

高精度オペアンプを ADC ドライバとして選択する

Soufiane Bendaoud, senior business development manager

Texas Instruments

A/D コンバータ (ADC) を駆動するオペアンプ (オペアンプ) を選択することは簡単なタスクではありません。通常、最終機器によって決まりますが、ADC の選択は複数のパラメータのトレードオフに基づいて行われます。同じ分野や市場セグメント内であっても、ADC の要求仕様は異なる場合があります。例えば、テストおよび計測分野では、逐次比較型 (SAR) とデルタシグマの ADC が混在しているのが見られます。SAR ADC は、パラメトリック測定ユニット、メモリ テスタ、バッテリー セル形成テスタなどでよく使用されます。

デルタシグマ ADC は一般的に、振動分析、データ アクイジション、科学的な計測機器に使用されます。全体のシステム要件によっては、両方の方式が適用可能なアプリケーションもあります。高精度なばかりでは、より高い分解能を持つデルタシグマ ADC の方が有利ですが、コンシューマ向けや低価格モデルでは、消費電力を抑えるために SAR 構成が採用されます。

同様に、データ通信向けの光モジュールでは SAR ADC が使われる傾向がありますが、通信向けの光モジュールではデルタシグマ ADC に依存することが多く、両方とも同じ分野 (すなわちデータ センター) に属しているにもかかわらず、このような違いが見られます。

オペアンプ (またはアナログ フロント エンド) の DC および AC 特性に注意を払うことで、ADC の性能劣化を防ぎ、誤差を最小限に抑えることができます。

回路構成と帯域幅およびその他の誤差の対比

反転回路構成は、同相モード変動による誤差を回避できるという利点があり、そのため高い同相信号除去比を必要としません。ただし、入力インピーダンスは入力抵抗とフィードバック抵抗の並列合成値まで低下し、さらにフィードバック抵抗によってゲイン誤差が生じます。非反転構成は、一般的に非常に

高い入力インピーダンスを提供します。オペアンプの閉ループ帯域幅、すなわち実効帯域幅は、信号ゲインではなくノイズゲイン (または非反転ゲイン) の関数です。

図 1 において、TI の OPA325 は 10MHz のゲイン帯域幅積を持っています。正のユニティゲイン (バッファ) 構成では、帯域幅は 18MHz です。余分な帯域幅はゲインピーキングに起因しており、これは TINA-TI™ のマクロモデルでは入力容量および開ループ出力インピーダンスによって考慮されています。この場合、信号ゲインは -1 で、ノイズゲインは 1 です。

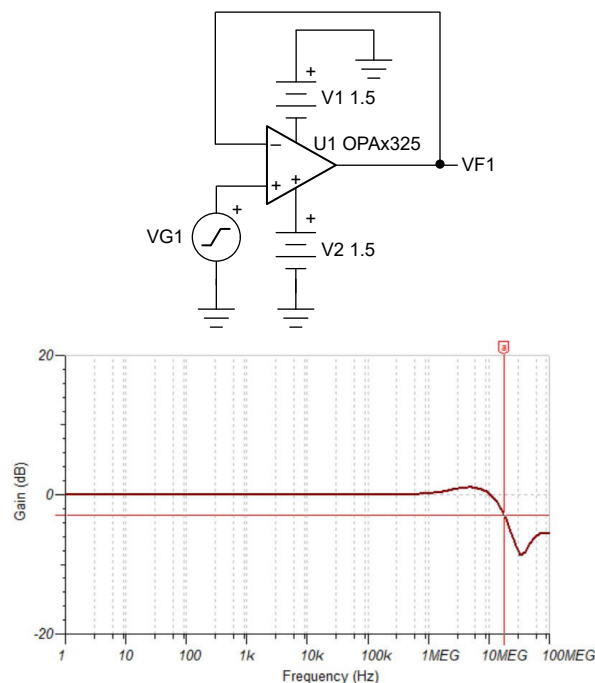


図 1. バッファ構成の OPA325

一方、図 2 に示す回路は、図 1 のバッファの帯域幅の約 3 分の 1 である 6.7MHz の帯域幅を示しています。図 2 では、信号ゲインは -1 ですが、ノイズゲインは 2 です。ゲインがわずか 2 の場合でも、反転構成でゲインのピークはそれほど顕

