参考資料

Application Note

完全差動アンプを使用したシグナル コンディショニング

Bill Xu, Georgia Guo, Wendy Wang

概要

ほとんどの電子エンジニアは、オペアンプを使用して加算器、アンプ、アクティブ フィルタなどのシグナル コンディショニング回路を設計することに習熟しています。ただし、完全差動アンプはあまり一般的ではありません。実際には、完全差動アンプも信号の加算、フィルタリング、電流 / 電圧変換などの機能を実行できます。特定のシナリオでは、信号処理に完全差動アンプを使用することで実際に回路設計が簡素化され、システム コストを削減できます。さらに、差動アンプ固有の特性により、完全差動アンプを利用した回路は本質的に優れたノイズ耐性を備えています。この記事では、シグナル コンディショニングに完全差動アンプを使用する方法を紹介します。

目次

1 概要.....2
1.1 完全差動アンプの基礎知識.....2
1.2 完全差動アンプの利点.....3
2 完全差動信号コンディショニング回路.....5
2.1 完全差動加算器回路.....5
2.2 シングルエンド入力完全差動加算回路.....7
2.3 完全差動電流 / 電圧変換回路.....8
2.4 完全差動アクティブ フィルタ回路.....9
3 まとめ.....11
4 参考資料.....12

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 概要

最新の電子システムでは完全差動アンプ (FDA) の使用が増えていますが、多くのエンジニアはその用途を、差動入力 ADC を駆動するためのシングルエンド入力信号から差動出力信号への変換や、差動回路内での差動増幅に限定しています。実際には、完全差動アンプは信号の加算、減算、アクティブ フィルタリング、電流 / 電圧変換なども実行できます。特定のシナリオでは、信号処理に完全差動アンプを使用することにより、従来のオペアンプに比べて明確な利点が得られます。たとえば、医療用超音波ドップラー画像処理システムでは、ドップラー偏移信号を受信および復調するために、アナログ フロント エンドに AFE58JD48 や AFE58JD28 などの AFE チップが 1 ～ 16 個組み込まれることがよくあります。得られるドップラー出力は、通常、差動電流信号です。システムでは、すべてのアナログ フロント エンド ユニットからのドップラー信号を加算してから高精度 ADC に入力し、デジタル信号に変換して後続の処理を行う必要があります。図 1-1 に、簡略図を示します。

