

Analog Engineer's Circuit

オーディオ DAC 用のアクティブ フィルタ回路



Paul Frost

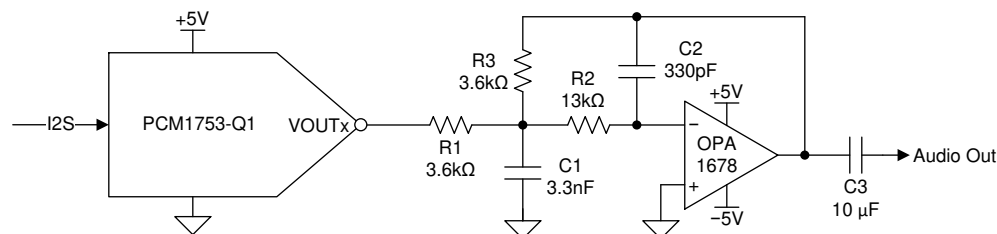
設計目標

フィルタ特性

フィルタ入力	カットオフ周波数	フィルタのゲイン
4V _{PP} , 1.42V _{RMS}	23kHz 時に -3dB	-1V/V, 0dB

設計の説明

この回路では、オーディオ デジタル / アナログ コンバータ (DAC) アプリケーション用 2 次アクティブ フィルタの実装を紹介します。車載ヘッドユニット、ホームシアターのサウンドバー、AV レシーバなどのアプリケーションでは、可聴範囲である約 20Hz~22kHz での不要ノイズは最小限になることが極めて重要です。この理由から、多くのデルタ - シグマタイプのオーディオ DAC には、ノイズシェーピング機能が搭載されており、DAC のオーバーサンプリング機能により生成されたノイズを可聴範囲の外側に追いやります。このプロセスを「ノイズシェーピング」と呼び、実際のノイズを「帯域外ノイズ」と呼びます。PCM1753-Q1 など多くの一般的なオーディオ DAC にはノイズシェーピング機能があり、帯域外ノイズをデジタル音源のサンプリングレート f_s の約 50% に追いやります。このノイズは一般に可聴とは見なされませんが、オーディオ DAC の出力に接続されるアンプ回路に悪影響を及ぼす可能性があります。たとえば、この帯域外ノイズが、より高い周波数で動作する Class-D アンプによりエイリアシングされ、可聴範囲に戻る可能性があります。さらに、フィルタ処理が実装されていない場合、このノイズにも出力アンプで同じアナログゲインが適用されます。2 次アクティブフィルタ設計では、単純な 1 次 RC フィルタよりも、可聴帯域幅のより近くで高レベルのノイズ減衰が可能です。さらに、フィルタに使用されているオペアンプの出力駆動能力により、システムのオーディオ出力のインピーダンスと電流駆動能力を、オーディオ DAC が供給できるものよりも、低くすることができます。



デザインノート

- 設計の f_c は、最低でも、オーディオシステムの一般的なサンプリングレート値である 44.1kHz に最適化されていることに注意してください。デルタ - シグマ変調器からの帯域外ノイズを減衰させるため、 f_c はサンプリングレートの約 50% にします。より高い周波数のサンプリングレートを使用する場合、カットオフ周波数を周波数ドメイン内でさらに外側に移動し、オーディオ DAC からの帯域幅を広くできます。
- すべてのオーディオ DAC に 2 次アクティブフィルタが必要なわけではありません。一部のオーディオ DAC はノイズシェーピングアーキテクチャが異なり、帯域外ノイズを可聴範囲からさらに遠くへ移動するため、単純な RC フィルタだけで不要ノイズを減衰できます。
- ほとんどのオーディオシステムには DC ブロッキングコンデンサが存在し、オーディオ出力をグランドセンターにできます。この設計では、ブロッキングコンデンサを DAC の出力に直接配置しますが、アンプにもわずかなオフセットが存在するため、コンデンサは一般にフィルタの出力、またはアクティブフィルタの後段のアンプまたはヘッドフォンドライバの入力に配置されます。