著ではないことに注意してください。ゲインが大きいほど、ゲインのピークは小さくなります。

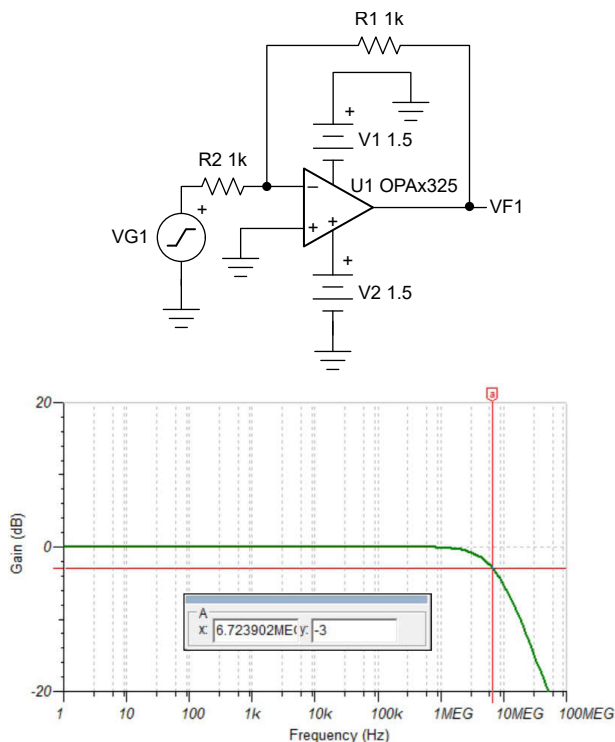


図2. ノイズゲインが2のOPA325

DCのゲイン誤差

開ループゲイン (Aol) は、DCゲイン精度において重要な役割を果たします。図2の反転回路を12ビットシステムで考えると、Aolは少なくとも78dB、すなわち8,192 (= 2¹² × 2)である必要があります。現代のほとんどの汎用オペアンプは、78dBのAolを達成することができます。ノイズゲインが2の条件で16ビットの精度が必要な場合、最小Aolは102dBである必要があり、多くの場合は高精度デバイスが求められます。Aolは出力負荷の関数でもあることを覚えておいてください。というのも、最終段のゲインはgm × RLに依存するためです。反転回路の場合、帰還抵抗 (図2のR1) が負荷となります。

出力制限と直線性

オペアンプの仕様表には出力スイングが記載されており、これは通常、電源電圧に対して10mV ~ 20mV程度 (CMOSの場合) で、一般にスラムテストと呼ばれます。オペアンプが線形領域内にとどまるようにするためには、Aolの仕様条件

を確認し、許容される最大電圧スイングを判断する必要があります。ADCは入力インピーダンスが高いため、値が最大の負荷条件を確認します。

例えば、OPA328は10kΩの負荷条件で±100mVの出力電圧スイングを持ちます。単電源3.3VでADS8860と組み合わせる場合、OPA328の線形範囲は0.1V ~ 3.2Vとなるのに対し、ADS8860の入力範囲は0V ~ 3.3Vです。明らかにフルのダイナミックレンジを使い切れておらず、その結果としてコードが無駄になっています。LM7705負のバイアスジェネレータ (-0.23V) を使用して、正電源を3.5Vに増やすと、この問題を回避できます。OPA328の出力制限が±100mVであり、LM7705を使用することで、有効な出力範囲は-0.1V ~ 3.4Vとなります。これは、ADS8860の絶対最大定格 (-0.3V ~ 3.6V) を超えることなく、その入力範囲をカバーしています。

ノイズとENOB

高分解能のADCを駆動する際には、オペアンプのノイズが重要な役割を果たします。低ノイズのオペアンプを使用することで、システム全体の有効ビット数 (ENOB) をより高くすることができます。言い換えると、オペアンプのノイズが低いほど、ENOBの劣化は小さくなり、精度は高くなります。低ノイズのオペアンプは通常、より高い静止電流を必要とし、電流は次のように表される帯域幅に比例することを留意してください：

$$BW = \frac{gm}{2\pi Cc} \quad (1)$$

同じ電流量であれば、バイポーラ型オペアンプの方がより広い帯域幅を実現できます (言い換えると、より効率が高くなります)。

電圧リファレンスを含む合計ノイズの計算は式2で表されず：

$$V_{ntotal} = \sqrt{V_{nADC}^2 + V_{nopa}^2 + V_{nref}^2} \quad (2)$$

ADS8860を例にとると、フルスケールレンジ (5V) を実効値 (RMS) に変換するために5 / (2 × √2) を用いると、1.76Vが得られます。式3は、ADS8860のrmsノイズを次のように計算します：

$$V_{nADC} = \frac{V_{FSR_rms}}{10\left(\frac{SNR_{ADC}}{20}\right)} = \frac{1.76}{10\left(\frac{93dB}{20}\right)} = 39.6\mu Vrms \quad (3)$$

