

FilterPro™を使用したMFB型およびサレンキー型のローパス・フィルタの設計

John Bishop, Bruce Trump, R. Mark Stitt

Op-Amp Applications, High Performance Linear Products

概要

現代の電子技術ではローパス・フィルタが極めて重要な役割を果たしていますが、その設計と検証は退屈で時間のかかる作業になることがあります。FilterProは、多重帰還(MFB)型およびサレンキー型の回路トポロジで実現されるローパス・フィルタの設計に役立つプログラムです。

このアプリケーション・ノートは、FilterProの操作マニュアルとして使用されることを目的としています。設計者がプログラムに入力する必要がある情報や、プログラムを使用して実現できることなどが説明されます。

ローパス・フィルタ設計プログラム FilterPro	2
バタワース型(最大平坦振幅).....	2
チェビシェフ型(等リプル振幅).....	3
ベッセル型(最大平坦時間遅延).....	3
まとめ.....	4
バタワース応答.....	4
チェビシェフ応答.....	4
ベッセル応答.....	4
回路の実装	5
複素極ペア回路.....	5
MFB型トポロジ.....	5
サレンキー型トポロジ.....	5
FilterProプログラムを使用する	6
コンピュータの要件.....	6
インストール.....	6
最初の起動.....	6
プログラムの機能.....	7
結果を印刷するには.....	7
感度 7.....	7
MFB型とサレンキー型両方の f_n 感度.....	7
Q感度 7.....	7
MFB型極ペアのQ感度.....	8
ゲイン = 1のサレンキー型極ペアのQ感度.....	8
「Sensitivity」表示機能を使用する.....	8
「Seed Resistor」設定を使用する.....	9
コンデンサ値.....	9
「Capacitor」オプションを使用する.....	9
オペアンプの入力静電容量値の補償 — サレンキー型のみ.....	9
コンデンサの選択.....	9
f_n およびQディスプレイを使用する.....	10

この資料は、Texas Instruments Incorporated (TI) が英文で記述した資料を、皆様のご理解の一助として頂くために日本テキサス・インスツルメンツ (日本TI) が英文から和文へ翻訳して作成したものです。
資料によっては正規英語版資料の更新に対応していないものがあります。日本TIによる和文資料は、あくまでもTI正規英語版をご理解頂くための補助的参考資料としてご使用下さい。
製品のご検討およびご採用にあたりましては必ず正規英語版の最新資料をご確認下さい。
TIおよび日本TIは、正規英語版にて更新の情報を提供しているにもかかわらず、更新以前の情報に基づいて発生した問題や障害等につきましては如何なる責任も負いません。

オペアンプの選択10
 アンプのゲイン帯域積 (GBP).....10
 オペアンプのスルー・レート10
 フルパワー帯域幅11
 UAF42ユニバーサル・アクティブ・フィルタ11
 電流帰還アンプ11
 完全差動アンプ11
 MFBフィルタ応答の例12
 結論13

図目次

図 1. 応答 vs 周波数 偶数次(4極)、リップル3dBの チェビシェフ型フィルタ (カットオフが0dBから開始).....3
 図 2. 実数極セクション(ユニティゲイン, 1次バターワース; $f_{-3dB} = 1/2 \pi \cdot R1 \cdot C1$).....3
 図 3. 応答 vs 周波数 偶数次(5極), リップル3dBのチェビシェフ型フィルタ(カットオフが-3dBから開始)3
 図 4. 2次ローパス・フィルタ3
 図 5. 3次ローパス・フィルタ4
 図 6. 偶数次ローパス・フィルタ(カスケード型複素極ペア・セクションを使用)4
 図 7. 奇数次ローパス・フィルタ(カスケード型複素極ペア・セクション + 実数極セクションを使用)4
 図 11. 9極MFB型フィルタ(ゲイン40dB)の表示された FilterProの画面図7
 図 12. ADCを駆動する3次ローパス・フィルタ11
 図 13. ユニティゲインMFB型ローパス・フィルタ(5次20kHzバターワース型、チェビシェフ型、ベッセル型)のゲイン対周波数 (総合的なフィルタ応答)12
 図 14. ユニティゲインMFB型ローパス・フィルタ(5次20kHzバターワース型、チェビシェフ型、ベッセル型)のゲイン対周波数(遷移帯域幅の拡大図).....12
 図 17.MFB型ローパス・フィルタ(5次20kHzベッセル型)のステップ応答.....13
 図 18. 3種類の20kHzMFB型ローパス・フィルタで実際に測定された歪み.....13

表目次

表 1 フィルタ回路 vs フィルタ次数5

ローパス・フィルタ設計プログラム FilterPro

Texas InstrumentsのFilterProはローパス・アクティブ・フィルタの設計を容易にするためのプログラムであり、多重帰還型(MFB)トポロジーで実現されるローパス・フィルタの設計に役立ちます。また、サレンキー型フィルタ・トポロジーを選択した方がよい場合もあるため、FilterProではサレンキー型ローパス・フィルタの設計もサポートされています。