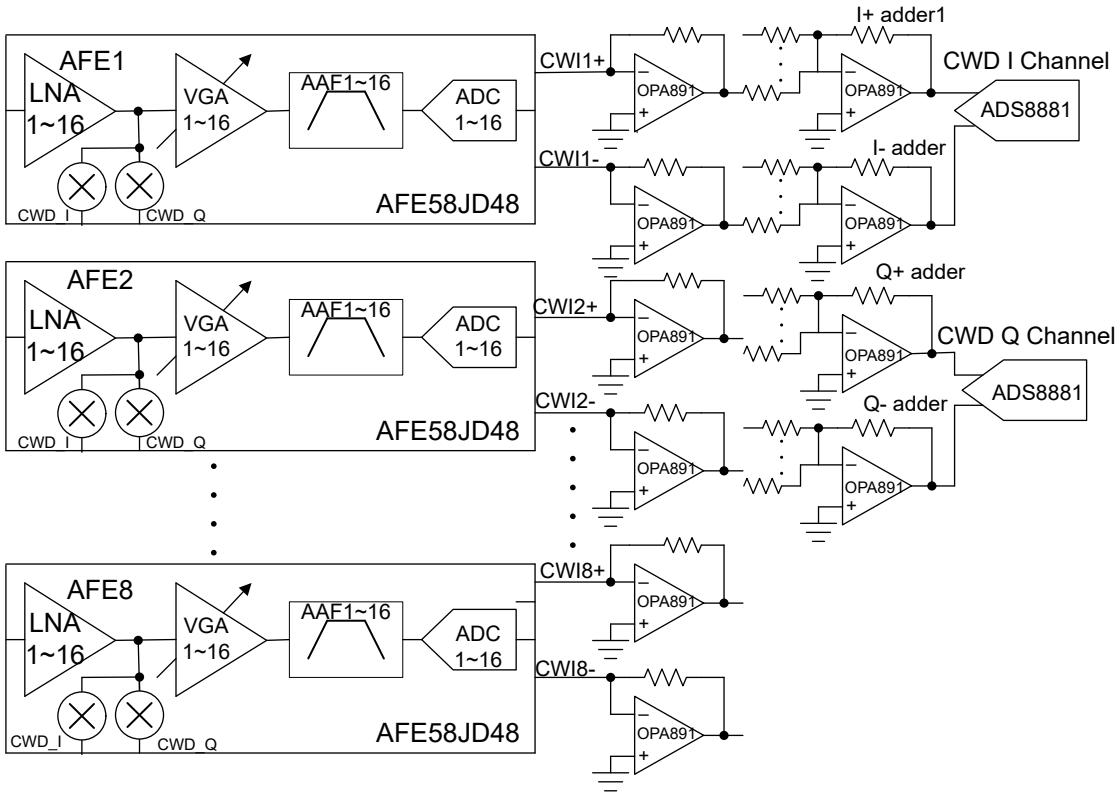


図 1-1. 超音波 CWD 画像処理システムの図

従来のアプローチでは、OPA2891 などの標準的な高精度オペアンプを使用して最初に電流信号を電圧信号に変換し、その後、高精度オペアンプを使用して信号の加算を行います。この方法では、128 チャネルの超音波画像処理システムに少なくとも 36 個のオペアンプが必要になり、選択したアナログ フロント エンドの受信チャネル数が 8 個のみの場合はさらに多くのオペアンプが必要になります。これに対し、信号処理に完全差動アンプを使用すると、わずか 2 個のデバイスで設計要件を満たすことができます。その結果、完全差動アンプを適切に使用することにより、回路設計の簡素化、システム性能の向上、およびシステム コストとプリント基板 (PCB) 面積の両方の削減が可能になります。

1.1 完全差動アンプの基礎知識

図 1-2 に、完全差動アンプを示します。オペアンプとは異なり、完全差動アンプには 2 つの出力端子があります。図 1-3 に完全差動アンプの代表的なアプリケーション回路を示します。差動アンプでは、式 1 に示すように、入力は非反転入力端子の電圧から反転入力端子の電圧を引いたものとして定義されます。式 2 に示すように、出力は非反転出力電圧から反転出力電圧を引いたものとして定義されます。式 3 に示すように、入力同相電圧は非反転入力端子と反転入力端子の電圧の和の半分として定義されます。同様に、式 4 に示すように、出力同相電圧は非反転出力端子と反転出力端子の電圧の和の半分として定義されます。

$$v_{id} = (V_{IN+} - V_{IN-}) \ldots . . (1) \quad (1)$$

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

$$v_{od} = \left(V_{output+} - V_{output-}\right) \ldots\ldots (2) \quad (2)$$

$$v_{ic} = \frac{\left(V_{IN+} + V_{IN-}\right)}{2} \ldots\ldots \left(3\right) \quad (3)$$

$$v_{oc} = \frac{\left(V_{output+} + V_{output-}\right)}{2} \ldots\ldots \left(4\right) \quad (4)$$

完全差動アンプの開ループ伝達関数を a(f) とすると、入力電圧と出力電圧の関係は式 5 のようになります。

$$v_{od} = a_{(f)} \times v_{id} \left(5\right) \quad (5)$$

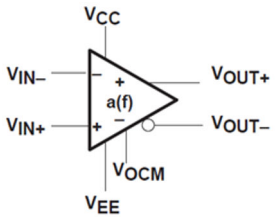


図 1-2. 完全差動アンプ

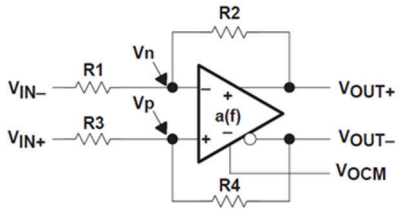


図 1-3. FDA を使用した代表的な増幅回路

図 1-4 に示すように、完全差動アンプでは、内部同相電圧が帰還モードで動作するように設計されているため、出力同相電圧は実際のチップでユーザーが設定した出力同相電圧と常に等しくなります。式 6 を参照してください。

