

# Analog Engineer's Circuit

## バッファ付き計測アンプを使用したスイッチト キャパシタ SAR ADC 駆動回路



Art Kay

入力	ADC 入力	デジタル出力 ADS8860
-10 mV	Out = 0.2V	0A3D <sub>H</sub> または 2621 <sub>10</sub>
5 mV	Out = 4.8V	F5C3 <sub>H</sub> または 62915 <sub>10</sub>

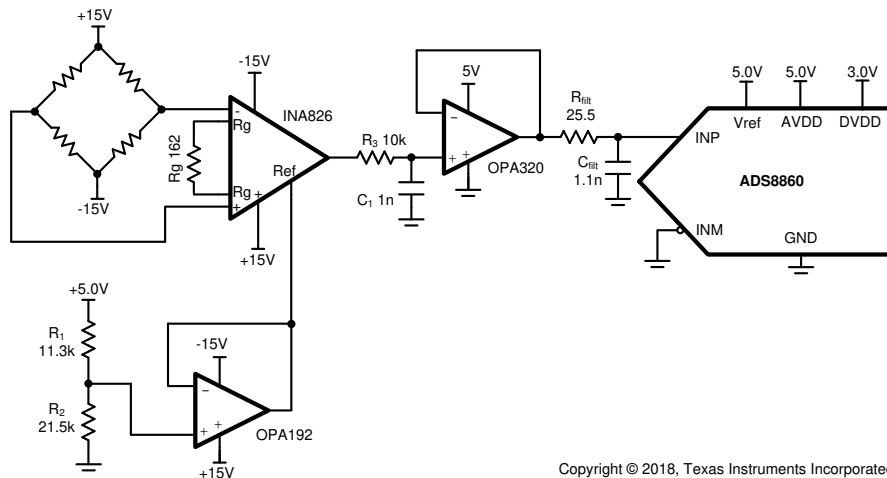
### 電源

AVDD	DVDD	V <sub>ref_INA</sub>	V <sub>ref</sub>	V <sub>cc</sub>	V <sub>ee</sub>
5.0 V	3 V	3.277 V	5.0 V	15 V	-15 V

### 設計の説明

計装アンプは、低レベルのセンサ出力を高レベル信号に変換して ADC を駆動する一般的な方法です。通常、計装アンプは低ノイズ、低オフセット、低ドリフトに最適化されています。しかし、多くの計装アンプの帯域幅は最高サンプリングレートで ADC における電荷のキックバックを適切にセリングするのに十分ではありません。本書には、計装アンプとともに広帯域バッファを使用して、高いサンプリングレートで適切なセリングを実現する方法を示します。さらに、多くの計装アンプは高電圧電源用に最適化されており、高電圧出力 (すなわち ±15V) を低電圧アンプ (5V など) に接続する必要があります。この設計では、電流制限抵抗を使用して、計装アンプがオペアンプの入力電圧範囲を逸脱した場合にアンプを電氣的オーバーストレスから保護する方法を示します。関連するクックブックには、広帯域バッファを使用しない簡易な手法を示しています (『計装アンプを使用したスイッチト キャパシタ SAR ADC 駆動回路』)。簡易な手法では、バッファ付きの設計に比べてサンプリングレートが制限されます。なお、以下の回路はブリッジ センサを示していますが、この方法は多種多様なセンサに利用できます。

この回路実装は、アナログ入力モジュール、心電計 (ECG)、パルス オキシメータ (血中酸素飽和度計)、ラボ計測機器、鉄道輸送用制御ユニットなどの用途に適しています。



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

## 仕様

仕様	計算結果	シミュレーション結果
サンプリング レート	1Msps	1Msps、 $-44\mu\text{V}$ にセトリング
オフセット(ADC 入力)	$40\mu\text{V} \times 306.7 = 12.27\text{mV}$	16 mV
オフセットドリフト	$(0.4\mu\text{V}/^\circ\text{C}) \times 306.7 = 123\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	該当なし
ノイズ	978 $\mu\text{V}$	586 $\mu\text{V}_{\text{RMS}}$

