

電圧リファレンス ノイズが ADC の ENOB とノイズフリー分解能に及ぼす影響

Jackson Wightman
Applications Engineer
Voltage References

Shridhar More
Systems Manager
Voltage References

はじめに

サーモスタットからフライトコントロールまでさまざまなシステムで、A/D コンバータ (ADC) を使用して実世界のアナログ信号をキャプチャし、デジタルドメインで処理し、デジタル結果に基づいて必要なアクションを実行しています。各 ADC は、生成できるさまざまなデジタルレベルを表す多くのビットを指定します。ある一定の ADC 入力に対する、ADC の出力が一定のデジタル値とはなりません。標準的な信号チェーンにはさまざまな誤差が存在するためです。したがって、比較の改善やキャプチャしたデータから最大の情報を抽出するために、有効ビット数 (ENOB) またはシグナルチェーンのノイズフリー分解能を考慮することが重要です。高精度を達成するには、ENOB の向上とノイズフリー分解能が必要です。

一般に、信号対雑音比 (SNR)、全高調波歪み (THD)、およびシステムのノイズは、ENOB の計算において重要な役割を果たします。フィールドトランスミッタや試験 / 測定アプリケーションなど複数のシステムでは、DC 入力信号の精度や正確性が非常に重要です。したがって、ノイズ仕様が最も重要になります。ADC の電圧リファレンスは、精度や正確性に影響を及ぼす可能性のあるシグナルチェーンの重要な要素です。

電圧リファレンスが ADC ノイズに及ぼす影響

フィルタリングによって一部のノイズを除去することは可能ですが、低周波のノイズを除去することは実際にはできません。また、必要となる抵抗とコンデンサを組み合わせたフィルタ部品のサイズのため、シグナルチェーンの性能に大きな影響を及ぼさずに、電圧リファレンス内でフリッカーノイズ (0.1Hz~

10Hz の範囲のノイズ) を除去することは不可能です。したがって、ノイズはほとんどの場合システム内に存在します。

電圧リファレンスのノイズに加えて、ADC 自体と ADC ドライバからもノイズが発生します。これらの各部品は、デジタル信号を生成する回路のノイズに関係しています。図 1 はこの回路の簡略化したブロック図です。

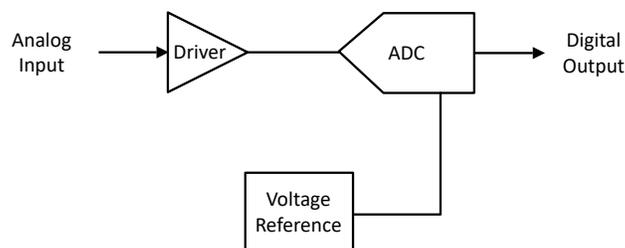


図 1. 外部電圧リファレンスを使用した汎用 ADC 回路構成

式 1 は、この回路の合計ノイズを次のように表します。

$$\text{Total Noise} = \sqrt{\text{Noise}_{\text{Driver}}^2 + \text{Noise}_{\text{ADC}}^2 + \text{Noise}_{\text{VREF}}^2} \quad (1)$$

システムの ENOB を決定する際には、回路に存在するノイズの量を知ることが重要です。一般に、低ノイズ設計には低ノイズデバイスの選択が不可欠です。

この記事では、電圧リファレンスの選定に加え、ADC 性能の最大化に役立つ他のデータ処理の選択肢にも注目します。

電圧リファレンスが THD に及ぼす影響

電圧リファレンスピンのサンプリングを繰り返すと、数ナノ秒しか間隔がない過渡電流が発生することがあります。ただし、ADC の場合、大きなゲイン誤差を避けるために、サンプル位相が終わるまでに外部リファレンスが安定化または再充電さ

れる必要があります。サンプリング速度を遅くするとこの問題が解決する可能性があります。これは必ずしも選択肢ではありません。通常、ADC の精度が高いほど、リファレンス入力に必要な電流は大きくなります。電圧リファレンスの帯域幅が十分に広くない場合、または出カインピーダンスが高すぎる場合、ADC のリファレンス入力を再充電できません。これにより電圧ドロップが発生し、ゲイン誤差と ENOB の低下につながります。