OPA328 を正のユニティゲインでシミュレーションすると、合計ノイズは 47 μ Vrms となり、反転ゲイン 2 (ノイズゲイン) の場合は約 83 μ Vrms となります。図 3 および 図 4 に、それぞれのシミュレーション結果を示します。

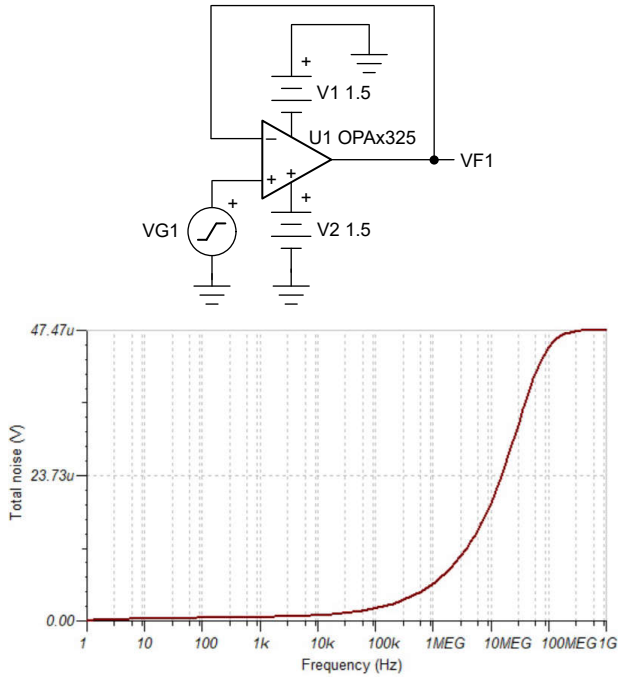


図 3. OPA328 の正のユニティゲインにおける RMS ノイズ

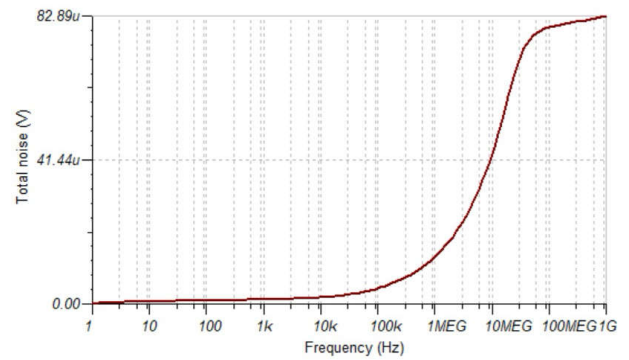
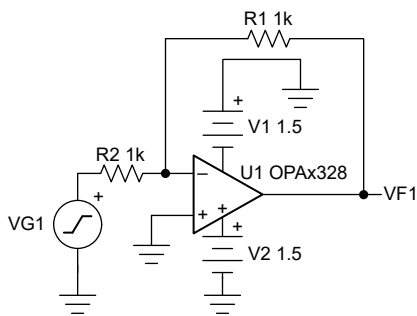


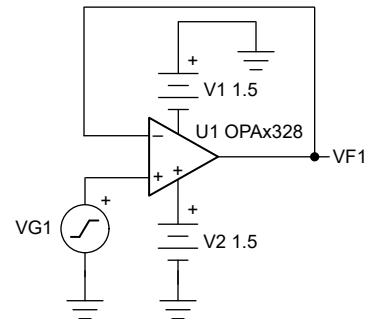
図 4. 反転構成における OPA328 の RMS ノイズ

同じ回路で OPA325 を使用すると、それぞれ 39 μ Vrms および 55 μ Vrms が得られます。

最もノイズの低いオペアンプを選ぶのが自然に思えるかもしれませんが、ノイズの観点では、低ノイズアンプの性能は帯域幅によって決まることを覚えておく必要があります。言い換えると、6nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の電圧ノイズ密度を持つ OPA328 は、9n/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の広帯域電圧ノイズ密度を持つ OPA325 と比べて、約 20% 高いノイズを示します。OPA328 は OPA325 の帯域幅が 4 倍です。

