域幅に対して平均化やフィルタリングが行われた場合、ノイズが無相関の広帯域（ホワイト）ノイズであって、平均値がゼロ（0）であれば、ノイズは 2 倍のオーバーサンプリングごとに  $\sqrt{2}$ 、つまり 3dB の割合で改善されます。一方、相関ノイズや高調波などの他のスペクトル成分は、平均化しても低減されません。図 1 に、ADC のノイズ・レベル（濃い灰色）を示します。このノイズは、量子化ノイズ源、熱ノイズ源、およびナイキスト帯域幅にわたって広がるドライバ、クロック、電圧リファレンスなどの外部ノイズ源が合成されたものに由来します。

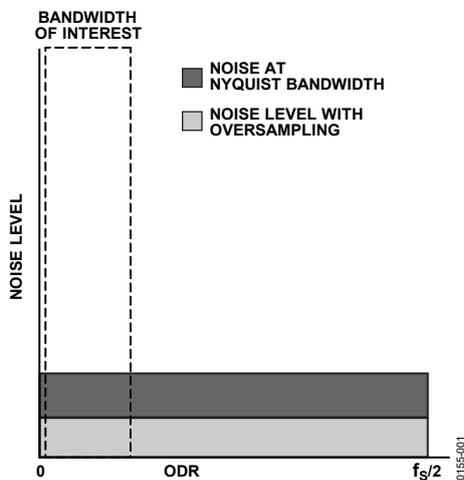


図 1. 平均化され、フィルタリングされたノイズ

ナイキスト理論 ( $f_{\text{SAMPLING}} \geq (2 \times f_{\text{IN}})$ ) によると、信号を正確に復元するためには、入力信号を対象となる最高周波数の 2 倍以上のレートでサンプリングする必要があり、またオーバーサンプリングをする場合も同じ基準が存在します。オーバーサンプリングによって信号のノイズが低減し、システムの S/N 比が向上し、その結果、分解能が向上します（大きな歪み成分がないと仮定した場合）。

オーバーサンプリングは、複数のサンプルを集めて平均するというデジタル信号処理の技術です。データ・サンプルの平均化は、ローパス・フィルタのような作用をします。

アナログ・デバイセズの AD7380 ファミリーは、同時サンプリング SAR ADC ファミリーであり、オンチップ・オーバーサンプリングが可能です。この SAR ADC シリーズは、相加平均と移動平均の 2 つのオーバーサンプリング技術を実行することができます。

## 相加平均オーバーサンプリング

相加平均オーバーサンプリングにおいて、平均化アルゴリズムは、M 個のサンプルを合計し、この合計を同じ係数 M で割ることによって単純平均を算出します。この方法では、M 個のサンプルの組が新たに集められて各平均値が求められます。

表 2 に、アルゴリズムの機能の仕組みを一般化して示したものです。この例でのデータ数は 12 サンプルです。平均するサンプル数が 2 ( $M = 2$ ) の場合、新たな出力が 2 サンプルごとに行われるため、有効なサンプリング・レートは 2 分の 1 になります。この出力値は、サンプル 1 とサンプル 2 の平均値、サンプル 3 とサンプル 4 の平均値などとなっていきます。

表 2. 相加平均の例

Sample Number	Sample Result	Averaged Result	
		M = 2	M = 4
1	0.200	0.2500	0.2400
2	0.300		
3	0.230	0.2350	
4	0.240		
5	0.260	0.2300	0.2500
6	0.200		
7	0.240	0.2700	
8	0.300		
9	0.270	0.2600	0.2450
10	0.240		
11	0.250	0.2300	
12	0.210		

同様に、平均化係数  $M = 4$  を適用すると、最初の 4 サンプルの組が平均され、続いて次の 4 サンプルの組（サンプル 5～サンプル 8）が平均されます。簡略化した相加平均の式を以下に示します。

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_i$$

ここで、

$\bar{x}$  は、M サンプルの平均値、  
M は、平均するサンプル数、  
 $S_i$  は、n 番目にサンプルされた値です。

AD7380 SAR ADC ファミリーでは、相加平均オーバーサンプリングはチップ内で実行され、平均するサンプルを最大で 32 個集めることができます。この手法がイネーブルされている限り、AD7380 は自動的に M 個の変換サンプルを集め、平均した変換値をクロックに同期して出力します。変換値をどれだけ利用できるかは、集められたサンプル数 M によって決まり、この値は、AD7380 ファミリーの CONFIGURATION1 レジスタ内の OSR ビットのオーバーサンプリング比によって設定されます。M サンプルの変換が完了すると、値が読み出されます。