## デザイン ノート

- 計装アンプの帯域幅は通常、高いデータ レートで SAR データ コンバータを駆動するには低すぎます(この例では  $305\text{V}/\text{V}$  のゲインに対して INA826 の帯域幅は  $10.4\text{kHz}$  です)。各変換サイクルにおいて SAR のスイッチト キャパシタ入力を充電しなければならないため、広い帯域幅が必要です。OPA320 バッファを追加して、ADC が最高データ レート(ADS8860 1Msps)で動作できるようにしました。
- ADC の入力範囲にマッチした入力振幅を実現するようにゲインを選定します。計装アンプの基準ピンを使用して、入力範囲にマッチするように信号オフセットをシフトします。これについては「部品選定」で説明します。
- オペアンプの入力電圧レベルがアンプの通常動作範囲内に収まるように INA826 のゲインを増減します。ただし、電源投入時やセンサ切断時には、出力がいずれかの電源レール ( $\pm 15\text{V}$ ) に達することがあります。電流を制限するために抵抗  $R_3$  を使用します。これについては、本書の「計装アンプ-オペアンプ間の過電圧保護フィルタ」で述べます。
- 大半の計装アンプの入力基準電圧を駆動するには、分圧器の後にバッファ アンプが必要です。高精度の抵抗と高精度の低オフセット アンプをバッファとして選定します。この件の詳細については、『[Selecting the right op amp](#)』を参照してください。
- 「[計装アンプの同相入力電圧範囲を計算](#)」ソフトウェア ツールを使用して、アンプの同相電圧範囲を確認します。
- 歪みを最小限に抑えるために、 $C_1$ 、 $C_{\text{filt}}$  に COG コンデンサを選定します。
- ゲイン設定抵抗  $R_g$  には、 $0.1\%$   $20\text{ppm}/^\circ\text{C}$ の薄膜抵抗を使用します。この抵抗の誤差とドリフトがゲイン誤差とゲインドリフトに直結します。
- [プレジジョン ラボ シリーズ:A/D コンバータ \(ADC\) トレーニング ビデオ シリーズ](#)では、電荷バケツ回路の  $R_{\text{filt}}$  と  $C_{\text{filt}}$  を選択する方法について解説しています。この件の詳細については、『[Introduction to SAR ADC Front-End Component Selection](#)』を参照してください。

## 部品選定

- 出力振幅を  $0.2\text{V} \sim 4.8\text{V}$  に設定する計装アンプのゲイン設定抵抗を求めます。

$$\text{Gain} = \frac{V_{\text{out\_max}} - V_{\text{out\_min}}}{V_{\text{in\_max}} - V_{\text{in\_min}}} = \frac{4.9\text{V} - 0.2\text{V}}{5\text{mV} - (-10\text{mV})} = 306.7$$

$$\text{Gain} = 1 + \frac{49.4\text{k}\Omega}{R_g}$$

$$R_g = \frac{49.4\text{k}\Omega}{\text{Gain} - 1.0} = \frac{49.4\text{k}\Omega}{(306.7) - 1.0} = 151.6\Omega \text{ or } 162\Omega \text{ for standard } 0.1\% \text{ resistor}$$

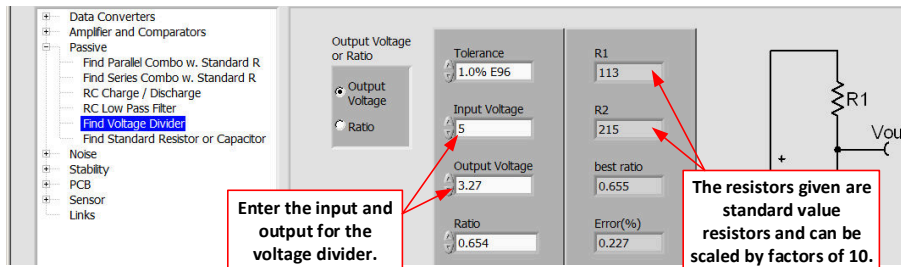
- 出力振幅を適切な電圧レベルにシフトする INA826 の基準電圧 ( $V_{\text{ref}}$ ) を求めます。