合計ノイズ (RMS) のシミュレーションは、システムの ENOB をより改善するための分析の重要な要素です。

例えば、図 5 のノイズプロットでは、ADS8660 の 1/2 最下位ビット (LSB) に相当する 39 μ V までノイズを低減するには、帯域幅を約 2MHz に制限する必要があります。



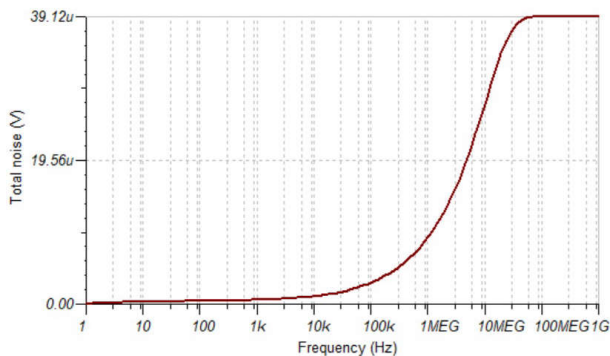


図5. 正のユニティゲインでの OPA325 RMS ノイズ

図6は、反転構成における OPA325 の rms ノイズのシミュレーションを示しています。

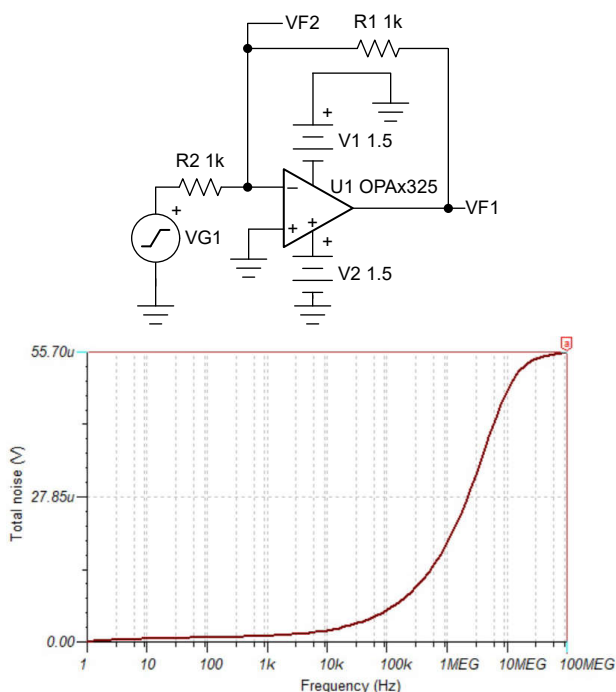


図6. 反転構成の OPA325 RMS ノイズ

図7は、REF7050 の合計ノイズ (RMS) が約 2.2μV であり、システム全体のノイズにほとんど影響を与えないことを示しています。式2にこの値を含めると、合計ノイズは 55.7μV になります。電圧リファレンスのノイズを無視すると、式1で 55.6μV が得られます。OPA325 の帯域幅を 2MHz に制限すると、ノイズは約 18μV となり、システム全体のノイズは 43μV になります。これは明らかに ADS8860 のノイズが支配的であることを示しています。

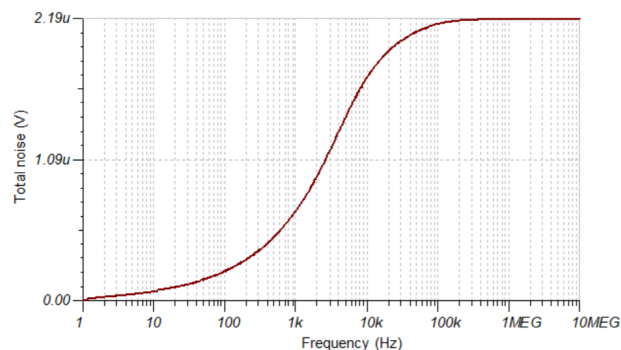
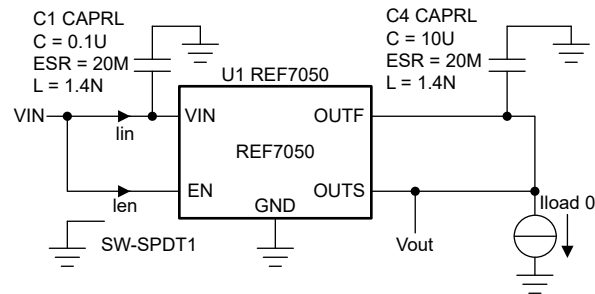


