

オーディオ DAC 用のアクティブ・フィルタ処理回路

Paul Frost

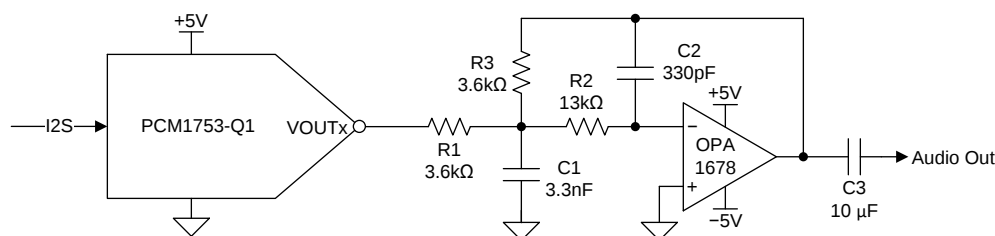
設計目標

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
$4V_{PP}$, $1.42V_{RMS}$	$-3dB$ (23kHz 時)	$-1V/V$, 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 の不要ノイズが最小限であ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・シェーピング手法が実装されており、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、ノイズ自体を「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

1. 設計の f_c は、最低でも、オーディオ・システムで一般的な値である 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。
2. 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できるため、単純な RC フィルタだけで不要ノイズを減衰できます。
3. 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 の出力に直接配置できますが、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 の範囲のサンプリング・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。サンプリング・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電流ノイズが小さくなります。フィルタは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。

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}}$$

4. フィルタのコンデンサには COG/NP0 タイプのセラミック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