このため、ADC の THD を増加させ、データシートに掲載されている歪みと ENOB の仕様を満たすために、電圧リファレンスの外部に高帯域幅で低出カインピーダンスのバッファが必要になることがあります。一部の ADC には電圧リファレンスバッファが内蔵されていますが、内蔵されていないものもあります。図 2 に、回路の THD を増やすために外部バッファを追加する場所を示します。

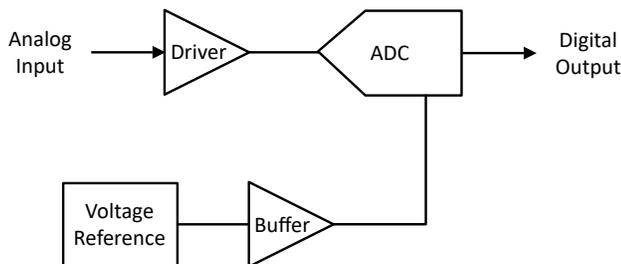


図 2. 外部電圧リファレンスとリファレンス バッファを使用した、汎用 ADC 回路構成

電圧リファレンスのノイズと THD が ENOB に与える影響

ENOB は、回路の AC 特性が ADC 分解能にどのように影響するかを表します。回路のノイズと THD は、信号対雑音比および歪み (SINAD) と呼ばれる用語で表されます。SINAD は、式 2 で表されるように、これら 2 つの AC 特性を 1 つの数値で表します。

$$\text{SINAD (dB)} = -20 \log \sqrt{10^{-\text{SNR}/10} + 10^{\text{THD}/10}} \quad (2)$$

式 2 から、SNR が増加するにつれて SINAD も増加することがわかります。したがって、存在するノイズと歪みが少ないほど、SINAD は良好です。SINAD を使用すると、式 3 で ADC の ENOB を簡単に見つけることができます。これは特に、以下の理由からです。

$$\text{ENOB} = \frac{\text{SINAD} - 1.76 \text{dB}}{6.02} \quad (3)$$

式 1 を再度参照すると、電圧リファレンスに存在する全ノイズが減少すると、回路に存在する全ノイズが減少し、SNR が増加することがわかります。SNR が高くなるほど、ENOB も大きくなります。また、電圧リファレンスの出力に高帯域幅バッファを追加すると、ADC の THD が低下し、ENOB が増加します。

電圧リファレンスのノイズがノイズフリー分解能に与える影響

ENOB は ADC 出力の分解能を正確に表しますが、DC 性能は考慮されていません。DC 入力から ADC へのノイズが分解能に及ぼす影響を理解するには、回路のノイズフリー分解能を明らかにすることを検討してください。式 4 を使用すると、DC 信号を測定しながら、ADC のデジタル出力の最下位ビット (LSB) 数でコードの拡散を観察し、ノイズフリー分解能を計算できます。

$$\text{Noise Free Resolution} = N - \log_2(\text{Code Spread}) \quad (4)$$

リファレンス ノイズがシステムの精度性能に及ぼす影響を明確にするために、同僚と私は REF70 (0.23ppm_{p-p} フリッカーノイズ) と REF50 (3ppm_{p-p} フリッカーノイズ) を使用して、特定のシグナルチェーンに対する DC コード拡散テストを実施しました。REF50 と REF70 はどちらも、高精度 ADC とともに使用される高精度電圧リファレンスであり、異なる DC 特性を持っています。ただし、このテストの目標は、信号チェーン回路内でこれらのデバイスのノイズ性能を比較することのみでした。

この設計では、20kSPS でデータをキャプチャする

ADS8900B 20 ビット SAR ADC のフルスケールレンジに近い電圧レベルで、安定した DC 電源としてバッテリーを使用します。**OPA2320** をゲイン = 1 で使用して、**ADS8900B** の入力を駆動します。この ADC はリファレンス バッファドライバを内蔵しているので、オプションのリファレンス バッファは不要です。電圧リファレンスの出力に、単純な抵抗 - コンデンサによるローパスフィルタを配置することで、電圧リファレンスからのノイズをさらに低減できます。図 3 に、このテストで使用するセットアップを示します。