$$V_{\text{out}} = \text{Gain} \cdot V_{\text{in}} + V_{\text{ref\_INA}}$$

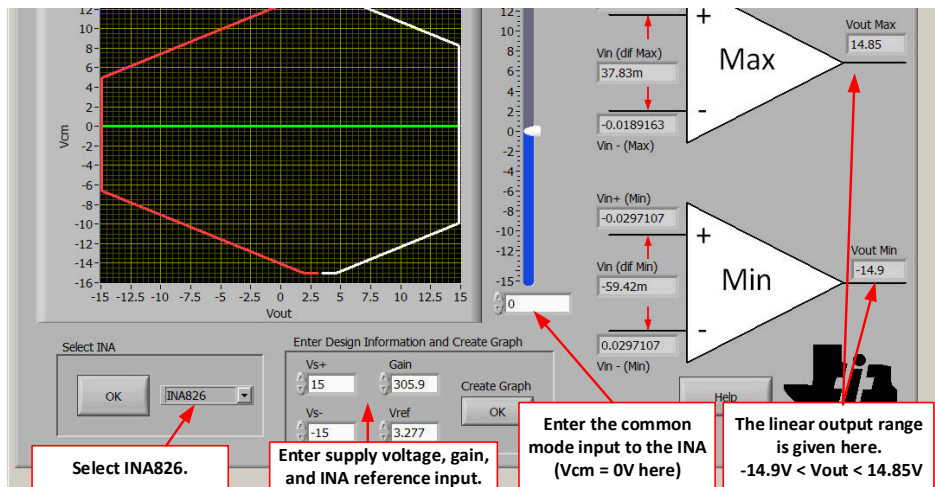
$$V_{\text{ref\_INA}} = V_{\text{out}} - \text{Gain} \cdot V_{\text{in}} = 4.8\text{V} - \left(1 + \frac{49.4\text{k}\Omega}{162\Omega}\right) \cdot (5\text{mV}) = 3.27\text{V}$$

- INA826 の基準電圧 ( $V_{\text{ref\_INA}} = 3.27\text{V}$ ) を設定する標準値抵抗を選定します。「[アナログ技術者向けカリキュレータ](#)」(「[PassiveFind Voltage Divider](#)」)を使用して、分圧器の標準値を求めます。

$$V_{\text{ref\_INA}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{in\_div}} = \frac{21.5\text{k}\Omega}{11.3\text{k}\Omega + 21.5\text{k}\Omega} \cdot (5\text{V}) = 3.277\text{V}$$