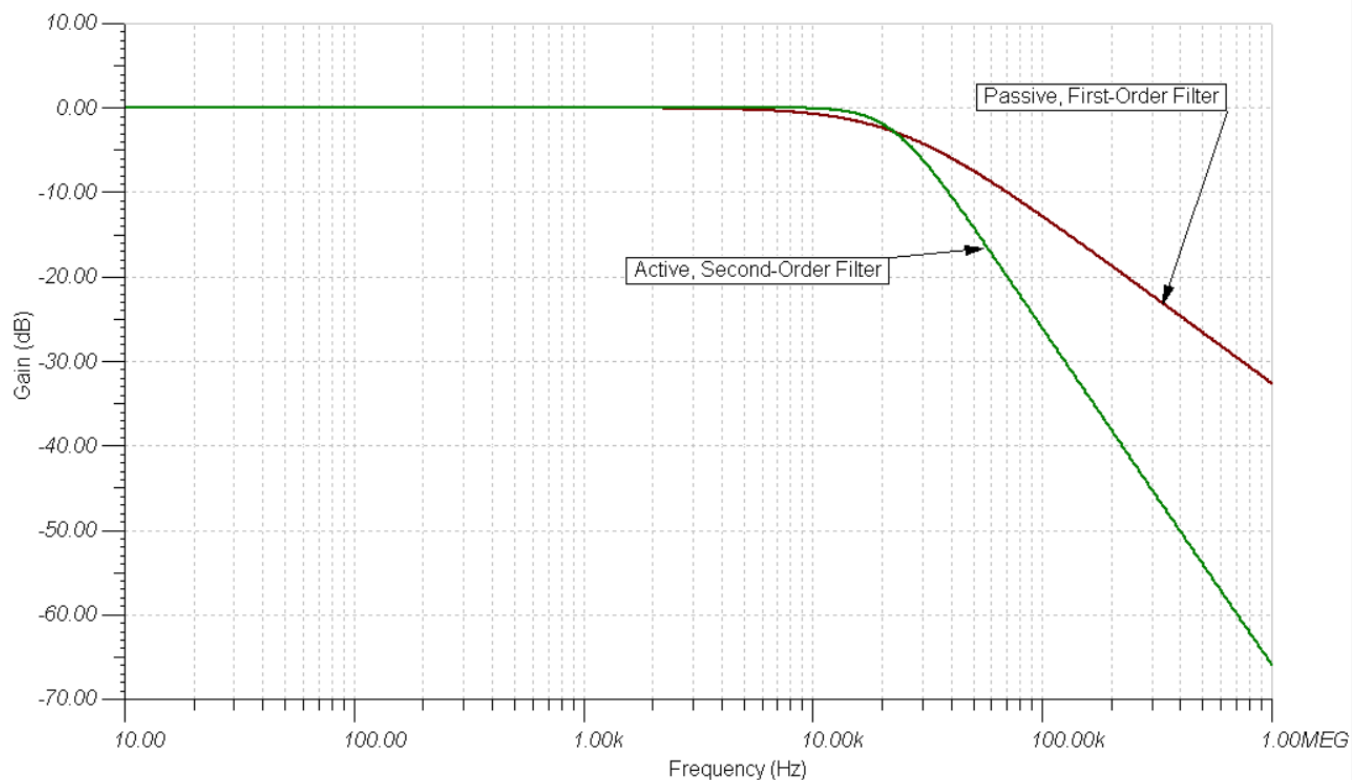
$$S_E = (C \times U^2) / f$$

ここで

- C は抵抗の材質で決まる定数
- U は抵抗の両端の差動電圧
- f は周波数

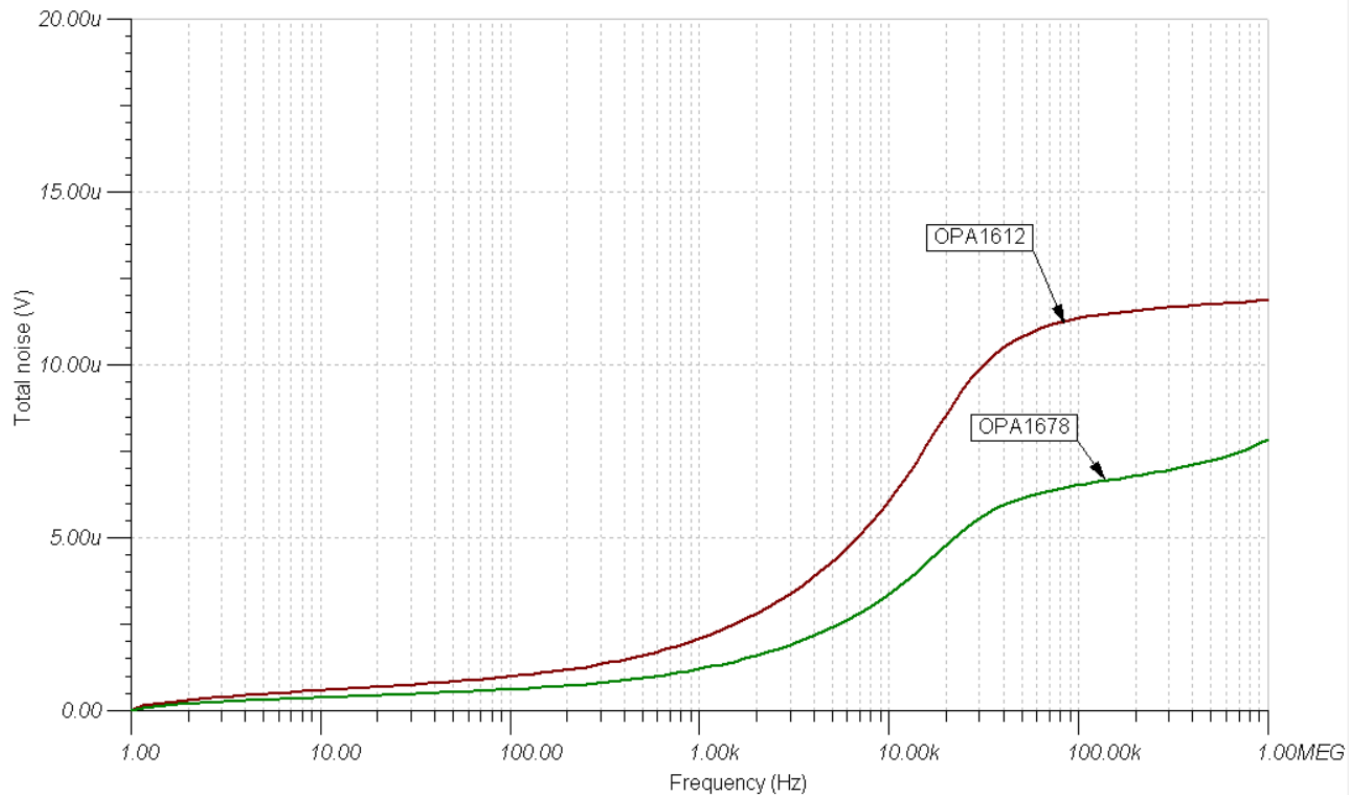
シミュレートされたフィルタ応答

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

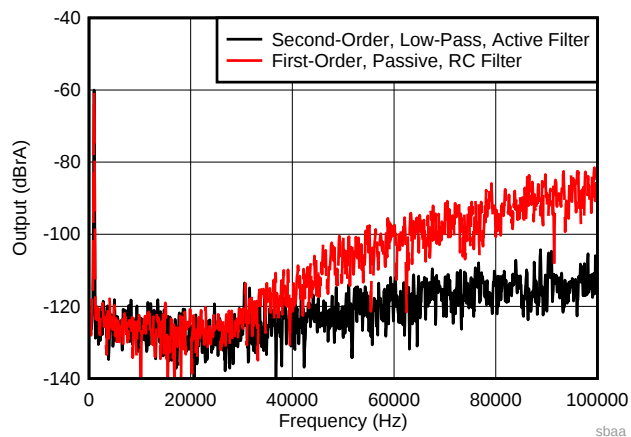
次のグラフは、回路のうち DAC 自体を除く全ノイズ寄与分をシミュレーションしたものです。このシミュレーションに使用されている OPA1678 は 1kHz で $4.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、OPA1612 は 1kHz で $1.1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ であると規定されています。結果から、システムの電流ノイズの寄与分のため、OPA1612 のほうが電圧ノイズが低いにもかかわらず、OPA1678 よりも OPA1612 のほうが全ノイズが大きいことが示されます。



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 の周辺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。



設計の参照資料

TIの総合的な回路ライブラリについては、「[アナログ・エンジニア向け回路クックブック](#)」を参照してください。

[この回路のソース・ファイル](#)

TI エンジニアから直接サポートを受けるには、**E2E** コミュニティをご利用ください。

e2e.ti.com

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	http://www.ti.com/product/PCM1753-Q1	テキサス・インスツルメンツ製のオーディオ 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	http://www.ti.com/product/OPA1678	オーディオ・オペアンプ概要

(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。

その他のリンク

弊社の[高精度 DAC ラーニング・センター](#)で、高精度 DAC の使用法について学習できます。

詳細については、『[Designing a Premium Audio System - TI Training](#)』（英語）をご覧ください。

TI のオーディオ DAC ポートフォリオや他の[技術資料](#)をご覧ください。

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が適用される各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、またはその他の要件を満たしていることを確実にする責任を、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 の販売約款 (<https://www.tij.co.jp/ja-jp/legal/terms-of-sale.html>)、または [ti.com](https://www.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。

日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ合同会社
Copyright © 2021, Texas Instruments Incorporated