図7. REF7050 RMS ノイズ

式4は、システムの合計信号対雑音比 (SNR) を表します：

$$SNR_{total} = 20 \log \left(\frac{V_{FSR_{rms}}}{V_{ntotal}} \right) \quad (4)$$

合計ノイズが 55.6μV の場合、全体の SNR は 90dB となります。OPA325 の帯域幅を 2MHz に制限した場合、全体の SNR は 92.2dB となり、ADS8860 の元の SNR である 93dB からの劣化は 1dB 未満にとどまります。

入力オフセット電圧およびドリフト

オペアンプのオフセット電圧は誤差の原因となり、システムの精度に影響を与えます。フルスケール電圧範囲が 5V の場合、ADS8860 (16ビット) の量子化誤差は $5 / (2^{16} + 1)$ になり、これは 76μV です。量子化誤差を避けてシステム精度を維持するためには、1/2 LSB、すなわち 38μV を目標とします。入力オフセット電圧は補正することができますが、オフセットドリフトはより複雑なキャリブレーション手法を必要とします。自動車や坑井掘削のようなアプリケーションでは、ラボ機器やフィールド機器、試験機器、計測機器、医療機器よりもはるかに高い温度が要求されます。ゼロドリフトや e-trim™ などの手法を使用した最新の高精度オペアンプには、非常に低いオフセット電圧およびドリフトが望ましい LSB サイズを十分に下回る利点があり、システム精度の向上に役立ちます。

表 1 には、TI のさまざまな技術を用いたいくつかの高精度オペアンプが示されています。

デバイス	テクノロジー	Vs (V)	Vos max (μV)	TCVos (標準値) ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	帯域幅 (MHz)	広帯域電圧ノイズ ($\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)
OPA392	e-trim™	1.7-5.5	10	0.18	13	4.4
OPA325	レーザトリム、ゼロクロスオーバー	2.2-5.5	150	2	10	9
OPA328	e-trim™、ゼロクロスオーバー	2.2-5.5	50	0.15	40	6.1
OPA383	ゼロドリフト	2.7-5.5	5	0.025	2.5	32
OPA192	e-trim™、マルチプレクサに対応	4.5-36	25	0.1	10	5.5

表 1. 高分解能 ADC 駆動に適した低ノイズ高精度オペアンプ

セトリング タイム

広帯域でスルーレートが高く、出力インピーダンスが低く、位相マージンが大きいアンプは、より速くセトリングします。ADC を駆動する際には、必要な分解能までセトリングする時間が ADC アクイジション時間に一致するオペアンプを選択します。アクイジション時間は、サンプリング時間から変換時間を引いた値であることに注意してください。サンプリング レートを下げることによって、オペアンプのセトリング タイムに対する要求を緩和できます。

理想的には、誤差を避けるために、オペアンプは ADC の 1/2 LSB 以内にセトリングする必要があります。ただし、オペアンプのデータシートでは、最大 16 ビット (0.0015%) のセトリング タイムを指定しているものはほとんどありません。見落とされがちな仕様の一つに、開ループの出力インピーダンスがあります。開ループ出力インピーダンスが小さいと、位相マージンが大きくなり、セトリング タイムが短くなります。さらに、開ループ出力インピーダンスの形状は回路の安定性に影響を及ぼします。平坦な (抵抗性の) 開ループ出力インピーダンスを持つオペアンプは、補償がはるかに容易です。オペアンプの出力にチャージ バケット用の抵抗とコンデンサ フィルタを設けると、ポールが生じて位相マージンは低下しますが、サンプリング タイム中の出力電圧の低下を最小限に抑えることができます。ポールの位置によっては、セトリング タイムに影響

