

システム・レベルの保護要件と計測要件の ADC 仕様への適用

著者: Aileen Ritchie and Claire Crok

はじめに

このアプリケーション・ノートでは、伝送および分配アプリケーションのシステム・レベルの要件を、アナログ・デバイセズのデータシートに記載された A/D コンバータ (ADC) の仕様に応用する方法のガイドラインを示します。これらのガイドラインから、計測デバイスや保護デバイスがシステム・レベルの性能に与える影響がわかります。このアプリケーション・ノートでは参考デバイスとして AD7779 を使用していますが、記載されている一般原理は、アナログ・デバイセズのすべての ADC に適用できます。

システム・レベルの要件

システム・レベルの仕様は、アプリケーションによって異なる可能性があります。最大/最小の公称動作電流 (I_{NOM}) や精度仕様などのいくつかの主要な要件は、ほとんどのアプリケーションに適用されます。多くの場合、精度は、出力される電流、電圧、またはエネルギーの測定値に一定のパーセント誤差が要求される計測基準や保護基準によって決まります。

主要な仕様

ADC やデータ・アキュイジション・システム (DAQ) の AC 性能や動的性能は、所定の入力周波数とサンプリング・レート (f_s) または出力データ・レート (ODR) での SNR、SINAD、THD に関して仕様が規定されています。これらの主要な仕様と説明は以下のとおりです。

- S/N 比 (SNR) は、実際の入力信号の rms 値の、ナイキスト周波数より下のその他のすべてのスペクトル成分の rms 値 (高調波と DC を除く) に対する比です。SNR は dB で表されます。
- ダイナミック・レンジ (DR) は、DAQ/ADC が生成可能な最大入力信号の最小入力信号に対する比です。DR は dB で表されます。
- 信号/ノイズ+歪み (SINAD) は、実際の入力信号の rms 値の、ナイキスト周波数より下のその他のすべてのスペクトル成分の rms 値 (高調波を含み DC を除く) に対する比です。SINAD はもともと、ADC または DAQ のシグナル・チェーンの計測分解能の尺度です。SINAD は dB で表されます。
- 全高調波歪み (THD) は、最初の 5 つの高調波成分の rms 値の和の、フルスケール入力信号の rms 値に対する比です。THD は dB で表されます。

主要な仕様の詳細については、MT-003 「*Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD + N, and SFDR so You Don't Get Lost in the Noise Floor*」を参照してください。

次の 2 つのシナリオでは、高 DR が必要になることがあります。

- 入力範囲内の信号を高精度に分解するニーズ。
- 広範囲に変化する信号を中程度の精度で測定するニーズ。

DR は、様々なシグナル・チェーン設計により実現されます。詳細についてはシグナル・チェーンの実装のセクションをご覧ください。

仕様への適用

DAQ または ADC に必要な性能レベルを決めるには、次の要件を分析します。

- DAQ/ADC が動作する入力範囲。
- 入力範囲の精度要件。

入力範囲のセクションでは、上記の 2 つの要素による影響の求め方を示します。

入力範囲

入力範囲の測定に必要な DR を、ADC が測定すべき最大電流 (または電圧) と最小電流 (または電圧) の比を使って求めます。入力範囲の DR (DR_{Input Range}) は、次式に示すように計算します。

$$DR_{Input\ Range} = \frac{\text{最大電流 (A)}}{\text{最小電流 (A)}}$$

設計マージンは、不確実性を許容するために、通常この入力範囲の上端に設ける必要があります。

同じ方法で、電圧チャンネルの DR を最大および最小入力電圧により求めます。次式は、入力範囲の DR を dB で表される値 (DR_{Input Range (dB)}) に変換します。

$$DR_{Input\ Range\ (dB)} = 20 \times \log_{10} (DR)$$

1 つ前の式は、ADC の最大電流が最大入力電圧に応じて直接増減すると想定していることに注意してください。

そうでない場合、ADC の全入力範囲が使用されないことを補償するために、DR のマージンを追加する必要があります。

精度

システム精度は、得られる測定結果において許容可能な誤差を指します。通常、システム精度は測定対象の信号のパーセント誤差として、例えば、動作範囲全体で 0.5 % の誤差のように表します。

また、精度は公称信号に関するパーセント誤差や絶対値として表すこともできます。この要件を DR 値に適用する場合、使用される最小入力でのパーセント誤差は次式で表されます。

$$DR_{Accuracy} (dB) = 20 \times \log_{10} \left(\frac{1}{\text{パーセント誤差}} \right)$$