理想的なローパス・フィルタでは、カットオフ周波数より上の信号は完全に除去し、カットオフ周波数より下(通過域内)の信号は完全に通過させることになっています。ただし実際のフィルタでは、理想に近づけるためにさまざまなトレードオフが行われます。通過域内のゲインの平坦性を特に向上させたタイプのフィルタもあれば、通過域内のゲイン変動(リップル)を犠牲にしてロールオフの急峻度を上げたものもあります。また、平坦性とロールオフ率を両方とも犠牲にしてパルス応答の忠実度を上げたフィルタもあります。FilterProでは、最も広く使用されている3種類の全極フィルタ型、すなわちバターワース型、チェビシェフ型、ベッセル型をサポートしています。

バターワース型(最大平坦振幅)

通過域の振幅応答が、実現可能なうちで最も平坦になるフィルタです。各設計のカットオフ周波数でゲインが3dB低下し、減衰が始まります。カットオフ周波数を越えた後は、各極で周波数が10倍(1ディケード)になるごとにゲインが20dB低下してゆくという、傾きのゆるやかな減衰になります。バターワース型フィルタのパルス応答にはオーバーシュートとリングングがありますが、問題になるほどではありません。

チェビシェフ型(等リプル振幅)

注: 「チェビシェフ」は、Tschebychev、Tschebyscheff、Tchevysheffとも表記されます。

このフィルタ型では、カットオフ周波数より上の減衰がバターワース型の場合よりも急峻になります。この長所は、通過域の振幅変動(リプル)を許容することで実現可能です。バターワース応答やベッセル応答では、3dBの減衰が発生する時点の周波数がカットオフ周波数となりますが、チェビシェフ型のカットオフ周波数は、応答がリプル帯域幅を下回る時点の周波数と定義されます。偶数次フィルタの場合、すべてのリプルは0dBゲイン(DC応答)よりも上であるため、カットオフは0dBになります(図1参照)。奇数次フィルタの場合、すべてのリプルは0dBゲインのDC応答よりも下であるため、カットオフは-(リプル値)dBになります(図2参照)。任意の極数の場合は、通過域の許容リプルを増やせばカットオフがより急峻になります。チェビシェフ型のパルス応答では、バターワース型よりも多くのリングングが発生します。

ベッセル型(最大平坦時間遅延)

(トムソン型とも呼ばれます) このフィルタは線形位相応答を持つために、パルス応答が優秀です(オーバーシュートとリングングが最小限になる)。極数がいくつであっても、振幅応答はバターワース特性ほど平坦にはならず、カットオフ周波数で3dB低下して以降の減衰も、バターワース特性ほど急峻にはなりません。任意のバターワース型フィルタの振幅応答に近い振幅応答を得るには、使用するベッセル型フィルタの次数を高くする必要があります。ベッセル型フィルタのパルス応答の忠実度を考慮すれば、フィルタ・セクションの追加により設計が多少複雑になりはしても、ベッセル型フィルタを設計する価値はあると思われます。

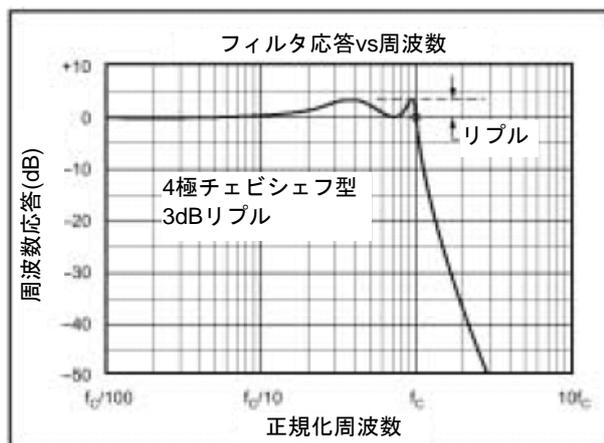


図 1. 応答 vs 周波数 偶数次(4極)、リプル3dBのチェビシェフ型フィルタ (カットオフが0dBから開始)

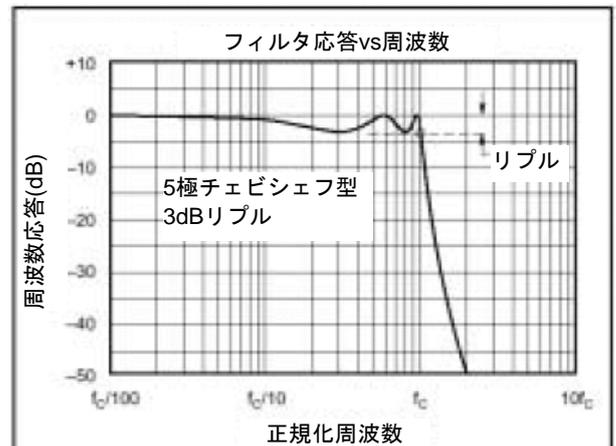


図 3. 応答 vs 周波数 偶数次(5極)、リプル3dBのチェビシェフ型フィルタ(カットオフが-3dBから開始)

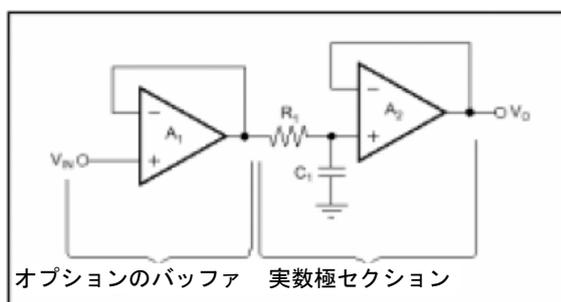


図 2. 実数極セクション(ユニティゲイン, 1次バターワース; $f_{-3dB} = 1/2 \pi \cdot R1 \cdot C1$)