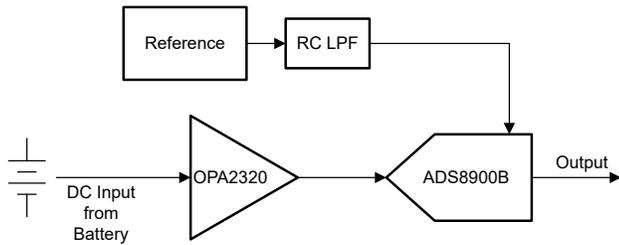


図 3. 以下のノイズフリー分解能テストに使用した回路。

電圧リファレンスの横にある信号チェーンの部品にもフリッカノイズがあり、これは最終的なコード拡散の一部になります。信号チェーンは、リファレンスが異なる場合にのみ同じ状態を維持するため、性能数値への影響は電圧リファレンスノイズのみである必要があります。

高精度システムは、精度の向上と全体的な分解能の向上のために、データ処理手法を採用しています。この実験では、ADS8900B から取得した 20 ビットの未加工データを、出力に 16 を乗算して 24 ビット長に変換しました。変換された 24 ビットデータは、異なる有限インパルス応答 (FIR) フィルタによって処理されます。FIR フィルタは実装が容易で、入力値に変化が生じた場合に迅速に安定します。出力データレートは 20kSPS のままですが、レイテンシはフィルタ特性で定義されています。

24 ビットレベルでは、REF50 と REF70 のノイズ (および精度) はほぼ同等であり、全体的なノイズはシグナルチェーンとその広帯域ノイズによって支配されます。平均コード値の差は、電圧リファレンスの差が原因で、キャリブレーションで除去できる精度仕様です。これらの結果を図 4 と図 5 に示します。