図 2 に、AD7380 がどのようにアルゴリズム実行するかを示します。この例では、 $M = 8$ 、つまりオーバーサンプリング比 (OSR) を 8 と仮定し、8 サンプルを集めて平均しています。変換が内部で始まると、AD7380 は要求されたサンプル数 ( $M$ ) が完了するまで、一連の変換処理と取得処理を実行します。その後、取得したデータの平均化処理を実行します。その結果、図 2 に示すように、若干の処理遅延が発生し、 $T1$  で平均値が有効になり、クロックに同期して SDOx ピンから出力されます。この時点で

新たな平均化演算が始まり、次の  $M$  サンプルを取得するための新たな一連の変換が行われます。図 2 に、この技術を適用したことにより、サンプリング・システムの有効な出力データ・レート (ODR) が低下している様子を示します。ODR の低下は、サンプル数 ( $M$ )、つまり増加した OSR に反比例します。相加平均オーバーサンプリング方式は、最適な性能を必要としつつも ODR の低下は許容できるようなアプリケーションに適しています。

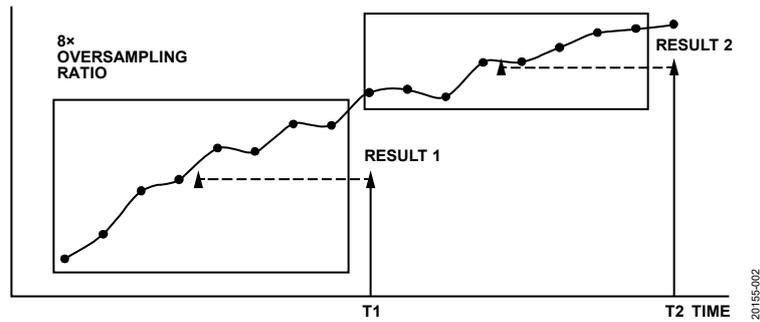


図 2. 相加平均オーバーサンプリングの演算



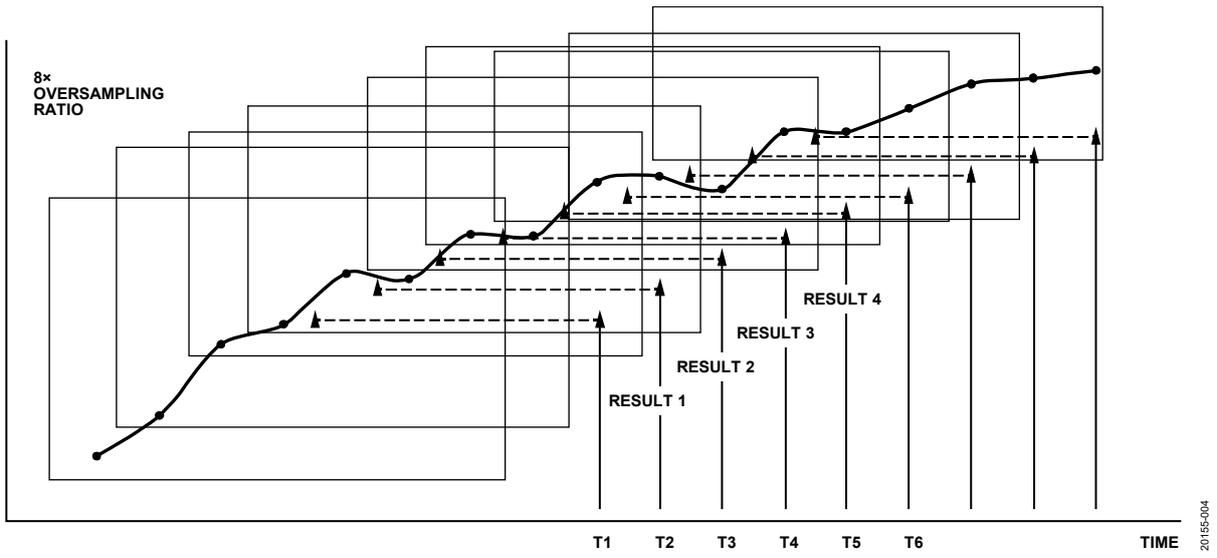


図 4. 移動平均オーバーサンプリングの演算

## オーバーサンプリングの利点 ノイズの改善

ADC は、オーバーサンプリングを使用してダイナミック・レンジを拡大することができます。オーバーサンプリングは、ノイズ源が無相関で平均値がゼロであると仮定することによって機能します。なぜなら、サンプリングによって、スペクトル全体にわたって一様に分布するホワイト・ノイズ、または隣接するコードを中心とするガウス・ノイズ分布が、平均化によって低減できる信号とみなせるためです。