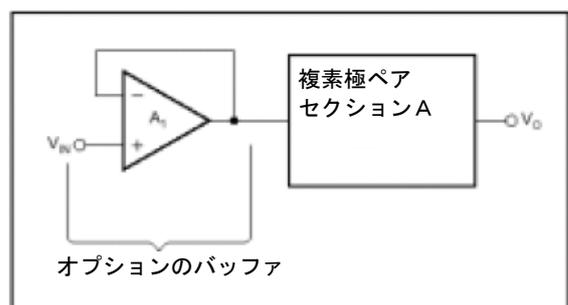


図 4. 2次ローパス・フィルタ

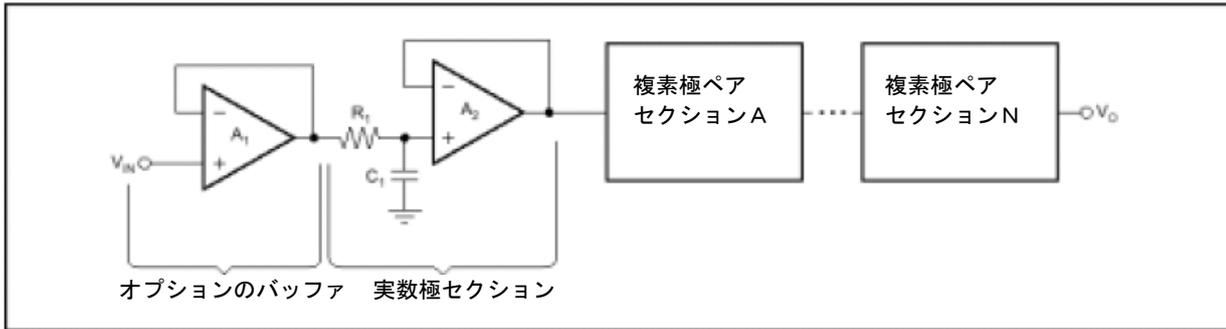


図 5. 3次ローパス・フィルタ

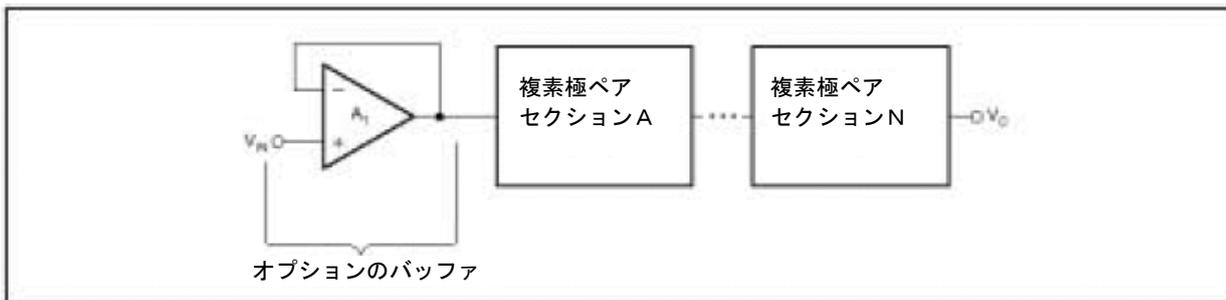


図 6. 偶数次ローパス・フィルタ(カスケード型複素極ペア・セクションを使用)

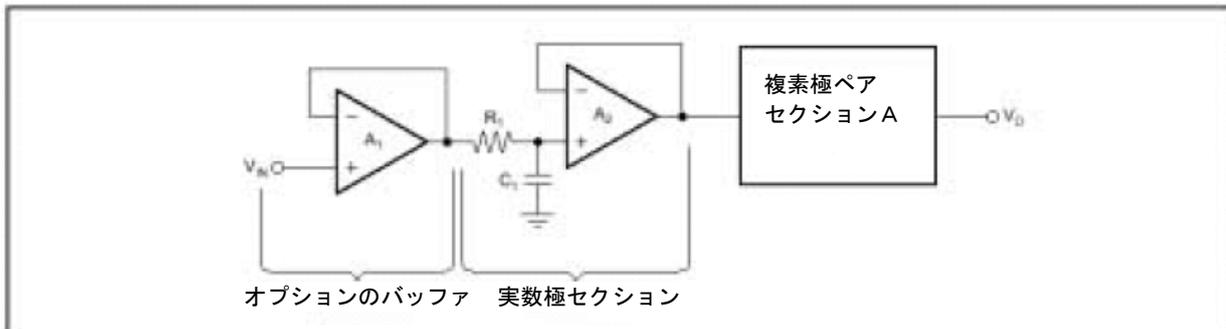


図 7. 奇数次ローパス・フィルタ(カスケード型複素極ペア・セクション + 実数極セクションを使用)

まとめ

バタワース応答

長所: 通過域内での最大平坦振幅応答を提供します。優良なオールラウンド型のパフォーマンスを示します。パルス応答はチェビシェフより優れています。減衰率はベッセルより優れています。