$$V_{OC} = V_{OCM} \ldots\ldots (6) \quad (6)$$

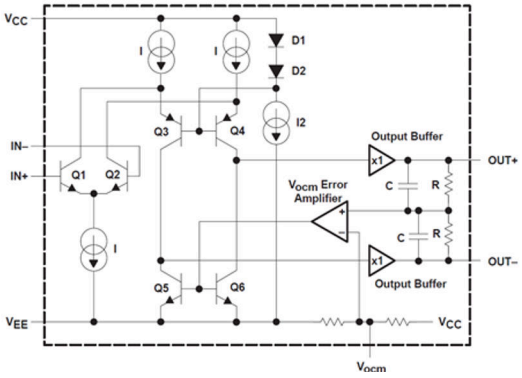


図 1-4. 完全差動アンプの概略図

1.2 完全差動アンプの利点

完全差動アンプの主な利点は次のとおりです。

- 強力な干渉防止機能

完全差動回路に影響を与える干渉を v_n とすると、出力電圧は次のようになります

$$v_{od} = k((v_{in+} + v_n) - (v_{in-} + v_n)) = k(v_{in+} - v_{in-}) \ldots\ldots (7) \quad (7)$$

出力信号から干渉信号が除去されていることがわかります。

- 同じ電源電圧で出力電圧範囲が 2 倍になる

完全差動アンプが対称な両電源で動作していると仮定すると、一方の出力電圧が最大値のときに他方の出力電圧が最小値になり、その逆も同様であるため、次の式が成り立ちます。

English Document: SDAA561
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

$$V_{EE} \le V_{output+} \le V_{cc} \ldots\ldots (8) \quad (8)$$

$$V_{cc} \ge V_{output-} \ge V_{EE} \ldots\ldots (9) \quad (9)$$

$$V_{EE} - V_{cc} \le V_{output+} - V_{output-} \le V_{cc} - V_{EE} \ldots\ldots (10) \quad (10)$$

同じ電圧条件下で、出力電圧のダイナミック レンジが 2 倍になっていることがわかります。

- 偶数次高調波歪み性能の向上

出力電圧に歪みが存在すると仮定すると、非反転出力端子と反転出力端子の電圧は次の式で与えられます。

$$V_{output+} = k_1 V_{in} + k_2 V_{in}^2 + k_3 V_{in}^3 + \ldots\ldots\ldots (11) \quad (11)$$

$$V_{output-} = k_1 (-V_{in}) + k_2 (-V_{in})^2 + k_3 (-V_{in})^3 + \ldots\ldots\ldots (12) \quad (12)$$

出力電圧は次のようになります

$$V_{od} = V_{output+} - V_{output-} = 2k_1 V_{in} + 2k_3 V_{in}^3 + \ldots\ldots\ldots (13) \quad (13)$$

出力電圧に偶数次高調波歪みが含まれていないことがわかります。

- 低 EMI、低干渉。

完全差動信号の 2 本の信号線は互いに近接して配線され、逆位相であるため、2 本の配線からの外部電磁放射は非常に小さくなります。他の信号への干渉が少なくなります。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 完全差動信号コンディショニング回路

上記の簡単な紹介により、差動アンプの基本的な理解が得られました。オペアンプの場合と同様に、フィードバックの作用により、完全差動アンプの非反転入力の電圧が反転入力の電圧と等しくなることが確認できます。この原理を使用して、回路の出力と入力の関係を特定できます。さらに、実際の設計では、計算を簡単にするために、完全差動アンプの 2 つの帰還抵抗には通常同じ値を選択します。

2.1 完全差動加算器回路

完全差動加算器回路を 図 2-1 に示します。ここでは例として THS4551 完全差動アンプを使用しています。ただし、ユーザーは特定の設計において他の完全差動アンプを容易に使用して、同様の機能を実現できます。THS4551 は、超音波ドップラー信号処理向けに TI が推奨する完全差動アンプであり、低ノイズ、高帯域、極めて低い出力オフセット電圧などの利点を備えています。V1 と V3 を差動信号 1、V2 と V4 を差動信号 2 とします。非反転端子と反転端子にキルヒホッフの電流則を適用すると、式 14 と式 15 が得られます。