図 5 は、AD7380 を使用して、オーバーサンプリングをしていない場合と、OSR=8 で移動平均オーバーサンプリングを適用した場合に描かれた、高速フーリエ変換 (FFT) のグラフの例です。

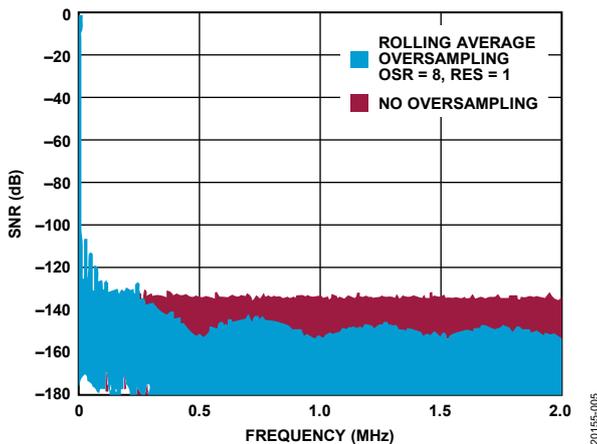


図 5. AD7380 を使用したノイズの改善

S/N 比の増加に対応して、ノイズ・フロアが大幅に改善している様子を確認してください (図 6 を参照)。この例では、S/N 比が相加平均オーバーサンプリングした場合に 96dB に向上し、移動平均オーバーサンプリングした場合に 95dB に向上しています。

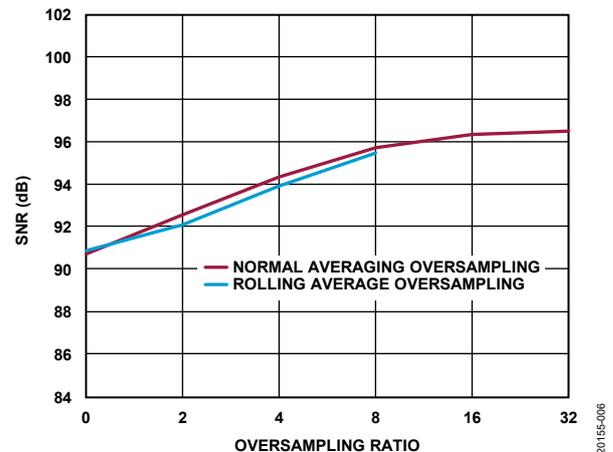


図 6. AD7380 における S/N 比とオーバーサンプリング比の関係  
オーバーサンプリング技術を適用した場合に S/N 比の向上を推定するには、次式を使用します。

$$\text{S/N 比} = 6.02N + 1.76 + 10\log (f_s / (2 \times BW))$$

ここで、

$N$  は、ADC の分解能、

$f_s$  は、サンプリング周波数、

$BW$  は、対象となる帯域幅、

$10\log (f_s / (2 \times BW))$  は、処理利得、

$f_s / (2 \times BW)$  は、サンプリング比、つまりナイキスト比です。

$2 \times BW$  以上をサンプリングするオーバーサンプリング処理を追加したことを考慮して、処理利得が含まれていることに注意してください。次式において、係数  $k$  を用いてサンプリング周波数を上げると、S/N 比が上がります。ここで、 $k$  は平均するサンプル数、つまりオーバーサンプリング比です。

$$\text{オーバーサンプリング} = k \times (f_s / (2 \times BW))$$

理論上は、 $k$  の値を 2 倍にすると、S/N 比が 3dB 上がります。

様々なオーバーサンプリング比での代表的な相加平均オーバーサンプリングと移動平均オーバーサンプリングが S/N 比に及ぼす影響を表 3 と表 4 に列挙します。オーバーサンプリング比が上がると、S/N 比も増加しています。

表 3. 相加平均オーバーサンプリングをした場合の AD7380 の代表的な S/N 比性能

Oversampling Ratio	SNR (dB)		Output Data Rate (kSPS)
	Reference Voltage ( $V_{REF}$ ) = 2.5 V	$V_{REF}$ = 3.3 V	
Disabled	90.8	92.5	4000
2×	92.6	94	1500
4×	94.3	95.4	750
8×	95.8	96.3	375
16×	96.3	96.8	187.5
32×	96.5	97	93.75

表 4. 移動平均オーバーサンプリングをした場合の AD7380 の代表的な S/N 比性能

Oversampling Ratio	SNR (dB)	Output Data Rate (kSPS)
Disabled	90.3	4000
2×	91.7	4000
4×	93.37	4000
8×	94.66	4000