設計手順

1. DAC は、アプリケーションの要求に基づいて選択します。必要な信号対雑音比 (SNR)、全高調波歪み + ノイズ (THD+N)、サポートされる I2S インターフェイスのサンプリング レートを考慮します。ほとんどのオーディオ DAC は 16kHz~192kHz の範囲のサンプル レートをサポートしていますが、384kHz や 768kHz などのレートはサポートしていない場合もあります。サンプル レートが高いほど、ノイズ シェーピングで帯域外ノイズが可聴範囲から遠くなりますが、すべての音源がこれを行えるわけではありません。
2. この設計で選択しているアンプ (OPA1678) は CMOS 入力アンプです。CMOS 入力アンプは、JFET タイプのアンプと比べて、低い周波数でアンプ入力の電流ノイズが小さくなります。フィルタの入力抵抗値が大きいことから、電流ノイズは出力で電圧ノイズに変換されるため、電流ノイズが小さいアンプを選択することが重要です。
3. フィルタの抵抗および容量値は、-3dB ポイントが約 23kHz になるよう選択します。回路の f_c は、次の式で計算できます。

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R2 \cdot R3 \cdot C1 \cdot C2}}$$

4. フィルタには COG/NP0 タイプのセラミック コンデンサを使用する必要があります。COG、NP0 タイプのコンデンサは容量の電圧係数が小さく、コンポーネントの容量値がデバイスに印加される電圧バイアスによる影響を受けにくくなります。コンデンサはフィルタの性能を左右するため、他のタイプのセラミック コンデンサは信号パスに使わないようにします。
5. フィルタの抵抗素子には薄膜抵抗を推奨します。すべての抵抗には電圧ノイズが存在し、このノイズは次の最初の式に示すように、抵抗値と温度によって変化することがよく知られています。しかし、抵抗には電流ノイズも存在し、次の 2 番目の式に示すように、抵抗の両端の電圧、周波数、および定数 C に依存します。この定数は、抵抗の構成材料によって決定されます。