を与える過剰なリングング (オーバーシュート) が発生することがあります。

図 8 に、OPA328 を使用した ADS8860 を駆動する回路を示します。サンプリング レートは 500kSPS に設定されています。ADS8860 のアクイジション時間は、 $T_{acq} = 2\mu\text{s} - 710\text{ns} = 1,290\text{ns}$ です。

サンプリング レートを 500kSPS に下げることによって、回路は 425ns というはるかに短い時間でセトリングでき、これは 1/2 LSB を十分下回ります。

図 9 に ADS8860 と組み合わせた OPA328 を示し、この回路を使用してセトリング タイム (図 10) をシミュレーションします。

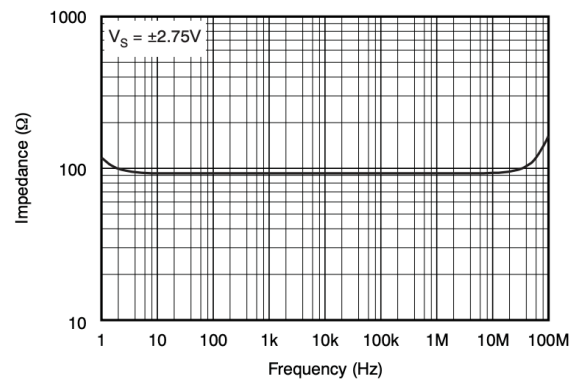


図 8. OPA328 の開ループの出力インピーダンスと周波数との関係

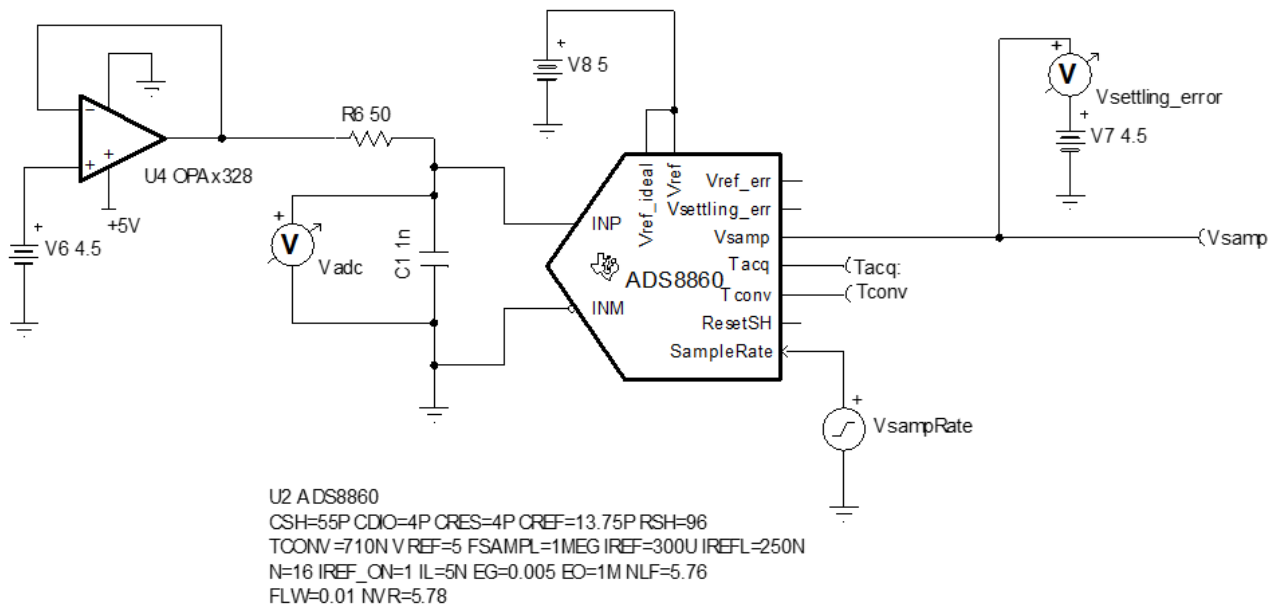