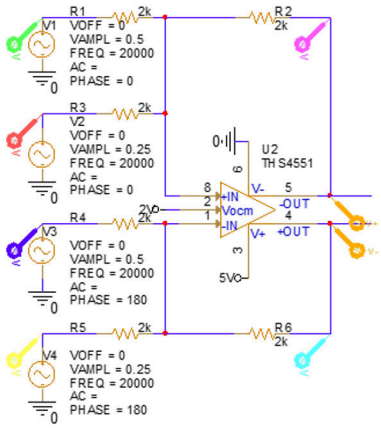


図 2-1. 完全差動アンプをベースとした電圧加算回路

$$\frac{V_1 - V_{IN+}}{R_1} + \frac{V_2 - V_{IN+}}{R_3} = \frac{V_{IN+} - V_{Out-}}{R_2} \ldots\ldots (14) \quad (14)$$

$$\frac{V_3 - V_{IN-}}{R_4} + \frac{V_4 - V_{IN-}}{R_5} = \frac{V_{IN-} - V_{Out+}}{R_6} \ldots\ldots (15) \quad (15)$$

フィードバックにより、$V_{IN+} = V_{IN}$ となります。同時に、計算を簡単にするため、すべての抵抗の抵抗値を等しくします。これにより、式 16 が得られます。

$$V_{out} = V_{out+} - V_{out-} = (V_1 - V_3) + (V_2 - V_4) \ldots\ldots (16) \quad (16)$$

この回路が入力差動信号を加算する機能を実行していることがわかります。シミュレーション結果を 図 2-2 に示します。入力信号が v1 = 0.5V、V2 = 0.25V、V3 = -0.5V、V4 = -0.25V の場合、期待される出力電圧は 1.5V です。シミュレーションでは、出力電圧が 1.5V の正弦波になることが示されています。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

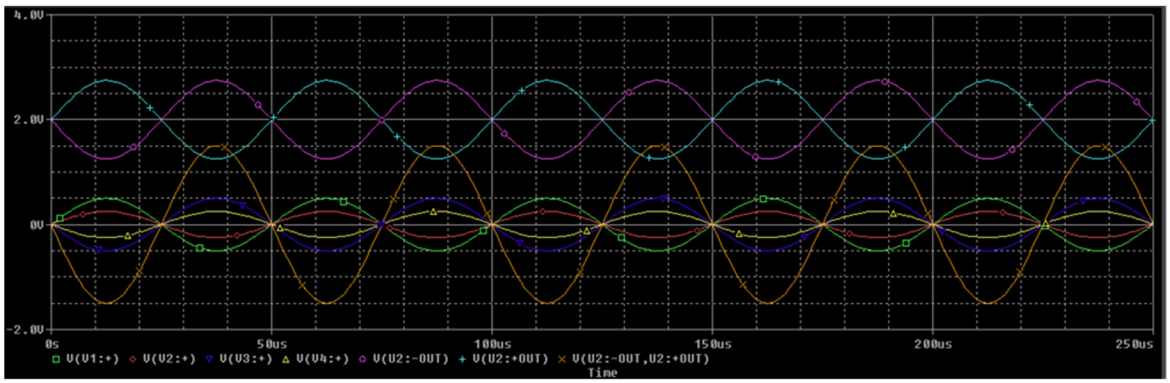


図 2-2. FDA をベースとした電圧加算器のシミュレーション結果

設計者は、抵抗値が等しくない条件下での加算回路の計算式も容易に導出できます。導出プロセスはまったく同様であるため、ここでは繰り返しません。ただし、一般に、差動アンプの非反転端子と反転端子の入力抵抗、および 2 つの帰還抵抗は一致させる必要がある点に注意してください。これにより、計算式がより簡単になります。対応する入力抵抗が等しくない場合、得られる計算式はより複雑になります。

同様に、入力信号が電流信号である場合 (図 2-3 に示すように、I1 と I3 が差動信号 1 を構成し、I2 と I4 が差動信号 2 を構成する場合)、キルヒホッフの電流則を使用して式 17 と式 18 を導出できます。