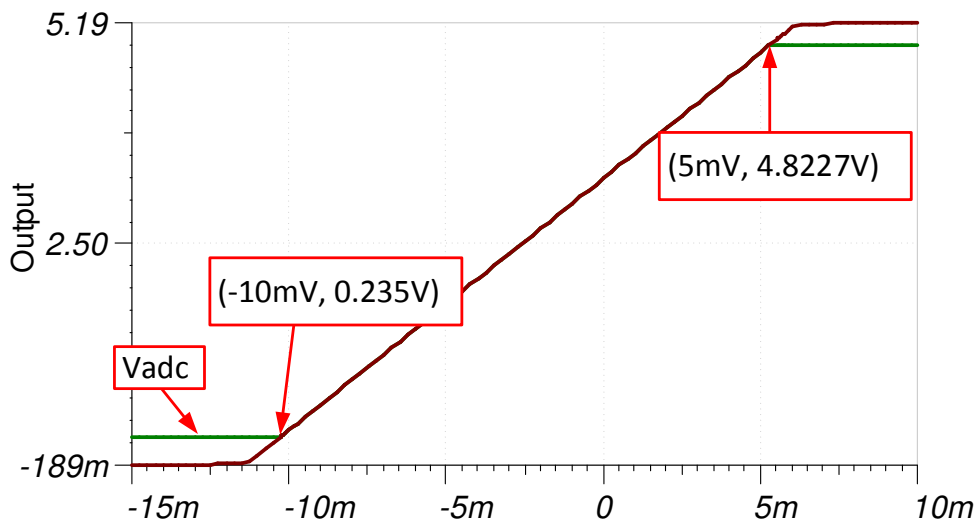


4. 「計装アンプの同相入力電圧範囲を計算」を使用して、INA826 が同相電圧範囲を逸脱しているかどうか判断します。



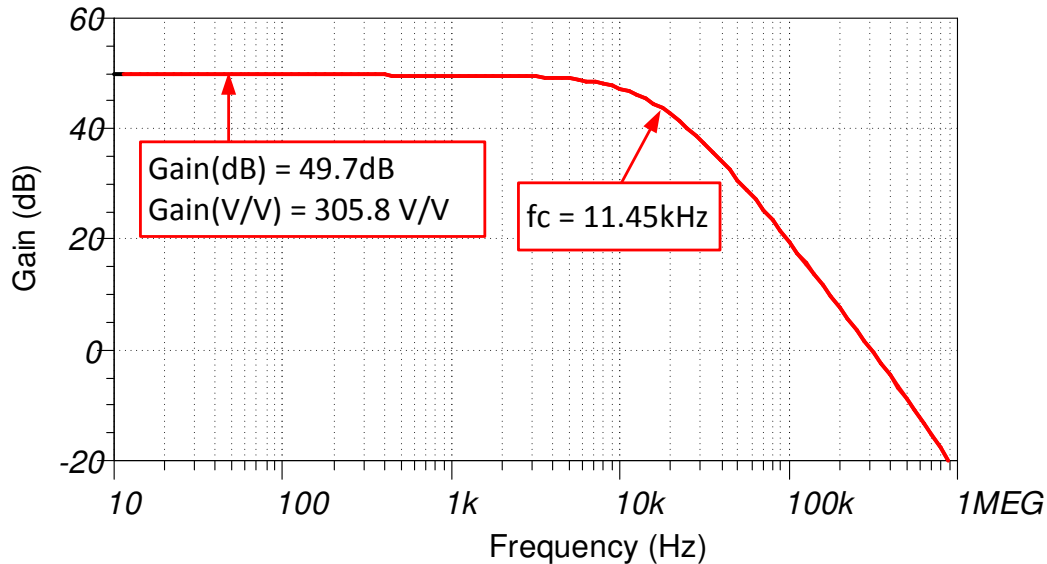
### DC 伝達特性

以下のグラフは、 $-5\text{mV} \sim +15\text{mV}$  の入力に対する線形出力応答を示しています。この件の詳しい理論については、『計装アンプ使用時の SAR ADC の線形範囲の決定』を参照してください。INA826 の出力がオペアンプの入力電圧範囲を超えた場合には、ESD ダイオードがオンになり、入力を制限します。抵抗 R3 が入力電流を制限してアンプを損傷から守ります（「計装アンプ-オペアンプ間の過電圧保護フィルタ」を参照）。オペアンプの出力は ADS8860 の絶対最大定格の範囲内に収まっています ( $-0.3\text{V} < V_{\text{IN}} < \text{REF} + 0.3\text{V}$ )。



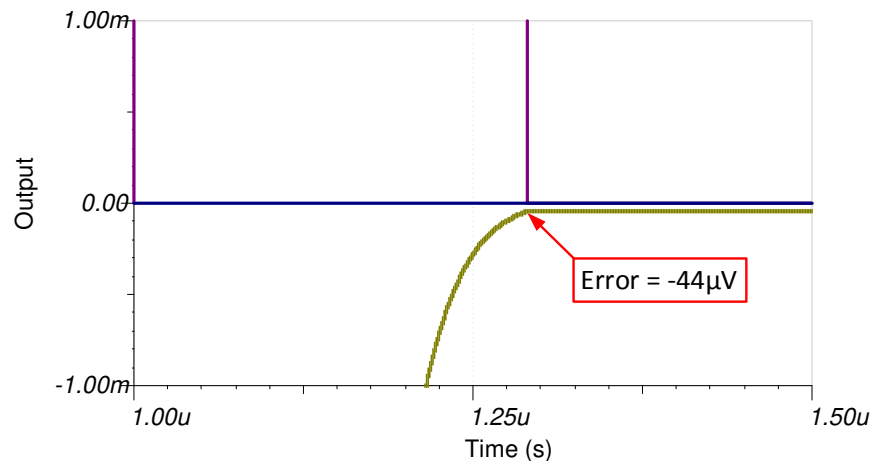
## AC 伝達特性

この構成での帯域幅のシミュレーション結果は 11.45kHz です。この帯域幅では、SAR コンバータを最高速度で駆動できません。この件の詳細については、TI プレゼンテーション ラボ ビデオ シリーズの『Op Amps:Bandwidth 1』(英語) を参照してください。



## ADC 過渡入力電圧セトリング シミュレーション

OPA320 バッファ(20MHz)を使用する理由は、ADC8860 における電荷のキックバックによる急激な過渡事象に応答する能力があるからです。このようなシミュレーションは、サンプル/ホールド キックバック回路が適正に選定されていることを示します。この件の詳しい理論については、『Introduction to SAR ADC Front-End Component Selection』を参照してください。