$$S_T = 4kRT$$

ここで、

- k はボルツマン定数
- R は抵抗
- T は温度

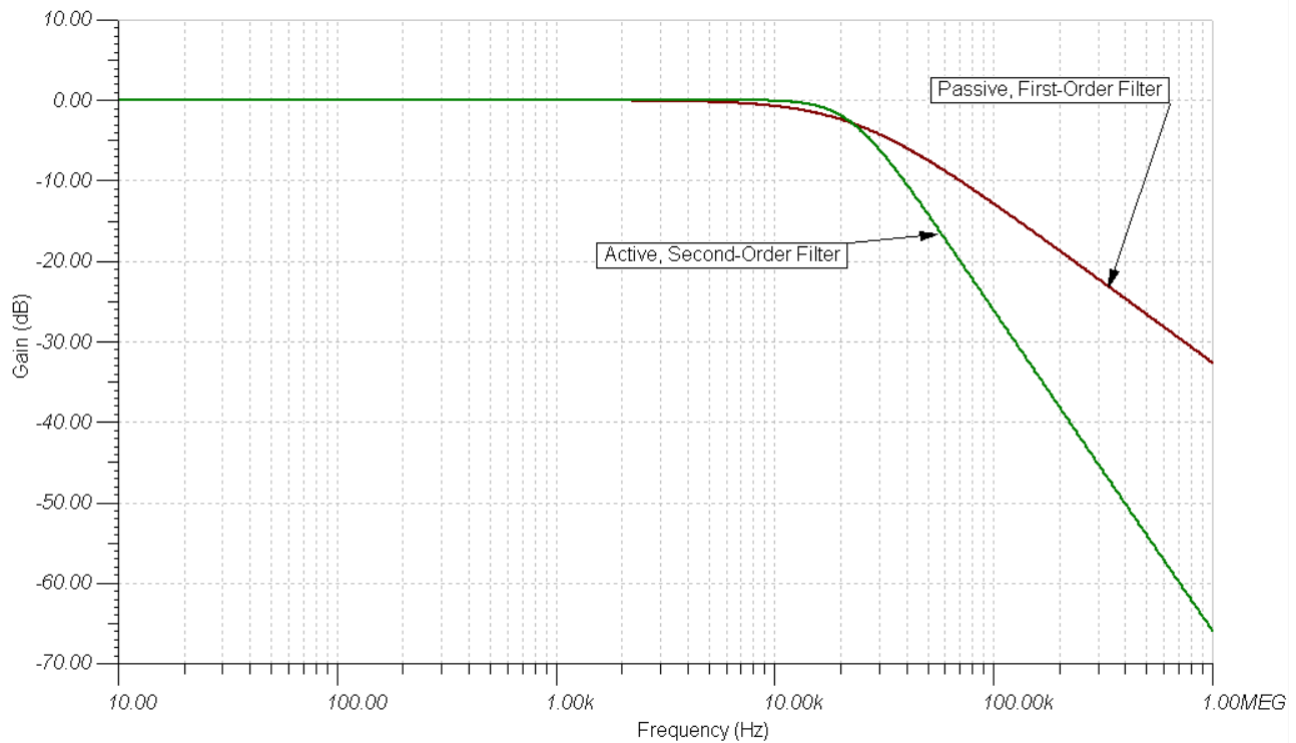
$$S_E = (C \times U^2) \div f$$

ここで、

- C は抵抗の材質で決まる定数
- U は抵抗の端子間電圧
- f は周波数

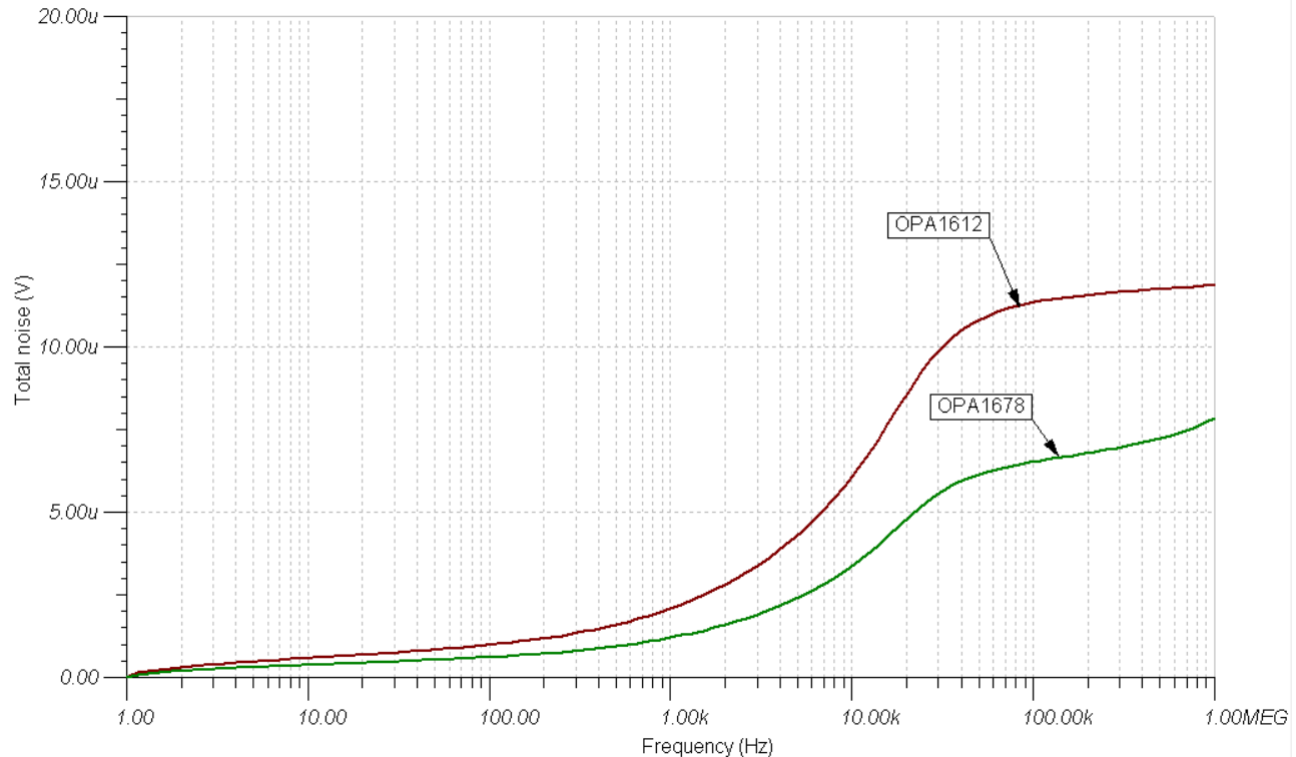
シミュレートされたフィルタ応答

次のグラフは、ほぼ同じ f_c を持つ 2 次アクティブ フィルタと、単純な 1 次 RC フィルタについて、フィルタ応答をシミュレーションしたものです。1 次フィルタではフィルタのロールオフは -20dB/decade 、アクティブ フィルタのロールオフは -40dB/decade であることに注意してください。



ノイズ性能のシミュレーション結果

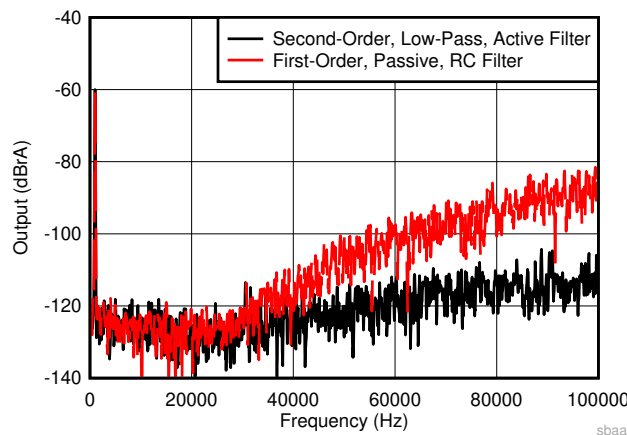
次のグラフは、回路のうち DAC を除く全ノイズ寄与分をシミュレーションしたものです。このシミュレーションに使用されている OPA1678 は 1kHz で $4.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、OPA1612 は 1kHz で $1.1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ であると規定されています。結果から、システムの電流ノイズの寄与分のため、OPA1612 のほうが電圧ノイズが低いにもかかわらず、OPA1678 よりも OPA1612 のほうが全ノイズが大きいたことが示されます。



出力スペクトラムの測定結果