短所: ステップ応答に若干オーバーシュートとリングングが見られます。

チェビシェフ応答

長所: 通過域外での減衰がバタワース特性よりも優れています。

短所: 通過域内のリップルが好ましくないことがあります。ステップ応答に相当量のリングングが存在します。

ベッセル応答

長所: 最良のステップ応答を提供します。つまり、オーバーシュートとリングングがほとんどありません。

短所: 通過域外での減衰率は、バタワースよりも低くなります。

回路の実装

このプログラムを使用して設計された偶数次フィルタは、カスケード接続された複数の複素極ペアのセクションで構成されます。奇数次フィルタには、実数極セクションがひとつ追加されています。図3～図7は、推奨されるカスケード配列です。各図には他のフィルタ・セクションの前に追加された実数極セクションを示してありますが、構成によっては実数極セクションを後ろに置いた方がよい場合もあります(図12参照)。プログラムでは自動的に低Q段を高Q段の前に置いて、ゲイン・ピーキングが原因でオペアンプの出力が飽和しないようにします。プログラムを使用して、最高10次までのフィルタを設計できます。

フィルタの次数	図番号
1極	図3
2極	図4
3極	図5
4極以上(偶数次)	図6
5極以上(奇数次)	図7

表 1 フィルタ回路 vs フィルタ次数

複素極ペア回路

複素極ペア回路の選択は、パフォーマンス要件に依存します。FilterProでは下記のように、最もよく使用される2つのアクティブ極ペア回路トポロジをサポートしています。

- ・ 多重帰還型(MFB) — 図8を参照
- ・ サレンキー型 — 図9と図10を参照

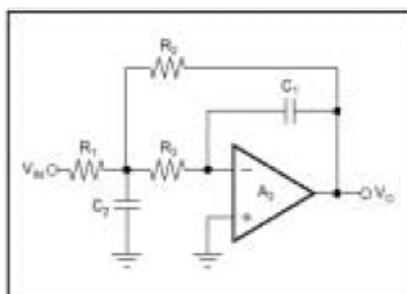


図 9. MFB複素極ペア・セクション(ゲイン = $-R_2/R_1$)

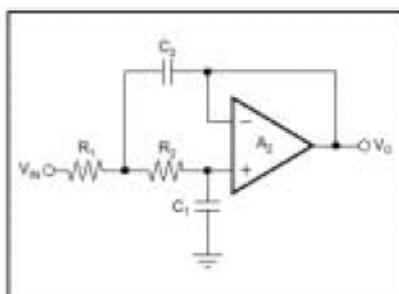


図 10. サレンキー型複素極ペア・セクション(ゲイン = 1) ユニティゲイン

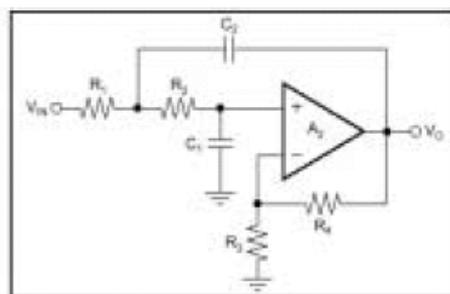


図 8. サレンキー型複素極ペア・セクション(ゲイン = $1 + R_4/R_3$)

MFB型トポロジ

MFB型トポロジ(無限ゲイン型、またはRauch型とも呼ばれます)は、部品のばらつきに影響されにくいことが確実であるため、通常はサレンキー型よりも選ばれる度合いが多くなっています。 — 「感度」の章を参照してください。

サレンキー型トポロジ

サレンキー型トポロジを選択した方がよい場合もあります。大まかに言って、次のような場合はサレンキー型トポロジを選択したほうがよいでしょう。

- 1) ゲイン精度が重要である
- 2) ユニティゲイン・フィルタが使用されている
- 3) 極ペアのQ値が低い(例: $Q < 3$)

ユニティゲインでのサレンキー型トポロジには、本質的に優れたゲイン精度があります。これは、オペアンプがユニティゲイン・バッファとして使用されているためです。MFB型トポロジでは、抵抗比率 R_2/R_1 によってゲインが決定されます。またユニティゲインのサレンキー型トポロジでは、必要な部品の数が少なくてすみます — サレンキー型の抵抗の数は2つであるのに対し、MFB型の抵抗は3つです。

Q値の高い高周波フィルタ・セクションでも、サレンキー型トポロジーを使用する方がよいかもしれません。これらのセクションでは、MFB型設計を適用すると妥当な抵抗値に対して C_1 に必要な値が低くなりすぎる可能性があります。コンデンサの値が低いと、寄生静電容量による重大な誤差(エラー)が発生する可能性があります。

最も適切なフィルタ設計は、MFB部とサレンキー部を結合することです。これを実現するために、FilterProを使用して、2つの回路タイプに同一の設計を適用した場合の部品値を定義します。その後、両設計のセクションからそれぞれ一部ずつを取って共に使用することで、任意のフィルタ設計を構築します。

FilterPro プログラムを使用する

各データを入力すると、プログラムでは自動的にフィルタ・パフォーマンスと、すべてのフィルタ部品の値を計算します。これにより、仮想(what if)スプレッドシート・タイプの設計アプローチを使用できるようになります。例えば、任意のロールオフに必要な極数がいくつであるかを、何度か試行錯誤した上で短時間で判定できます。