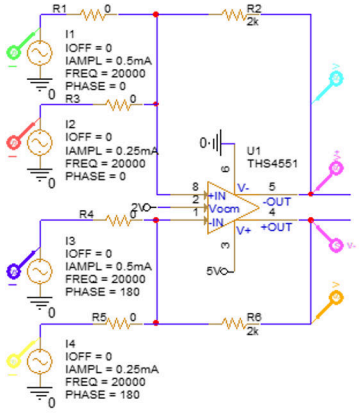


図 2-3. 完全差動アンプをベースとした電流加算回路

$$V_{IN+} - v_{out-} = (I_1 + I_2) \times R_2 \ldots\ldots (17) \quad (17)$$

$$V_{IN-} - v_{out+} = (I_3 + I_4) \times R_6 \ldots\ldots (18) \quad (18)$$

フィードバックにより、$V_{IN+} = V_{IN-}$ となります。同時に、計算を簡単にするため、$R_2 = R_6$ に設定します。これにより、式 19 が得られます。

$$v_{out} = (v_{out+} - v_{out-}) = ((I_1 - I_3) + (I_2 - I_4)) \times R_2 \ldots\ldots (19) \quad (19)$$

したがって、完全差動アンプは電流加算も実行できます。図 2-4 および 図 2-5 にシミュレーション結果を示します。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

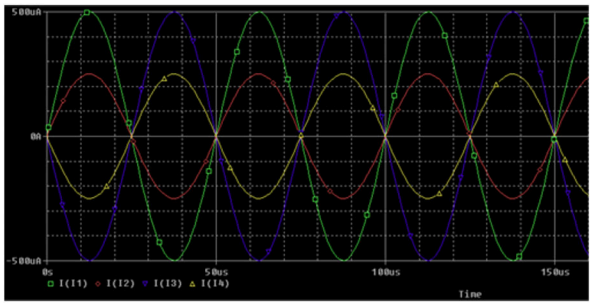


図 2-4. 入力電流

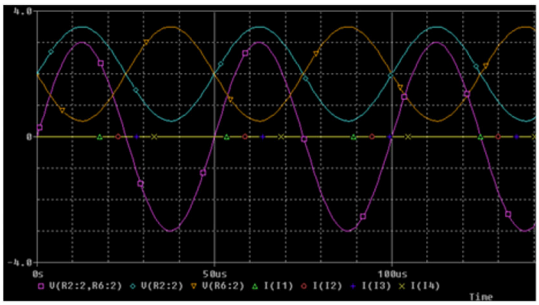


図 2-5. 出力電圧

2.2 シングルエンド入力完全差動加算回路

図 4 において、V3 と V4 を 0V に設定すると、完全差動入力信号はシングルエンド入力信号になります。この場合、抵抗 R8 と R11 は並列になるため、設計者はこれらを 1 つの等価抵抗に置き換えることができます。これにより、完全差動加算器は、図 2-6 に示すような反転シングルエンド信号加算器になります。

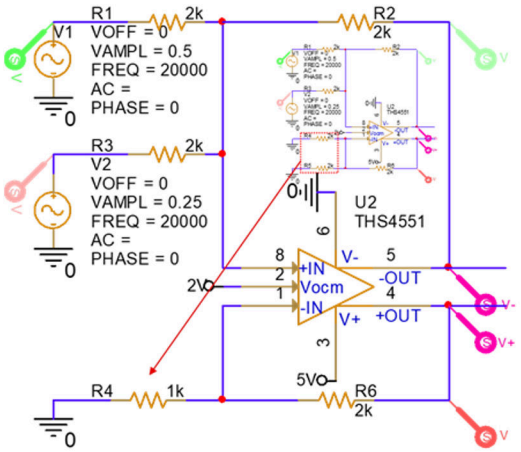


図 2-6. 差動アンプをベースとしたシングルエンド信号加算器

回路解析プロセスは完全差動加算回路の場合と同じであり、同様に式 20 と式 21 を得ることができます。

$$\frac{V_1 - V_{IN+}}{R_1} + \frac{V_2 - V_{IN+}}{R_3} = \frac{V_{IN+} - V_{Out-}}{R_2} \ldots\ldots (20) \quad (20)$$

$$\frac{0 - V_{IN-}}{R_4} = \frac{V_{IN-} - V_{Out+}}{R_6} \ldots\ldots (21) \quad (21)$$