DAC の出力を、2 次のアクティブ フィルタと 1 次の RC フィルタについて、周波数ドメイン内で測定したものです。DAC の出力は、サンプリング レート 48kHz で、1kHz の周波数において -60dB のフルスケール振幅に設定されています。

グラフから、帯域外ノイズは 24kHz の周りで増大し始めることが分かります。これは、PCM1753-Q1 のノイズ シェーピングから期待される結果です。2 次フィルタは RC フィルタと比較して、100kHz において約 20dB 出力が低くなっています。



使用デバイス

デバイス	主な特長	リンク	他の使用可能デバイス
PCM1753-Q1、 PCM1754-Q1 (1)	24 ビット、標準 SNR 106dB、標準 THD+N 0.002%、シングル エンド、電圧出力のオーディオ DAC	車載向け、106dB の SNR、ステレオ、D/A コンバータ (DAC) (ソフトウェア制御)	オーディオ DAC
OPA1678	低歪み、低ノイズ、低入力電流のオーディオ用デュアル オペアンプ	シングルチャネル、450nA、高精度、ナノワット オペアンプ	オーディオ オペアンプの概要

(1) PCM1753 と PCM1754 はほぼ同一の部品で、SPI 制御か HW 制御かのみが異なります。

設計の参照資料

テキサス・インスツルメンツ、[SBAM410 回路のソース ファイル](#)、ソフトウェア

その他のリンク:

テキサス・インスツルメンツ、[高精度 DAC 学習センター](#)、製品ラインアップの概要

テキサス・インスツルメンツ、[プレミアム オーディオ システムの設計](#)、ビデオ

テキサス・インスツルメンツ、[オーディオ DAC](#)、製品ラインアップの概要

商標

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

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