コンピュータの要件

Windows版FilterProに必要なオペレーティング・システムは、Windows 95またはNT 3.5以上です。ディスプレイの解像度は最低800×600である必要があります。ローカルかネットワーク上のプリンタ(画面に表示されたダンプを印刷できるもの)があると便利ですが、必須ではありません。

インストール

お使いのコンピュータにFilterProをインストールするには、ハード・ディスクまたはCDからsetup.exeプログラムを実行してください。

最初の起動

初めてプログラムを使用するには、デスクトップにあるFilterProのアイコンをダブルクリックするか、[Start]メニューから[Programs] → [FilterPro]と選択します。この時点ですでに、3極で1kHzのバターワース型フィルタを設計していることになっています。回路図には部品定数(component values)が示されています。別のフィルタを設計する場合は、ラジオボタンを押して、表示されるオプションのどれかを選択します。応答グラフの左側にある画面のプロンプトを見れば、プログラムの使用方法がわかります。さらに詳細な情報が必要な場合は、この画面を参照してください。すべての必須設定は「Settings」フレーム内に示されています。

- 1) 「Circuit Type」フレームから、極ペア回路: MFB型かサレンキー型を選択します。
- 2) 「Filter Type」フレームから、フィルタ型: バターワース、チェビシェフ、ベッセルを選択します。
- 3) チェビシェフフィルタ型の場合は、リップル量: 0.0001 dB~10dBを入力します。
- 4) 所要の極数: 1~ 10 (2 min. ベッセルまたはチェビシェフの場合は最小値2)を入力します。
- 5) フィルタのカットオフ周波数: 1mHz~100MHzを入力します。
- 6) 現在のフィルタ設計での、特定の周波数(デフォルト値はカットオフ周波数の10倍)のゲイン/位相応答を表示したい場合は、関心対象の周波数を応答の入力ボックスに入力します。ゲイン/位相値は、「 f_n 」「Q」「Response」のディスプレイフィールドに表示されます。
- 7) 抵抗のスケールリングを変更したい場合は、「R1 Seed」入力フィールドに値を入力します。これにより、コンデンサの値も変更されます。
- 8) 任意のセクションのゲインを変更したい場合は、所要の値を該当するゲイン入力ボックスに入力してください。ゲインのデフォルト値は、各セクションにつき1.0-V/Vです。
- 9) ユーザ独自のコンデンサ値を入力したい場合は、該当する C_1 または C_2 の入力ボックスにその値を入力してください。ここに値を入力すると、シード抵抗に入力した値は無視されます。
- 10) 正確な抵抗ではなく標準的な誤差1%の抵抗で設計したい場合は、「1% Resistors」チェック・ボックスをクリックしてください。

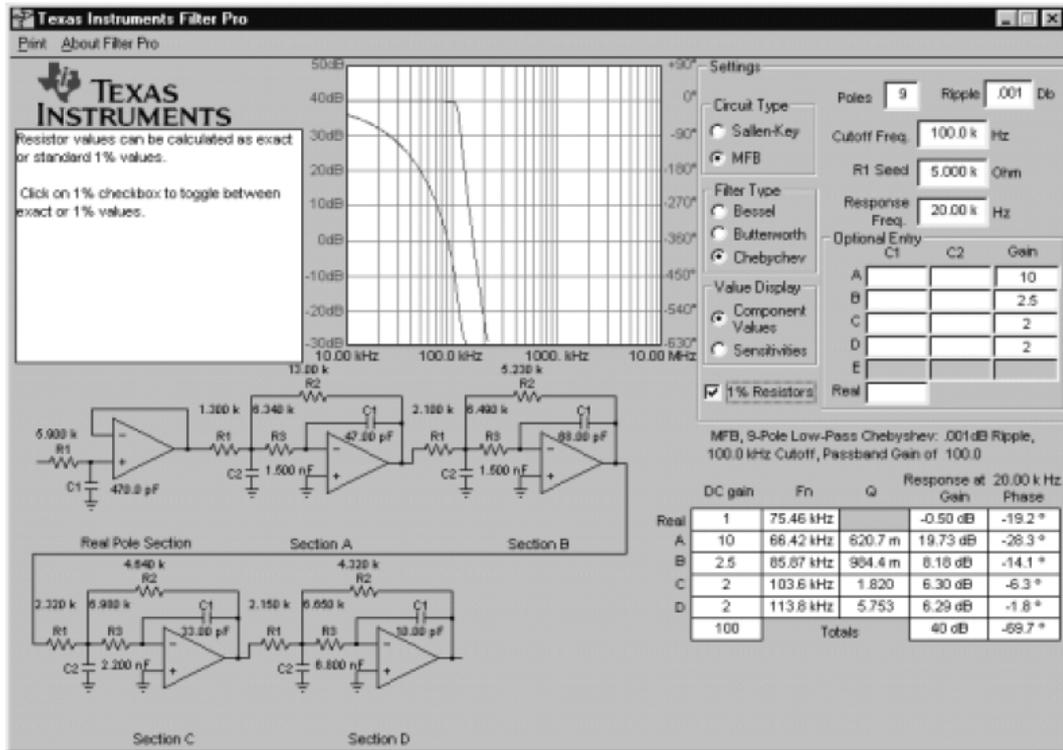


図 11. 9極MFB型フィルタ(ゲイン40dB)の表示された FilterProの画面図

プログラムの機能

結果を印刷するには

結果を印刷するには、Printメニュー項目を選択します。選択すると、画面を印刷するためのダイアログ・ボックスが表示されます。印刷が始まると画面が通常サイズから拡張され、回路図には表示されていない情報(感度データや部品定数)を記載した表が表示されます。拡張された画面がキャプチャされ、プリンタに送信されます。位置やサイズの関係で画面がディスプレイ上で表示しきれない場合は、見えている範囲だけが印刷されます。