図9. ADS8860 を駆動する OPA328

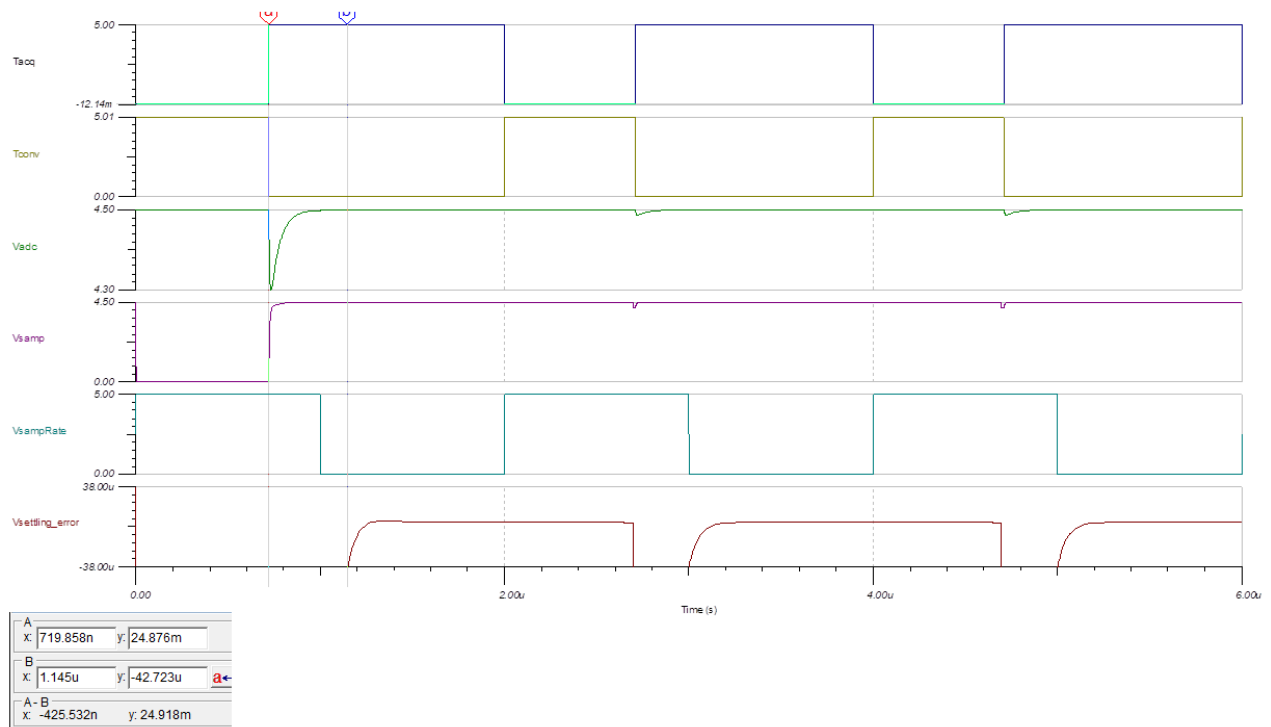


図10. ADS8860 を駆動する OPA328 のセトリングタイム

安定性

セトリングタイムとノイズ性能を考慮して回路を最適化する場合でも、安定性を犠牲にしません。この記事で取り上げたオペアンプは、低くて平坦な開ループ出力インピーダンスを持っており、そのため補償ははるかに容易になります。

図 11 は、フィードバックループの外側に 50Ω のアイソレーション抵抗を設けて、 $1nF$ のコンデンサを駆動している OPA328 を示しており、この抵抗は ADS8860 の駆動にも使用されているものと同じです。位相マージンは 61 度であり、信頼性の高い設計で安定性が保証されています。

オペアンプの安定性は非常に重要です。オペアンプが不安定である場合や、不安定になる寸前であっても、大きなリングングとオーバーシュートが発生しても他には重要ではありません。