ここで、 $DR_{Accuracy} (dB)$ は指定された精度を実現するために必要な DR です。

ただし、求められる精度は、規定の測定期間で実現すべきもので、必ずしも DAQ/ADC からのすべての出力サンプルで実現する必要はありません。例えば、保護アプリケーションでは、アルゴリズムが AD7779 から収集される全サンプルを使用可能で、電源ラインの 2 分の 1 サイクル期間におけるサンプルを平均して精度結果を出します。計測アプリケーションでは、測定期間が大幅に延びることがあります。例えば、rms 値は、10 電源ライン・サイクル期間後に更新されます。ADC（この場合は AD7779）はこの期間に複数のサンプルを生成するので、これらのサンプルを平均化できます。この平均化、すなわちオーバーサンプリング処理の結果、ノイズ・フロアが低下します。ノイズ・フロアがどれだけ低下するかは、次式に示すように、その測定期間で入手できる ADC サンプルの数によって決まります。

$$DR_{Averaging} (dB) = 20 \times \log_{10} \sqrt{No_Samples}$$

ここで、

$DR_{Averaging} (dB)$ は、 $No_Samples$ を平均化 (dB) して得られる DR の低下 (dB) です。

$No_Samples$ は、測定期間中に生成される ADC の出力サンプル数です。

サンプル数 ($No_Samples$) を求めるには、AD7779 の出力データ・レート (ODR) が必要です。AD7779 は最大 16 kSPS の ODR を実現します。次式を参照してください。

$$No_Samples = ODR (SPS) \times \text{測定時間} (秒)$$

平均化により得られる正味の DR が正のとき、 $DR_{Accuracy} (dB)$ の仕様は低下するので、平均ダイナミック・レンジを考慮に入れて $DR_{Accuracy} (dB)$ を再計算する必要があります。

$$DR_{Accuracy} (dB) = DR_{Accuracy} (dB) - DR_{Averaging} (dB)$$

DAQ/ADC の最終的な性能要件

DAQ/ADC の最終的な DR 仕様は、入力電圧範囲による DR 寄与分を精度による DR に加えると求められます。

$$DR_{Final} = DR_{Input Range} (dB) + DR_{Accuracy} (dB)$$

全高調波歪み (THD) の影響

平均化の計算は、AD7779 でのノイズがランダムで、スペクトル全体に均一に拡散することを前提にしています。ただし、実際にはシステムに一定レベルの高調波ノイズも存在しています。高調波成分は、ADC のすべての出力サンプルの同じ周波数に存在するので、このノイズは単純な平均化では減少しません。システムに対する平均化のメリットは、THD によって制限されます。したがって、ADC の選択時に THD 仕様を意識することが重要です。THD は高調波成分の尺度で、最初の 5 つの高調波成分の rms 値の和の、フルスケール入力信号の rms 値に対する比として定義されています。システム要件を満たすためには、ADC の THD 仕様は SNR/ DR_{Final} 値より低くなければなりません。THD の方が高いと、システム性能が THD の値に制限されます。AD7779 の場合、-0.5 dB の信号の THD は -108 dB です。ADC に対する入力信号の振幅が減少すると THD は向上しますが、通常、保護アプリケーションと計測アプリケーションの場合です。

保護および計測

ほとんどの伝送アプリケーションと分配アプリケーションは、保護機能と計測機能を両方備えています。これらの機能は、仕様を規定する精度と範囲の要件がそれぞれ異なります。これらの要件を満たす適切な DAQ/ADC を判断する際は、2 つの要件を別々に求めます。空気回路ブレーカの例のセクションに示すように、適切な ADC を選択するには、最終的な仕様の最大値を使用します。

空気回路ブレーカの例

以下の例は、空気回路ブレーカ (ACB) のシステム・レベルの仕様を ADC の要件に適用するプロセスを示しています。この例では、ACB に計測ユニットが内蔵されているため、計測仕様と保護仕様が個別に設定されています。

システム・レベルの仕様例

表 1 に計測仕様と保護仕様の例を示します。

表 1.

| Parameter | Metering | Protection |
|------------------|----------|------------|
| Accuracy | 0.5% | 2% |
| Minimum Current | 5 A | 40 A |
| Maximum Current | 6300 A | 150 kA |
| Measurement Time | 200 ms | 0.1 ms |

ADC 要件の計算例

ダイナミック・レンジ (DR)

最大入力信号は、ADC の最大入力電圧範囲に合わせて増減させる必要があります。このため、DR の計算には最大電流を使用します。この例では、保護のためには 150 kA が必要です。最小信号は計測に必要な 5 A で駆動します。

$$\text{入力範囲} = \frac{150,000}{5} = 30,000$$

$$DR_{\text{入力範囲}} = 20 \times \log_{10}(30,000) = 89.5 \text{ dB}$$

精度

この例には精度要件が 2 つあります。

- 計測: 200 ms で 5 A 時に 0.5 %。
- 保護: 0.1 ms で 40 A 時に 2 %。

これらの要件を個別に求め、要件の最大値を利用して適切な ADC を選択します。

計測要件

最小入力が 5 A のときは 0.5 % の計測精度が求められます。したがって、追加の SNR/DR は次のように計算することができます。

$$DR_{\text{Accuracy}} = 20 \times \log_{10}\left(\frac{1}{0.005}\right) = 46 \text{ dB}$$

$$No_Samples = 8 \text{ kSPS} \times 0.2 \text{ 秒} = 1600 \text{ サンプル}$$

$$DR_{\text{Averaging}} = 20 \times \log_{10}\sqrt{1600} = 32 \text{ dB}$$

$$DR_{\text{Measurement Accuracy}} = 46 \text{ dB} - 32 \text{ dB} = 14 \text{ dB}$$