感度

「感度」とは、部品定数の変化に対するフィルタ・パフォーマンスの脆弱性を表す尺度です。フィルタ・パラメータのうち考慮すべき重要なものは、固有周波数(f_n)とQです。

MFB型とサレンキー型両方の f_n 感度

サレンキー型とMFB型フィルタ両方の回路トポロジーでは、抵抗、コンデンサ、アンプのゲインばらつきに対する f_n の感度が常に低くなっています。(つまり、ばらつきの影響を受けにくくなっています)

$$S_R^f = S_C^f = \pm 0.5\% / \%$$

$$S_K^f = 0$$

ここで、

S_R^f, S_C^f, S_C^f は抵抗、コンデンサ、アンプのゲインのばらつきに対する f_n の感度

Q感度

MFB型トポロジーの場合、Qに対する感度もまた常に低くなっていますが、サレンキー型トポロジーの感度はかなり高くなる可能性があります - 具体的には、 $2 \cdot K \cdot Q^2$ を超える可能性があります。Kは、このアプリケーション・レポートでゲインとして使用される変数です。ユニティゲインでは、抵抗とコンデンサのばらつきに対するサレンキー型のQ感度は常に低くなっています。

ただ残念ながら、ユニティゲインでのサレンキー型極ペアの感度は、オペアンプのゲインに対しては高くなる可能性があります。

MFB 型極ペアの Q 感度

$$S_C^Q = \pm 0.5\% / \%$$

$$S_R^Q = \pm \frac{R_2 - R_3 - K \cdot R_3}{2(R_2 + R_3 + K \cdot R_3)} \quad (\text{MFB型の複素極ペア})$$

$$S_K^Q = \pm \frac{K \cdot R_3}{R_2 + R_3 + K \cdot R_3} \quad (\text{MFB型の複素極ペア})$$

次のことを確かめてください: 「 S_R^Q は常に $\pm 0.5\% / \%$ より低く、 S_K^Q は常に $1.0\% / \%$ より低い」

ゲイン = 1 のサレンキー型極ペアの Q 感度

$$S_C^Q = \pm 0.5\% / \%$$

$$S_R^Q = \pm \frac{R_1 - R_2}{2(R_1 + R_2)} \quad (\text{サレンキー型複素極ペア})$$

よって、 S_R^Q は常に $\pm 0.5\% / \%$ よりも小さくなります。

$$S^2 < S_K^Q < 2 \cdot Q^2 S \quad (\text{サレンキー型複素極ペア})$$

ここで、

$$S_R^Q, S_C^Q, S_K^Q = \text{抵抗、コンデンサ、ゲインばらつきに対する } f_n \text{ と } Q \text{ の感度 } (\% / \%)$$

$K = \text{オペアンプのゲイン (V/V)}$

図8の回路では、 $K = R_2 / R_1$

図9の回路では、 $K = 1.0$

図10の回路では、 $K = 1 + R_4 / R_3$

注: FilterProでは常に、ユニティゲインのサレンキー型の S_K^Q が $2 \cdot Q^2$ よりも Q^2 に近くなるような部品定数を選択します。ただし、感度が高い(Q_n の値が高くなり、ゲイン $\gg 1$)サレンキー型の極ペアを設計することも可能です。部品のばらつきに対する感度のために、これらの設計の実用性が損なわれないように注意する必要があります。次に示すように、FilterProのディスプレイ上には、抵抗とコンデンサのばらつきに対するフィルタ・セクションの f_n 感度とQ感度を表示する機能があります。

「Sensitivity (感度)」表示機能を使用する

「Sensitivity (感度)」表示オプションを使用するには、画面の「Settings」領域にある「Sensitivity」ボタンをクリックします。回路図に、各フィルタ・セクションの各部品に対する f_n 感度とQ感度が示されます。フォーマットは「Sf; SQ」です。

プログラムでは部品ばらつきに関する導関数を表示しないで、部品値の変化1%についての f_n と Q の変化を計算します。これにより、実世界でのばらつきについてより現実的な感度値が得られます。

「Seed Resistor」設定を使用する

「Seed Resistor」の設定を使用すると、コンピュータの選択した抵抗値を調整して、アプリケーションに適合させることができます。「Seed Resistor」フィールドにカーソルを動かして、任意のシード抵抗値を入力します。

ほとんどのアプリケーションで推奨されるのは、デフォルト値の $10\text{ k}\Omega$ です。

回路が電力感度の高い環境(バッテリー電源や太陽光発電など)にある場合は、シード抵抗値を増加させて、消費電力を減少させることができます。帰還抵抗値が低くなければならない高速オペアンプもあるため、そのようなタイプのオペアンプを使用する場合は、シード抵抗値を減少させておく必要があります。