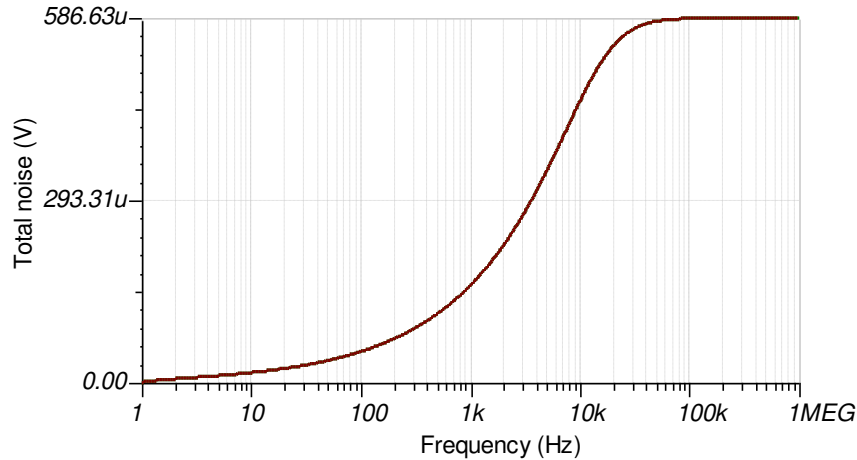
## ノイズ シミュレーション

簡易なノイズ計算を用いて概算します。計装アンプが高ゲインであることから、そのノイズが支配的になるため、OPA192 のノイズは無視します。

$$E_n = Gain \cdot \sqrt{e_{NI}^2 + \left(\frac{e_{NO}}{Gain}\right)^2} \cdot \sqrt{K_n \cdot f_c}$$

$$E_n = (305.8) \cdot \sqrt{\left(18nV / \sqrt{Hz}\right)^2 + \left(\frac{110nV / \sqrt{Hz}}{305.8}\right)^2} \cdot \sqrt{1.57 \cdot (11.45kHz)} = 738\mu V / \sqrt{Hz}$$

計算結果とシミュレーション結果はよく一致しています。アンプノイズ計算の詳しい理論については、『TI Precision Labs - Op Amps: Noise 4』(英語)を、データコンバータのノイズについては『Calculating the Total Noise for ADC Systems』(英語)を参照してください。

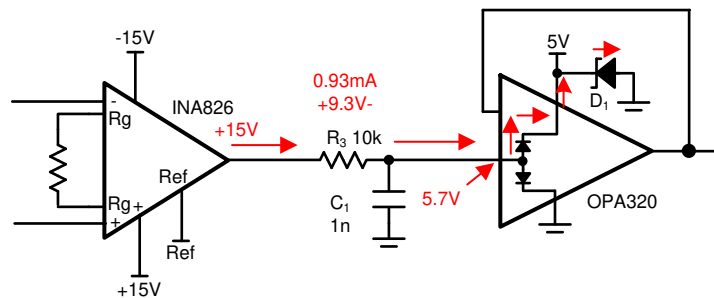


### 計装アンプ-オペアンプ間の過電圧保護フィルタ

INA826 と OPA320 の間のフィルタは 2 つの目的を果たします。1 つは OPA320 を過電圧から保護すること、もう 1 つはノイズまたはアンチエイリアシングフィルタとして動作することです。通常状態で出力が OPA320 の範囲内 (すなわち 0V ~ 5V) に収まるように INA826 のゲインを増減します。このため、通常、OPA320 の入力に印加される過電圧信号は確認されません。ただし、電源投入時やセンサ切断時には、INA826 の出力がいずれかの電源レール (すなわち ±15V) に達することがあります。過電圧の場合には、抵抗 (R<sub>3</sub>) が OPA320 に流れ込む電流を制限して保護します。過電圧事象に際しては OPA320 に内蔵されている ESD ダイオードがオンになり、過電圧信号を正 / 負電源に送ります。以下の例では、過電圧信号が正電源に送られ、過渡電圧サプレッサ (D<sub>1</sub>, SMAJ5.0A) がオンになって電流をシンクしています。抵抗値を増やして、OPA320 の絶対最大入力電流 (10mA) まで電流を制限しています。この件の詳細については、『TI Precision Labs - Op Amps: Electrical Overstress (EOS)』を参照してください。

$$R_3 > \frac{V_{INA} - V_{OpaSupply} - 0.7V}{I_{ABS\_MAX\_OPA}} = \frac{15V - 5.0V - 0.7V}{10mA} = 9.3k\Omega \text{ choose } 10k\Omega \text{ for margin.}$$