ここで、 $DR_{\text{Measurement Accuracy}}$ は計測精度における DR です。

保護要件

保護要件は、40 A のときの最大誤差を 2 % にする必要があることを示しています。この要件が総合ダイナミック・レンジに与える影響を判断するには、まず最小電流 5 A 時の精度を計算します。これにより、保護要件と計測要件を次のように直接比較することができます。

$$5 \text{ A 時の誤差}(\%) = \frac{40 \text{ A}}{5 \text{ A}} \times 2\% = 16\%$$

SNR/DR の寄与分は次のように計算します。

$$DR_{\text{Accuracy}} = 20 \times \log_{10}\left(\frac{1}{0.16}\right) = 15.9 \text{ dB}$$

$$No_Samples = 8 \text{ kSPS} \times 0.001 \text{ 秒} = 8 \text{ サンプル}$$

$$DR_{\text{Averaging}} = 20 \times \log_{10}\sqrt{8} = 9 \text{ dB}$$

$$DR_{\text{Protection Accuracy}} = 15.9 \text{ dB} - 9 \text{ dB} = 6.9 \text{ dB}$$

ここで、 $DR_{\text{Protection Accuracy}}$ は保護精度における DR です。

保護要件と計測要件の両方を求めると、計測要件によって SNR 精度仕様が 14 dB と高くなることがわかります。したがって、ADC の選択には次式を基準とします。

$$DR_{\text{Final}} = 89.5 \text{ dB} + 14 \text{ dB} = 103.5 \text{ dB}$$

シグナル・チェーンの実装

前述したように、DR は、様々なアナログ・シグナル・チェーン設計とデジタル処理手法を組み合わせることで実現できます。

図 1 ~ 図 3 に、システム DR の実現方法に関するトップレベルのブロック図を示します。

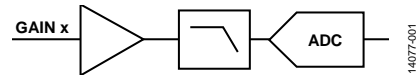


図 1. アナログ・ゲインと中程度の分解能を持つ ADC

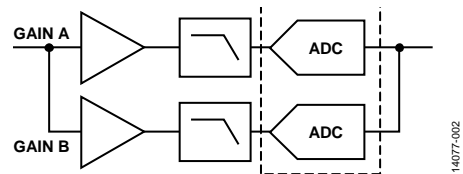


図 2. 分割ゲイン・パスを備えたデュアル ADC

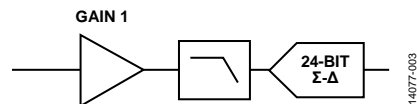


図 3. ユニティ・ゲイン・ドライバ付き高分解能 ADC (従来の $\Sigma\Delta$ ソリューション)

ADC のサンプリング・レートと対象の計測帯域幅の比に応じて、ADC サンプルに追加のデジタル・フィルタ処理を行ってシグナル・チェーンの DR を一層拡大することができます。

AD7779 は、8 チャンネル、24 ビットのシグマ・デルタ ($\Sigma\Delta$) ADC です。AD7779 は、最大 16 kSPS のサンプル・レート/出力データ・レートを実現することができます。AD7779 の THD は、最大 1 kHz の入力周波数に対して -108 dB です。

SINAD は、フルスケールの rms 入力信号の、ナイキスト周波数より下の全スペクトル成分 (高調波を含む) の rms 値に対する比です。SINAD はシグナル・チェーンの SNR と THD の両方の寄与分を含んでいるので、多くの場合、シグナル・チェーンの計測分解能は SINAD によって決まります。

シグナル・チェーンの SNR と THD がわかると、それにより SINAD は次のように計算できます。

$$SINAD = -10 \times \log \left(10^{\frac{-SNR}{10}} + 10^{\frac{-THD}{10}} \right)$$

したがって、SNR が 112 dB、THD が -108 dB でサンプル・レートが 8 kSPS のとき、SINAD は 106.54 dB となります。これは、「空気回路ブレーカの例」で説明した DR の要件を満たしています。

AD7779 は、PGA と 24 ビットの $\Sigma\text{-}\Delta$ ADC を内蔵した完全集積化シグナル・チェーン・ソリューションです。デバイスの詳細については AD7779 のデータシートを参照してください。

ダイナミック・レンジの広い信号を測定するその他のシステム例については、「アナログ・ダイアログ」の記事「[オーバーサンプリング ADC と PGA の組み合わせで 127 dB のダイナミック・レンジを実現](#)」をご覧ください。