式 20 と式 21 から、次の式が得られます。

$$v_{out} = v_{out+} - v_{out-} = v_1 + v_2 \ldots\ldots (22) \quad (22)$$

シミュレーション結果は次のとおりです。

English Document: SDAA561
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

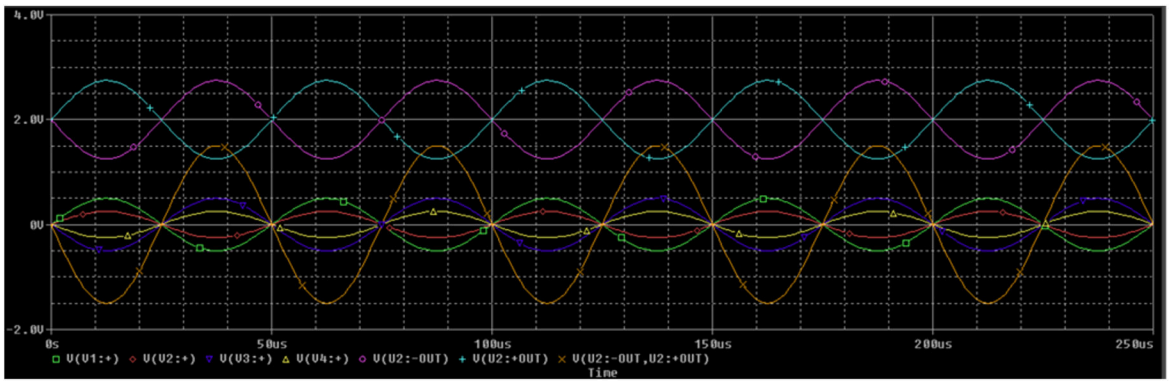


図 2-7. シングルエンド信号加算器のシミュレーション結果

2.3 完全差動電流 / 電圧変換回路

光通信および眼科用 OCT システムでは、フォトダイオード (PD) からの出力は通常微弱な電流信号であり、電子システムでは一般に、後続の処理のためにこの電流信号を電圧信号に変換する必要があります。回路の感度を高めるために、設計者はフロント エンド回路として完全差動アンプを採用し、PD の出力電流を差動電圧に直接変換できます。この回路構成を、図 2-8 に示します。このような回路を設計する際は、システム誤差を減らすためにアンプのバイアス電流を最小限に抑えることが望まれます。THS4567 は、20pA という低いバイアス電流を特長とし、このアプリケーションに最適な完全差動アンプです。

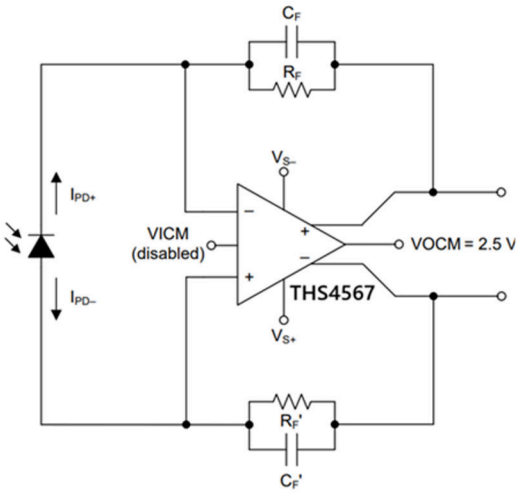


図 2-8. 回路構成

PD の電流を IPD とすると、非反転端子と反転端子のそれぞれについて次の式が成り立ちます。

$$v_{IN-} - v_{out+} = -I_{PD} \times R_F \ldots\ldots(23) \quad (23)$$

$$v_{IN+} - v_{out-} = I_{PD} \times R_F \ldots\ldots(24) \quad (24)$$

式 23 と式 24 から、次の式が得られます。

$$v_{out} = v_{out+} - v_{out-} = 2I_{PD} \times R_F \ldots\ldots(25) \quad (25)$$

式 25 に示すように、TIA 回路として差動アンプを使用するとシステムの感度が 2 倍になり、信号対雑音比の向上に役立ちます。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2.4 完全差動アクティブ フィルタ回路

実際の回路設計では、図 2-9 に示すように、システムの信号対雑音比を向上させてノイズや干渉を除去するために、完全差動アンプにアクティブ フィルタ機能を組み込む場合があります。