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot f_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (10k\Omega) \cdot (15kHz)} = 1.06nF \text{ or } 1nF \text{ standard value}$$



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

## オプションの入力フィルタ

以下の図は、よく使用されている計装アンプの入力フィルタを示しています。差動ノイズは  $C_{dif}$  でフィルタ処理され、同相ノイズは  $C_{cm1}$  および  $C_{cm2}$  でフィルタ処理されます。なお、 $C_{dif} \geq 10C_{cm}$  とすることを推奨します。これにより、部品の許容差が原因で同相ノイズが差動ノイズに変換されるのを防止できます。以下のフィルタは、15kHz の差動カットオフ周波数に設計されています。

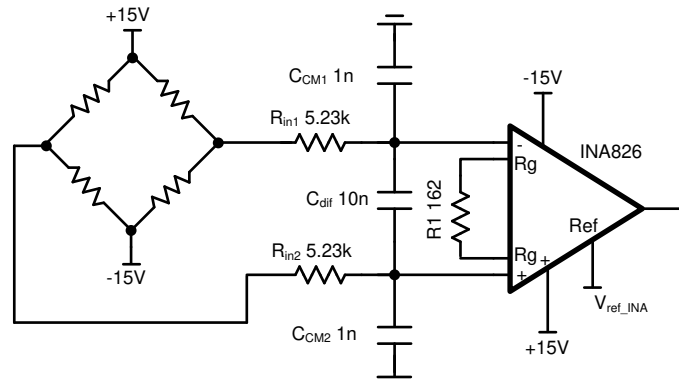
$$\text{Let } C_{dif} = 1\text{nF and } f_{dif} = 15\text{kHz}$$

$$R_{in} < \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot f_{dif} \cdot C_{dif}} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot (15\text{kHz}) \cdot (1\text{nF})} = 5.305\text{k}\Omega \text{ or } 5.23\text{k}\Omega \text{ for 1\% standard value}$$

$$C_{cm} = \frac{1}{10} \cdot C_{dif} = 100\text{pF}$$

$$f_{cm} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{in} \cdot C_{cm}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (5.23\text{k}\Omega) \cdot (100\text{pF})} = 304\text{kHz}$$

$$f_{dif} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot R_{in} \cdot \left( C_{dif} + \frac{1}{2} C_{cm} \right)} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot (5.23\text{k}\Omega) \cdot \left( 1\text{nF} + \frac{1}{2} \cdot 100\text{pF} \right)} = 14.5\text{kHz}$$



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

## 使用デバイス

デバイス	主な特長	リンク	類似デバイス
<a href="#">ADS8860</a>	分解能: 16 ビット、SPI、サンプルレート: 1Msps、シングルエンド入力、Vref 入力電圧範囲: 2.5V ~ 5.0V	<a href="#">シングルエンド入力、SPI 搭載、デジタイゼーション対応、16 ビット、1MSPS、1 チャンネル SAR ADC</a>	<a href="#">高精度 ADC</a>
<a href="#">OPA192</a>	帯域幅: 8kHz、レールツーレール出力、消費電流: 450nA、ユニティゲイン安定	<a href="#">高電圧、レールツーレール出力、5μV、0.2μV/°C、高精度オペアンプ</a>	<a href="#">高精度オペアンプ (Vos が 1mV 未満)</a>
<a href="#">INA826</a>	帯域幅 1MHz (G = 1)、低ノイズ 18nV/√Hz、低オフセット ±40μV、低オフセットドリフト ±0.4μV/°C、低ゲインドリフト 0.1ppm/°C (標準値)	<a href="#">高精度、200μA 消費電流、36V 電源の計装アンプ</a>	<a href="#">計装アンプ</a>

## 主要なファイルへのリンク

テキサス・インスツルメンツ、[SBAC184 用のソースファイル](#)、ソフトウェア サポート

## 商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 改訂履歴

資料番号末尾の英字は改訂を表しています。その改訂履歴は英語版に準じています。

---

### Changes from Revision A (March 2019) to Revision B (September 2024) Page

- 文書全体にわたって表、図、相互参照の書式を更新..... 1
- 

---

### Changes from Revision \* (February 2018) to Revision A (March 2019) Page

- タイトルを大文字から普通の表記にし、タイトルのロールを「データコンバータ」に変更。回路クックブックのランディング ページへのリンクを追加。..... 1
-

## 重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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 テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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ます。

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 テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツ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



## 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