より高い抵抗値(例えば $100\text{ k}\Omega$)をFET入力オペアンプとともに使用することも可能です。約 70°C よりも低い温度では、オペアンプの入力パイアス電流が原因のDC誤差とエクセス・ノイズが小さくなります。

ただし注意する必要があるのは、抵抗が原因のノイズは \sqrt{n} 分だけ増加するということです。ここで、 n は抵抗増分の乗数です。

Texas Instrumentsの多様な高速アンプからなる高周波フィルタとともに使用する場合は、より低い抵抗値(例えば $50\text{ }\Omega$)の方が適しています。

次のパラグラフで説明するように、コンデンサ値が入力された場合は、シード抵抗値は無視されます。

コンデンサ値

抵抗と比べると、許容差の厳しいコンデンサは入手が難しく、値段もずっと高くなる可能性があります。「Capacitor」フィールドでは、コンデンサの実測値を入力できます。こうすると、比較的安価な部品でも正確なフィルタ応答を達成できます。

コンデンサ値が入力されない場合は、FilterProによりE6系列の標準値(10倍ごとに6値)の中からコンデンサが選択されます。E6系列以外の値(E12系列や実測値等)を使用する場合は、入力する値が適切かどうかご注意ください。

「Capacitor」オプションを使用する

「Capacitor」オプションを使用するには、任意の「capacitor」フィールドにカーソルを移動して必要な値を入力します。

画面左のプロンプトを見ると、入力可能なコンデンサの最小値/最大値が分かります。コンデンサ値が入力されるごとに、プログラムでは前述のように、正確な、または最も近い標準1%抵抗値を選択します。

コンデンサ値を手入力した場合には、シード抵抗値が無視されます。

オペアンプの入力静電容量値の補償 — サレンキー型のみ

サレンキー型フィルタ・セクションで使用されるオペアンプの同相入力容量が、約 $C1/400$ ($C1$ の0.25%)よりも大きい値である場合は、それを考慮して正確なフィルタ応答を実現する必要があります。

「capacitor entry」フィールドを使用して、実際の $C1$ 値に対するオペアンプの同相入力静電容量の値を追加するだけで、オペアンプの入力静電容量を補償できます。次にプログラムでは、前述のように、正確な、または最も近い標準1%抵抗値を自動的に再計算して、正確なフィルタ応答を求めます。オペアンプの入力静電容量の補償は、MFB設計では必要ありません。

コンデンサの選択

コンデンサの選択は、ハイ・パフォーマンス・フィルタにとって非常に重要です。コンデンサの振る舞いは理想からはかなりはずれることがあります。直列抵抗とインダクタンスの導入により、 Q に限界が生じるためです。また、「容量対電圧」が非線形になるため、歪みが生じます。

高K型などの通常の高誘電率セラミック・コンデンサでは、フィルタ回路に誤差(エラー)が生じる可能性があります。推奨されるコンデンサのタイプは、NPOセラミック、シルバー・マイカ、金属化ポリカーボネートです。また、温度の上限が85°Cの場合は、ポリプロピレンまたはポリスチレンになります。

f_n およびQディスプレイを使用する

FilterProには極ペア・セクションの f_n とQを表示するための機能があり、オペアンプを選択する際に役立ちます。 f_n とQの情報はまた、個々のフィルタ・セクションで理想の応答と実際の応答を比較してフィルタのトラブルシューティングを行う場合にも役立ちます。

オペアンプの選択

必要なDC精度、ノイズ、歪み、スピードを得られるオペアンプを選択することは大切です。Texas Instrumentsでは、ハイ・パフォーマンス・アクティブ・フィルタに使用できる優れたオペアンプ製品を取り揃えています。次に挙げるインターネットのウェブ・ページでは、意図される応用方法に合ったオペアンプを選択するための手引きを掲載しています。

<http://focus.ti.com/docs/analog/analoghomepage.jhtml>

また上記のページには、FilterProのダウンロード・ページへのリンクも掲載されています。

次からのパラグラフでは、フィルタ回路用のオペアンプを選択する際に求める必要のあるパラメータを定義します。

アンプのゲイン帯域積 (GBP)

ローパス・フィルタ・セクションでは、ゲイン・ピーキングの最大値が、 f_n (そのフィルタ・セクションの固有周波数)でのQにほぼ等しくなっています。したがって、必要なGBPは大体において次のような値になります。

MFBセクションの場合: オペアンプには最低でも「 $100 \cdot \text{ゲイン} \cdot f_n$ 」のGBPが必要です。

高Qサレンキー・セクションのオペアンプでは、さらに高い値のGBPが必要になります。

サレンキー・セクションの場合: $Q > 1$ の場合、オペアンプには最低でも「 $100 \cdot \text{ゲイン} \cdot Q^3 \cdot f_n$ 」のGBPが必要です。 $Q \geq 1$ の場合、オペアンプには最低でも「 $100 \cdot \text{ゲイン} \cdot f_n$ 」のGBPが必要です。

実数極セクションの場合: オペアンプには最低でも「 $50 \cdot f_n$ 」のGBPが必要です。

Qが定義されるのは正式には複素極の場合のみですが、実数極セクションに必要なオペアンプのゲインを計算するには、0.5というQの値を使用すると便利です。

例えば、19.35kHzの2次極ペア f_n とQ値8.82を持つ、ユニティゲイン20kHz5極リップル3dBのチェビシェフMFB型フィルタでは、最低でも17MHzのユニティゲイン帯域幅をもつオペアンプが必要になります。