AD7380 ファミリー製品ではどちらの平均化技術も利用できます。どちらも様々なアプリケーションに適していますが、それぞれの技術には、特定のアプリケーションに対して考慮しなければならない独自の特性があります。相加平均オーバーサンプリング技術には、以下のような特徴があります。

- この技術は平均するデータを追加してサンプリングするため、最適な性能を発揮します。
- サンプル数、つまり OSR が増加するため ODR は低下し、アプリケーションは低い SCLK 周波数を使用できるようになるため、全体のコストは低くなります。
- 信号帯域幅は、変換レートよりも大幅に低下します (図 7 を参照)。帯域幅の制限は、実効的なローパス・フィルタに原因があることに注意してください。

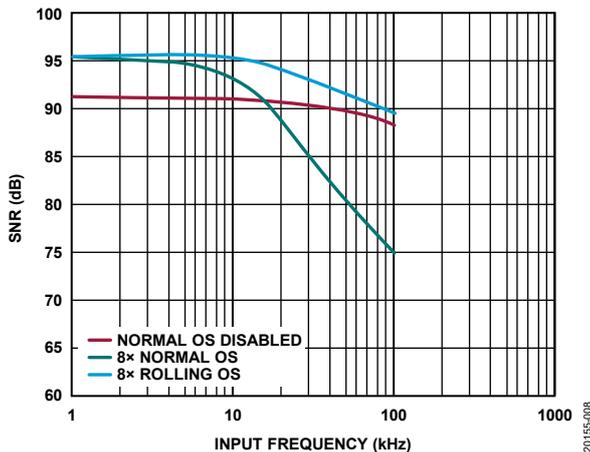


図 7. S/N 比と入力周波数の関係、オーバーサンプリングの周波数応答

移動平均オーバーサンプリング技術には、以下のような特徴があります。

- サンプリング・レートは可変で、 $\overline{CS}$  ピンを介してアプリケーションから制御できます。
- 最大 4MSPS の高速なサンプリングが可能です。
- バッファの制約のため、平均するサンプル数が 8 に制限されます。
- 広い信号帯域幅を確保できます (図 7 を参照)。

## 分解能の向上 (N)

前述したように、どちらのオーバーサンプリング技術でも性能が大幅に向上しました。次式によれば、S/N 比は ADC の分解能 N に対して制限されています。

N を計算するには、次式を使用します。

$$N = \frac{SNR - 1.76}{6.02}$$

理想的な 16 ビット ADC であると仮定して S/N 比を計算すると、S/N 比の最大値は 98dB になります。

$$16 = \frac{SNR - 1.76}{6.02}$$

$$S/N \text{ 比} = 98.08 \text{ dB}$$

向上できる S/N 比の最大値は、ADC のビット数によって制限を受け、図 6 に示すように、8 より大きいオーバーサンプリング比を用いても、S/N 比性能が向上することはほとんど、もしくはまったくありません。オーバーサンプリングの利点を活用するには、分解能 N を大きくする必要がありますが、これが AD7380 に搭載された分解能増大機能の重要な役割です。

## 分解能の増強

AD7380 ファミリーは制限事項がある場合でも、分解能を実効的に増強することにより、オーバーサンプリングによって達成可能な S/N 比を拡大することができます。オンチップの分解能増強をイネーブルするには、CONFIGURATION1 レジスタの RES ビット (ビット 2) にロジック 1 を書き込みます。

オーバーサンプリングによって S/N 比がどのくらい向上できるかを把握するために、前述の式を使用して 17 ビット ADC の S/N 比を計算します。その結果、S/N 比は 104.1dB となります。

この値を S/N 比の式に代入すると、分解能を 1 ビット上げるために必要なオーバーサンプリング係数 k が得られます。

$$S/N \text{ 比} = 6.02N + 1.76 + 10 \log (f_s / (2 \times BW))$$

$$104.1 = 6.02(16) + 1.76 + 10 \log (f_s / (2 \times BW))$$

$$(f_s / (2 \times BW)) = 4$$

分解能を 1 ビット上げるためには、ADC のオーバーサンプリング比を 4 以上にする必要があります。分解能を上げるために必要なオーバーサンプリング係数は、次式のようにまとめられます。