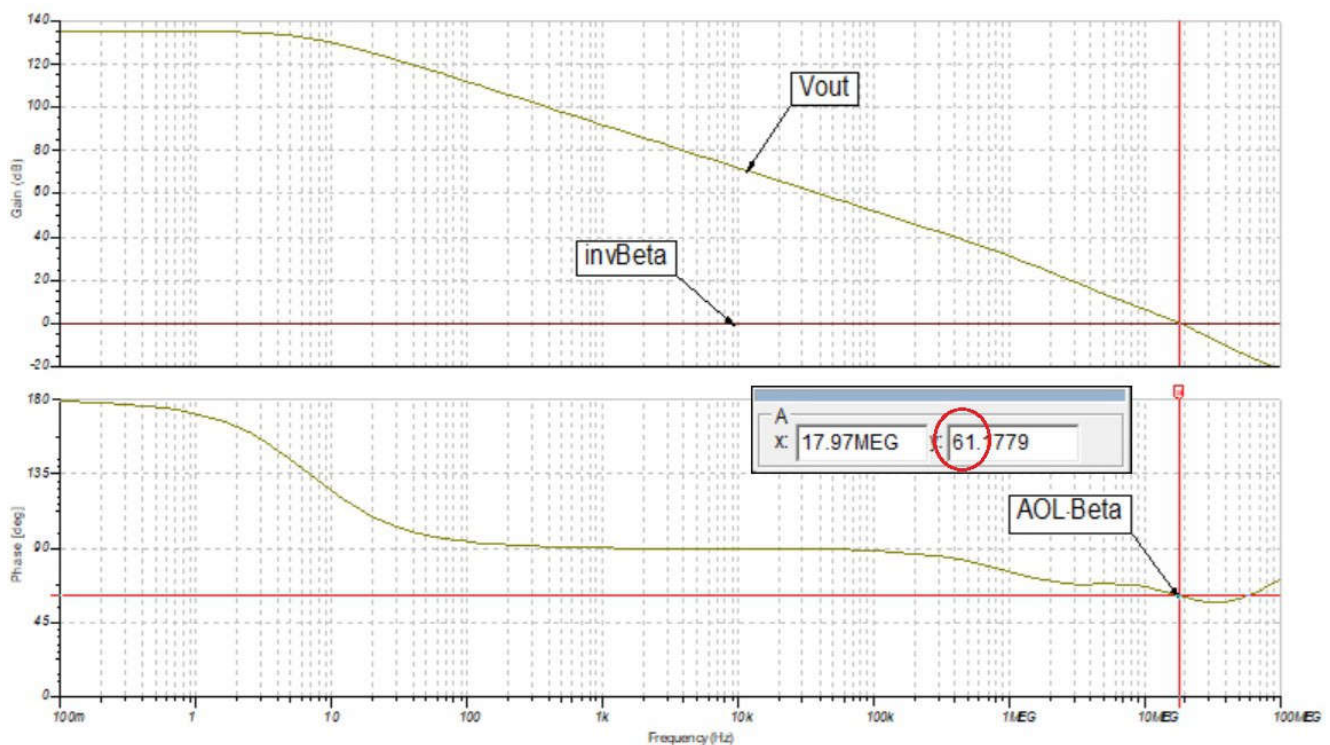
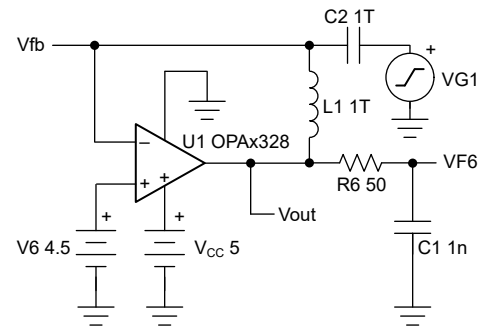


図 11. 大きな容量性負荷における OPA328 の開ループゲインおよび位相マージン

まとめ

ADC ドライバとしてのオペアンプの選択は、アプリケーションから始まります。試験 / 計測用の携帯機器、医療機器、バーコード スキャナなどは低消費電力に依存している一方で、ガス探査、変位測定、半導体試験装置ではより高い分解能が求められるため、低ノイズの高精度オペアンプが必要とされます。特定の ADC に対するオペアンプ選択において万能な解決策はなく、ある特性を他より優先して最適化する手法があるだけです。

著者について

Soufiane Bendaoud は、テキサス インストルメンツの高精度アンプ事業開発マネージャであり、25 年以上にわたるアナログ シグナル チェーンに関する専門知識を有しています。彼はこれまでに 60 本以上の技術記事、アプリケーション ノート、論文を執筆しており、世界中のエンジニアに対して定期的に技術トレーニングを提供しています。

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスト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。

TINA-TI™ and e-trim™ are trademarks of Texas Instruments.
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](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。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。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

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

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日 : 2025 年 10 月