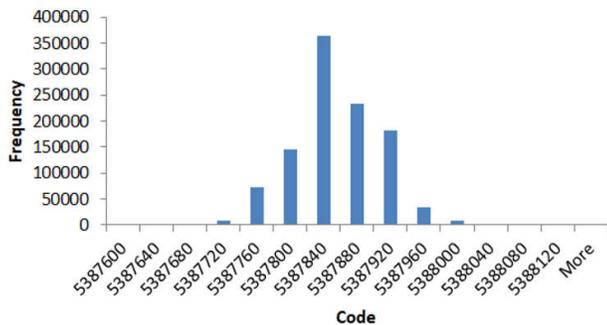


図 4. REF50 ノイズ = 3ppm_{p-p} の結果。

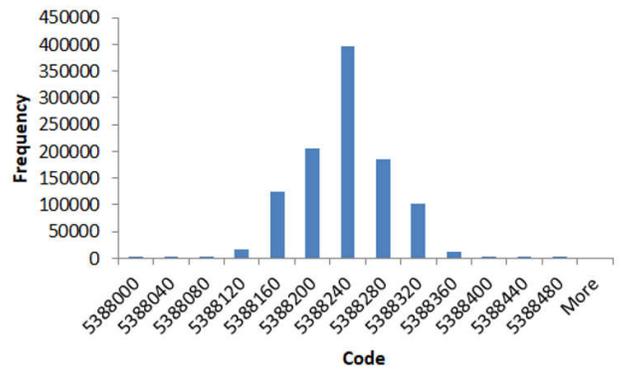


図 5. REF70 ノイズ = 0.23ppm_{p-p} の結果。

オクターブ ツールを使用し、3 種類のデジタル フィルタにより生データの後処理を実行しました。

- 1,024 タップ移動平均フィルタ。
- 801 タップ、17Hz ローパス フィルタ。
- 455 タップ、36Hz ローパス フィルタ。

図 6 に、これらのフィルタのフィルタ応答を示します。

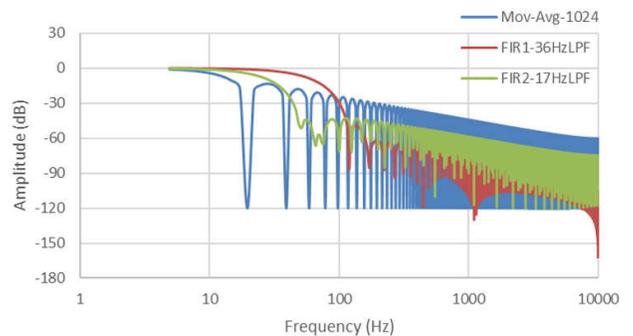


図 6. デジタル フィルタの応答。

図 7、図 8 および 図 9 に、デジタル フィルタがコード拡散に及ぼす影響を示します。

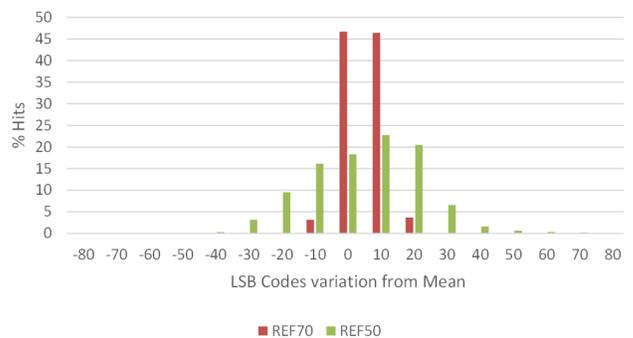


図 7. 1,024 タップ フィルタのヒストグラム。

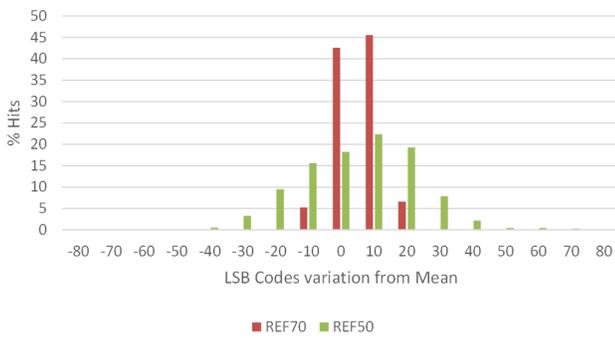


図 8. 455 タップ フィルタのヒストグラム。



図 9. 801 タップ フィルタのヒストグラム。

式 4 を使用すると、REF50 と REF70 の各フィルタ プロファイルが ADC の分解能に及ぼす影響を簡単に比較できます。これらのテスト結果を 表 1 にまとめました。

デジタル フィルタの種類	コーナー周波数 (Hz)	タップ数	DC コード拡散 (LSB)	ノイズ フリー分解能 (bits)	DC コード拡散、最下位ビット	ノイズ フリー分解能 (bits)
			24 ビットでの REF70		24 ビットでの REF50	
フィルタなし	N/A	0	448	15.1	496	15.0
1,024 タップ移動平均	8	1,024	35	18.8	118	17.1
FIR No. 1	17	801	38	18.7	121	17.0
FIR No. 2	36	455	49	18.3	135	16.9

表 1. さまざまなフィルタ プロファイルとリファレンス デバイスを使用した DC コード拡散の比較。

この比較は、最高精度のアプリケーションで、ノイズ フリー分解能を計算する際に REF70 が REF50 よりも優れていることを示しています。これは主に、デバイスのフリッカー ノイズレベルの違いが原因です。REF70 を使用する場合のコード拡散の縮小は、超低ノイズが高精度アプリケーションにおいて 2 ビット近い分解能の改善を実現できることを示しています。加えて、低ノイズ リファレンスを使用すると、ノイズ フリーの高い分解能を維持しながら、高速 455 タップ フィルタを使用できることがわかります。電圧リファレンスのフリッカー ノイズが小さいと、コード拡散が減少するので、ノイズ フリーの分解能が向上します。ENOB と同様、低いノイズフリーの分解能を実現するようにシグナル チェーンを設計する際に、ノイズは重要な検討事項になります。

まとめ

ADC は何千ものアプリケーションやテクノロジーで使用されているため、常に高い精度や正確性を実現する必要があります。高度な X 線システムを設計する場合でも、非常に精度の高いバッテリー テスト回路を設計する場合でも、あるいはその他、革新的な回路であっても、ADC シグナル チェーンの精度と正確性を向上させるには、電圧リファレンスを注意深く選択して実装することが不可欠です。ADC の ENOB とノイズ フリーの分解能を向上させることで、より高度で多様なシグナル チェーンの実装を可能にします。

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ（データシートを含みます）、設計リソース（リファレンス・デザインを含みます）、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated