

アプリケーションノート4422

専用集積回路を使ったアナログフィルタ設計

筆者: Joseph Shtargot, Strategic Applications Engineer
Alex Dean, Business Manager

要約: このアプリケーションノートはADC (アナログ-デジタルコンバータ)用のアンチエイリアスおよびノイズフィルタ、およびDAC (デジタル-アナログコンバータ)用の「再生」ポストフィルタ用のスイッチトキャパシタフィルタの進歩について説明します。このアプリケーションノートは連続時間アクティブフィルタに対するMAX74xxシリーズのユニークな利点を要約し、アプリケーション例を提供します。

同様の記事が「Electronic Products」の2009年10月号に掲載されました。

アナログフィルタは電子信号合成サブシステムにおいて重要な役割を果たし、ADC用のアンチエイリアスおよびノイズフィルタ、およびDAC用の再生ポストフィルタなどの機能を提供します¹。さまざまな設計仕様および要件が個々のフィルタ構成の使用に影響します。最も一般的なフィルタにはベッセル、バターワース、およびエリプティックがあります。

ベッセルローパスフィルタはリップルのない通過帯域と単調なロールオフを備えた線形位相応答を提供します。これらの特性のために、ベッセルフィルタは時間領域でのアプリケーションに最適です。バターワースローパスフィルタは通過帯域の周波数応答が最大に平坦で、ベッセルフィルタよりもずっと急峻な単調なロールオフを備えています。このフィルタの位相応答は周波数とともに非線型に変化します。これらの特性は振幅をベースとしたアプリケーションで問題になることはありません。最後にエリプティックローパスフィルタはほとんど平坦な通過帯域と極度に急峻なロールオフ特性を備えています。エリプティックフィルタは振幅ベースのアンチエイリアスアプリケーションに理想的です。

連続時間アクティブフィルタの設計と構造には非常に大きい設計問題があり、多くの一致した許容差の受動部品によって囲まれた複数の高性能オペアンプの使用を必要とします。設計課題には最適なフィルタ構成の選択およびフィルタ合成のための特別なソフトウェアの使用が含まれます²。より簡単な方法は高集積のSCF (スイッチトキャパシタフィルタ)の使用を含むことです。そのような回路によって部品点数の削減が可能でフィルタの調整およびシステム電力の微調整が簡素化されます。このアティクルでは最初に連続時間フィルタの使用、その次にSCF法としたフィルタ実現法を調査し、性能と複雑性の差を示します。

前に述べたように、各特性に従い、ベッセルフィルタは時間領域のアプリケーションに理想的です。それはオシロスコープ/アナライザタイプの測定において歪を持たないからです。しかし、完全な特性のフィルタのコストは設計者が高次のベッセルフィルタ(バターワースまたはエリプティックフィルタよりも多くのポールを備える)を構築し、適切なレベルの阻止帯域減衰を達成しなければなりません。

図1は5次の1.0kHzのローパスフィルタの回路図を示しています。この設計はサレン-キー方式に基づいており、最小の部品点数に最適化されており、1%の許容差の標準数値の抵抗と5%の許容差のセラミックコンデンサを使用します。各部品値を決定するために、設計はソフトウェアのFilterPro™を使用して行われ、シミュレーションツールのPSpiceを使用して評価しました。

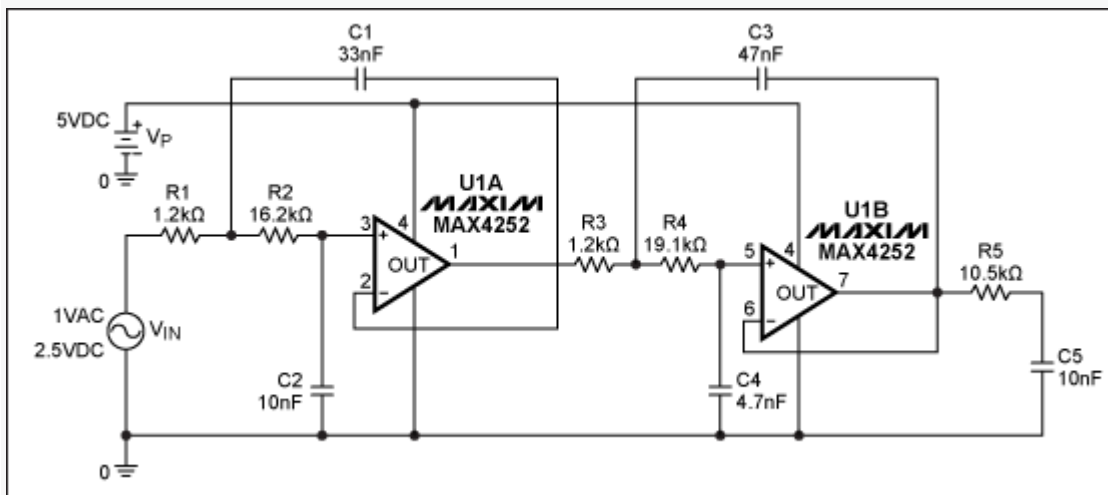


図1. 2つのオペアンプと多数の受動部品によってこの5次、1.0kHzのローパスベッセルフィルタが構成されました。

多くの場合、入力および出力のRCフィルタにはオペアンプバッファを追加することも必要で、特にそれは信号源インピーダンスが比較的大きく(数百Ω以上)、しかもフィルタ出力が比較的小さいインピーダンス(数百kΩ以下)に接続される場合です。

ベッセルフィルタ回路について実行されたSPICEシミュレーションが図2に示されています。これらの周波数応答のプロットは同じフィルタに対して100の異なる製造ビルドのモンテカルロを実行した結果です。SPICEシミュレータはランダムに部品値をその仕様許容差の範囲内で変化させて、製造ばらつきを考慮します。シミュレーションの結果はコンデンサと抵抗の各値の許容範囲内での変動による $f_c = f_{IN} - 3dB \pm 0.6dB$ の周りの通過帯域変動を示しています。

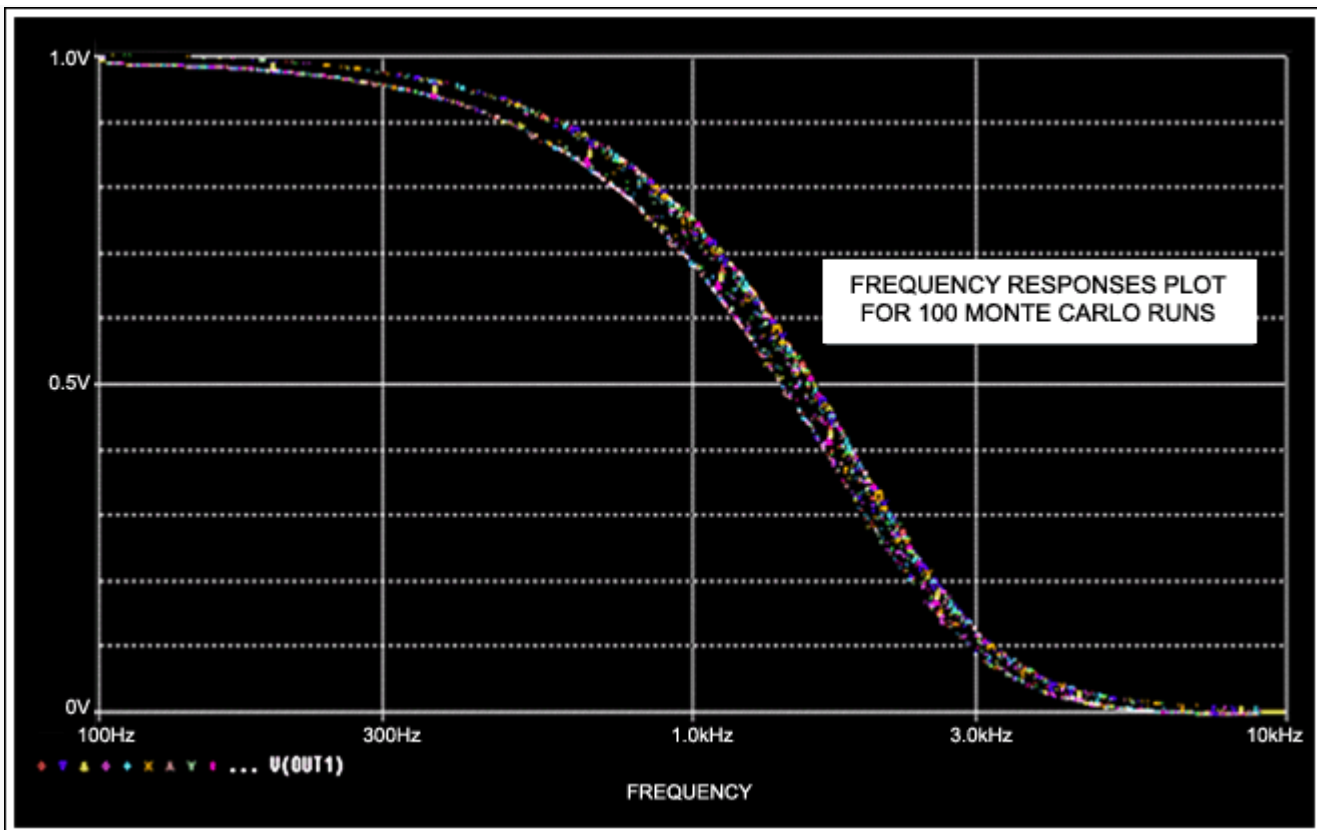


図2. これらの周波数応答のプロットは5ポールのベッセルフィルタのSPICEシミュレーションの結果を示しています。

1kHz～15kHzのカットオフ周波数で許容されるフィルタ特性を実現(80dB以上のダイナミックレンジに対して)するためには、設計者はより高精度で良好な温度安定性を備えた部品を使用しなければなりません。以下の例のとおりです。

- アンプは1kHz～15kHzのカットオフ周波数および0.005%より良好なTHD+N (全高調波歪+ノイズ)係数のためには0.5MHz～6.5MHzのユニティゲインを持たなければなりません。
- コンデンサは高精度のセラミックまたはフィルムコンデンサでなければなりません。これらのコンデンサは広い温度と電圧範囲でその公称値を維持しなければなりません。
- 各抵抗は±1%より良好な許容差と低温度係数の金属皮膜抵抗でなければなりません。
- 各部品が所望の特性を示すことを保証するためには、各部品はパナソニック、Rohm、Vishay、Kemet、およびAVXなどの信頼できるソースから入手しなければなりません。

予備推定によると、5次の1kHz～15kHzのカットオフ周波数のローパスベッセルフィルタ部品コストは\$1.50～\$2.00 (1000個以上の価格)となることとが示されます。これには、設計、試験、PCBレイアウト、組立て、部品購入などに費やされる増加時間は含まれません。これらの出費は定量化が困難で、会社によって異なります。さらに高次の連続時間フィルタの部品変動感度に関する詳細についてはアプリケーションノート738「[Minimizing Component-Variation Sensitivity in Single Op Amp Filters](#)」(英文)を参照してください。

マキシムはスイッチトキャパシタ技術に基づく集積化ソリューションによる更に高効率で複雑性の少ない方法を提供します。この方法はほとんどのフィルタ関数を1つのシリコンICに集積化することができます。(アプリケーションノート733「[A Filter Primer](#)」(英文)はSCFの動作に関する詳細情報を提供します。)特定のフィルタ特性を設定するために設計者がしなければならないことは、1つの安価な外付けコンデンサまたは外付けクロックを使用することだけです。その結果、温度変動およびその他の変動に強い、小型、確実にコスト効率の高いフィルタ設計が可能です。

図3と図4はSCFチップによる5次ローパスベッセルフィルタの簡単な回路実現を示しています([MAX7409/MAX7413](#))。デカップリング用の0.1μFコンデンサは汎用の低コストのセラミックタイプ(誘電体タイプはX7RまたはZ5U)で可能です。しかし、図4のC_{CLK}用にはCOG (NPO)誘電体タイプを推奨します。

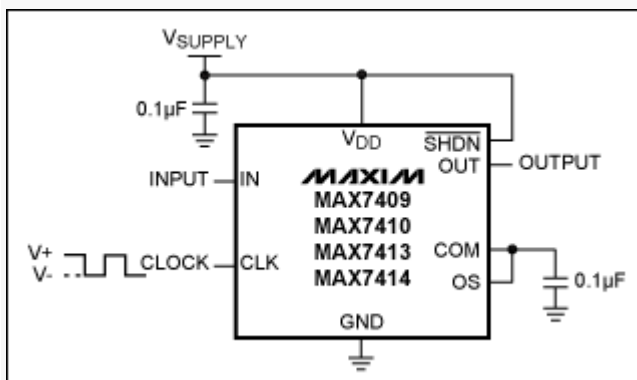


図3. スwitchトキャパシタ回路の f_c (カットオフ周波数)の設定は50% ± 10%のデューティサイクルの外部クロックを使用して行うことが可能です。

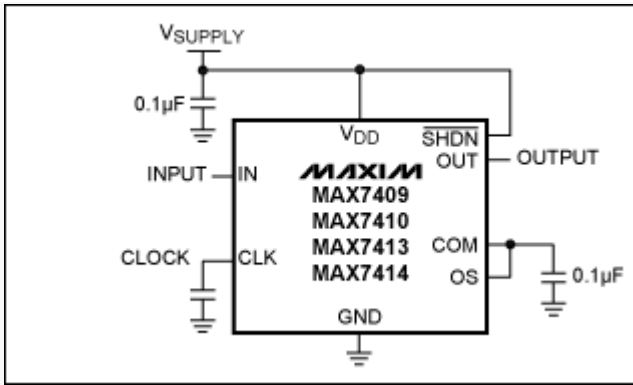


図4. スイッチトキャパシタフィルタの内部発振器を使用する f_C の設定のためにはCLKとグラウンド間に C_{CLK} コンデンサの接続が必要です。 C_{CLK} を $300pF$ とすると、 $f_C = 1kHz$ です。

シミュレーションと試験結果(図5に示す)は連続時間のオペアンプベースの設計に比べてMAX7409/MAX7413ベースの設計の通過帯域変動が向上していることを示しています。これらの2つの集積化ソリューションのもう1つの利点はチューニングが容易なことです。カットオフ周波数は自己クロックまたは外付けクロックの2つのクロックオプションによってクロックチューニングされます。これに比べて、オペアンプベースの設計におけるカットオフ周波数の変更は、多くの場合、基本的な再設計が必要です。

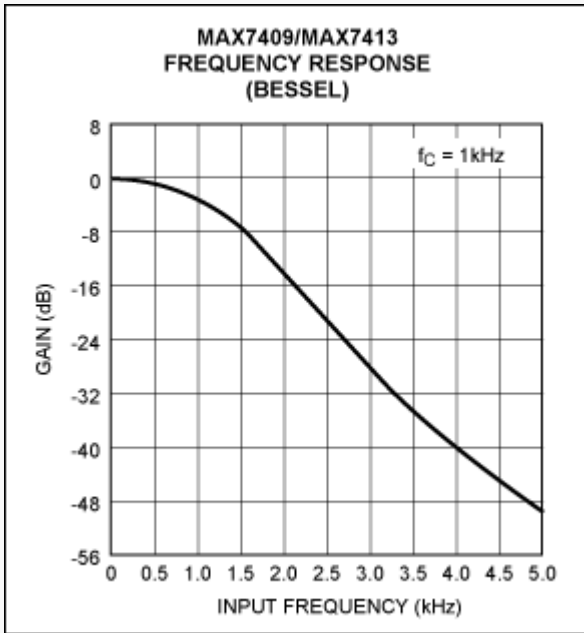


図5. $f_C = f_{IN}$ における通過帯域変動は温度および電源変化範囲で $-3dB \pm 0.4dB$ です。

表1と表2は低消費電力ながら高次フィルタ特性を提供するマキシムからの多くの集積化フィルタソリューションの幾つかを示しています。

表1. マキシムの低電力5次フィルタのファミリー

Part	Supply Voltage (V)	Filter Type	Filter Characteristics
MAX7411	+5	Elliptic	Steepest rolloff, 37dB of stopband rejection
MAX7415	+3	Elliptic	Steepest rolloff, 37dB of stopband rejection
MAX7408	+5	Elliptic	Steep rolloff, 53dB of stopband rejection
MAX7412	+3	Elliptic	Steep rolloff, 53dB of stopband rejection
MAX7409	+5	Bessel	Linear phase response
MAX7413	+3	Bessel	Linear phase response
MAX7410	+5	Butterworth	Maximally flat passband and stopband response
MAX7414	+3	Butterworth	Maximally flat passband and stopband response

表2. マキシムの低電力8次フィルタのファミリー

Part	Supply Voltage (V)	Filter Type	Filter Characteristics
MAX7400	+5	Elliptic	Steepest rolloff and 83dB of stopband rejection
MAX7401	+5	Bessel	Linear phase response
MAX7403	+5	Elliptic	Steep rolloff and 60dB of stopband rejection
MAX7404	+3	Elliptic	Steepest rolloff and 83dB of stopband rejection
MAX7405	+3	Bessel	Linear phase response
MAX7407	+3	Elliptic	Steep rolloff and 60dB of stopband rejection

参考文献

1. アプリケーションノート3494「[アンチエイリアシングの基本：スイッチトキャパシタフィルタを使用する方法](#)」
2. アプリケーションノート738「[Minimizing Component-Variation Sensitivity in Single Op Amp Filters](#)」(英文)

FilterProはTexas Instrumentsの商標です。

関連製品

MAX7400	8次、ローパス、エリプティック、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7401	8次、ローパス、ベッセル、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7403	8次、ローパス、エリプティック、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7404	8次、ローパス、エリプティック、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7405	8次、ローパス、ベッセル、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7407	8次、ローパス、エリプティック、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7408	5次、ローパス、エリプティック、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7409	5次、ローパス、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7410	5次、ローパス、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7411	5次、ローパス、エリプティック、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7412	5次、ローパス、エリプティック、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7413	5次、ローパス、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7414	5次、ローパス、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル
MAX7415	5次、ローパス、エリプティック、スイッチトキャパシタフィルタ	-- 無料サンプル

自動アップデート

お客様が関心のある分野でアプリケーションノートが新規に掲載された際に自動通知Eメールの受信を希望する場合は、[EE-Mail™](#)にご登録ください。

アプリケーションノート4422: japan.maxim-ic.com/an4422

その他の情報

テクニカルサポート: japan.maxim-ic.com/support

サンプル請求: japan.maxim-ic.com/samples

その他の質問およびコメント: japan.maxim-ic.com/contact

AN4422, AN 4422, APP4422, Appnote4422, Appnote 4422

Copyright © by Maxim Integrated Products

法的小知らせ: japan.maxim-ic.com/legal