$$\text{オーバーサンプリング} = 4^x \times (f_s / (2 \times BW))$$

ここで、x は追加する分解能です。

表 5 に、様々なオーバーサンプリング比に対する分解能の増加をまとめています。

表 5. 様々なオーバーサンプリング比に対する分解能の増加

Oversampling Ratio	Number of Bits Increased
2×	0.5
4×	1
8×	1.5
16×	2
32×	2.5

図 8 に、分解能増強がイネーブルされている場合の AD7380 の S/N 比性能を示します。100dB 以上の S/N 比性能が得られています。2 ビットの分解能増強を追加したことにより、量子化ノイズが改善され、S/N 比が上がっています。分解能の増強は、高いコストをかけずに 2 ビットの分解能を追加して、システムのダイナミック・レンジを拡大する方法です。この機能の弱点は、平均した変換値をクロックに同期して出力する際に、2 クロック・サイクル分のシリアル・ポート・インターフェース (SPI) SCLK を追加する必要があります。

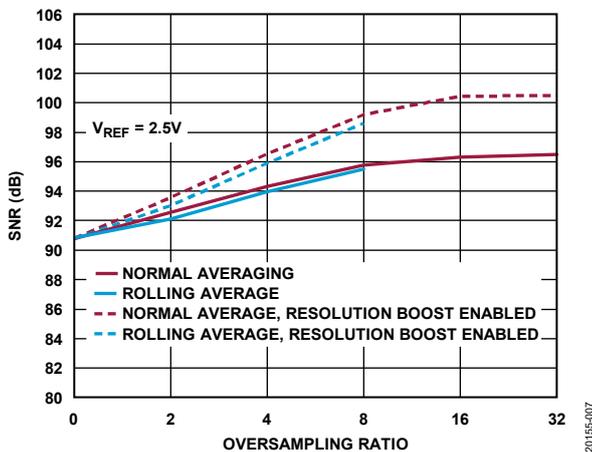


図 8. AD7380 の分解能増強がイネーブルされている場合の S/N 比とオーバーサンプリング比の関係

## アプリケーション例

光エンコーダは、モータ・コントロールのアプリケーションにおいて、正確な位置の測定値を取得するために使用されます。例えば、エンコーダからのサイン出力とコサイン出力は補間され、同時に取得される必要があります。同時サンプリング SAR ADC (高スループット・レート of AD7380 など) は、このタイプのアプリケーションに適しています。角度位置  $\theta$  (シータ) は、取得したサイン信号とコサイン信号のアークタンジェントを求めることによって得られます。これらの信号が理想的な信号であれば、測定値は正確になります。実際のアプリケーションでは、これらの信号はノイズの影響を受ける場合があるため、読み取り誤差が発生します。これらの誤差によって、エンコーダの角度位置に誤差が生じます。

高精度のエンコーダが要求される例としては、モータの回転速度が低下しているとき、つまり、モータが減速を開始し、その後、目的の位置に到達したときがあげられます。AD7380 のオンチップ・オーバーサンプリング技術を使用すると、サイン信号とコサイン信号をデジタル・フィルタリングして、ダイナミック・レンジを拡大することができます。サインとコサインの変換精度が向上すると、角度位置の精度が上がります。この高い精度は、小型部品をプリント回路基板 (PCB) に実装するためのピック・アンド・プレース機や、荷物を指定された場所に運んだり、移したりするための産業機械のロボット・アームなどのアプリケーションで必要とされます。

## まとめ

オーバーサンプリングは、ADC で正確な変換値を得るためのデータ処理技術です。SAR ADC では、マイクロコントローラ、DSP、FPGA などによる後処理において、この技術が使用されてきた歴史があります。AD7380 などのアナログ・デバイゼスの高速 SAR ADC ファミリーでは、この機能が相加平均と移動平均の 2 つのオンチップ・オーバーサンプリング技術に統合されています。平均した変換値は、SDOx ピンから直ちに直接利用できるため、S/N 比やフル・ダイナミック・レンジなどの ADC パラメータに明らかな影響がすぐに現れます。

相加平均オーバーサンプリング技術は、高性能を必要としつつも、クロック速度と出力データ・レートの低下は許容できるアプリケーションに適しています。移動平均オーバーサンプリング技術は、高速性と高性能が共に要求されるアプリケーションに適しています。

分解能を上げると、オーバーサンプリング性能を向上できます。前述した 2 つのオーバーサンプリング技術と共に、AD7380 ファミリーに内蔵された分解能増強機能を使用すると、分解能を直ちに 2 ビット上げることができることに注意してください。AD7380 ファミリーは、マイクロコントローラでの追加のデータ処理によって生じる、SPI での負荷を軽減できる高速 SAR ADC です。更に、AD7380 ファミリーのデバイスは、ADC の変換精度向上において高い信頼性があります。