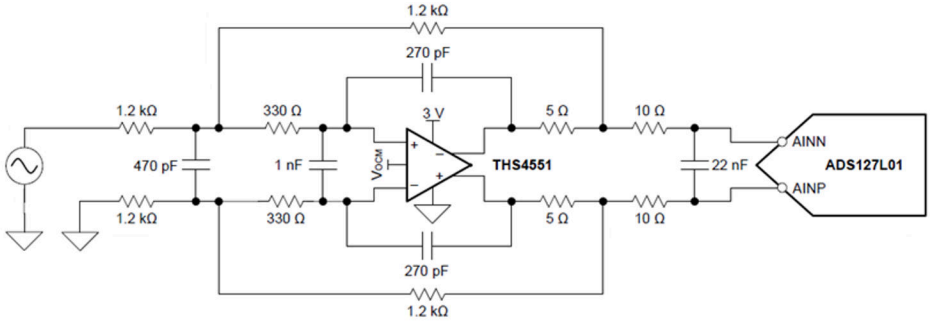


図 2-9. ADS127L01 への 500kHz 多重帰還フィルタ インターフェイス

図 2-9 に示す完全差動アクティブ フィルタの設計は、一般に次の 3 つのステップに分けられます。

- まず、図 2-10 に示すように、補助ソフトウェアやその他のツールを使用して、要件に従い標準オペアンプをベースとしたシングルエンド フィルタを設計します。
- 次に、図 2-11 に示すように、設計したシングルエンド フィルタのコピーを 2 つ作成し、各差動入力信号をフィルタリングします。
- 図 2-12 に示すように、標準オペアンプを差動アンプに置き換え、直列コンデンサまたは直列抵抗を組み込みます。

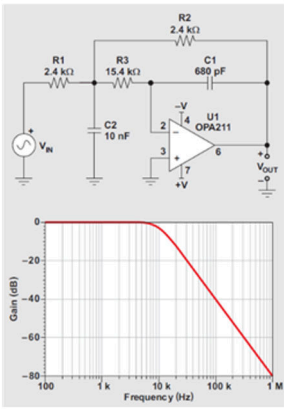


図 2-10. ステップ 1

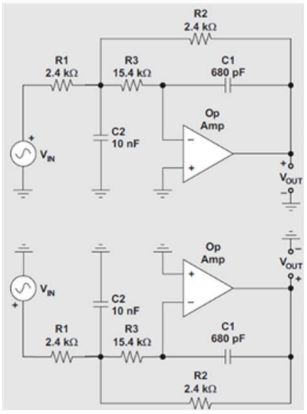


図 2-11. ステップ 2

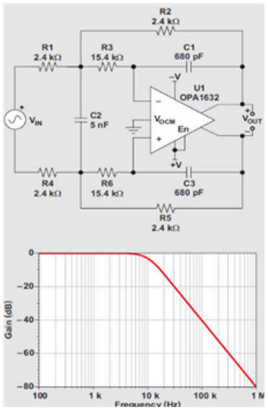


図 2-12. ステップ 3

English Document: SDAA561
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

前述の手順に従うことにより、目的の特性を備えた差動アクティブ フィルタが得られます。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 まとめ

この記事では、完全差動アンプの基本的な特性と、それに関連する信号処理回路について簡単に説明します。これらの回路を適切に使用することにより、システム設計を簡素化し、システム性能を向上させることができます。特に差動信号を扱う場合、これらの信号処理回路を適切に適用することにより、回路設計の簡素化、性能の向上、およびシステム コストの削減が可能になります。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 参考資料

- テキサス・インスツルメンツ、『完全差動アンプ』アプリケーション レポート
- テキサス・インスツルメンツ、『テキサス・インスツルメンツの超音波 AFE 向け連続波ドップラー シグナル チェーン設計』アプリケーション ノート
- テキサス・インスツルメンツ、『FDA と差動シグナリングの概要』ビデオ
- テキサス・インスツルメンツ、『完全差動アクティブ フィルタにおける無限ゲイン、MFB フィルタトポロジの使用』、アナログ アプリケーション ジャーナル
- テキサス・インスツルメンツ、THS4567、製品ページ
- テキサス・インスツルメンツ、OPA2891、製品ページ
- テキサス・インスツルメンツ、THS4551、製品ページ

Copyright © 2026 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 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