一方、最悪の場合のQが1.62になる5極バターワースMFB型フィルタでは、わずか3.2MHzのオペアンプしか必要としません。サレンキー型トポロジーで実現された同じ5極バターワース型フィルタでは、高Qセクションで8.5MHzのオペアンプが必要になります。

オペアンプのスルー・レート

十分なフルパワー応答を得るには、オペアンプのスルー・レートが「 $\pi \cdot V_{OP-P} \cdot \text{フィルタ帯域幅}$ 」よりも大きくなければなりません。例えば、出力20-V_{p-p}を持つ100-kHzのフィルタでは、オペアンプに最低でも6.3V/msのスルー・レートが必要になります。

フルパワー帯域幅

オペアンプのフルパワー帯域幅は、少なくとも通過する信号の最大値と同じである必要があります。

UAF42 ユニバーサル・アクティブ・フィルタ

その他のフィルタ設計方法として、Texas InstrumentsのUAF42ユニバーサル・アクティブ・フィルタを使用することも考慮してください。この製品を使用すると、ローパス、ハイパス、バンドパス、バンドリジェクト(ノッチ)の各種フィルタを容易に構成できます。極ペアを形成するための反転アンプ1つと積分器2つのついた、古典的な状態変数アーキテクチャが使用されます。積分器には、1000-pF、 $\pm 0.5\%$ のオンチップ・コンデンサが組み込まれています。これにより、アクティブ・フィルタの実装で最も難しい問題のひとつが解決できます — すなわち、許容差が厳しく損失の少ないコンデンサを妥当な価格で取得することが可能になります。

UAF42の設計手順はシンプルなので、バターワース、チェビシェフ、ベッセル等の各種フィルタの実装が可能です。UAF42に内蔵するFET入力オペアンプを使用して新しい段や、逆チェビシェフのような特殊なフィルタ型を形成できます。UAF42は、標準的な14ピンDIPにパッケージングした状態で使用されます。詳細については、UAF42についてのTI/Burr-Brownの製品データ・シート、およびアプリケーション・プレティンAB-035を参照してください。

電流帰還アンプ

電流帰還アンプをフィルタとして構成することも可能ですが、FilterProで定義された値を使用するローパス・フィルタには、MFB型とサレンキー型どちらのトポロジーも使用しないでください。

完全差動アンプ

MFBトポロジーで完全差動アンプを使用することによって、性能の良い完全平衡フィルタを製造することは可能です。アンプの帰還パスは両方とも、抵抗とコンデンサのマッチング・セットで構成する必要があります。図12は、この方法を使用して完全差動アンプを組み込んだアプリケーションです。

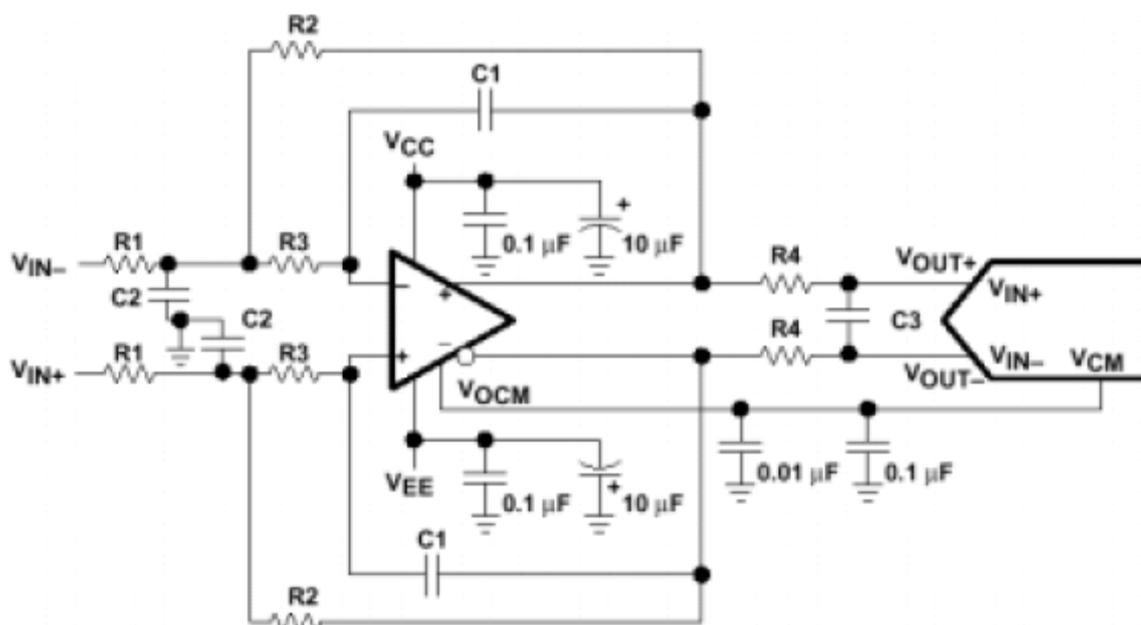


図 12. ADCを駆動する3次ローパス・フィルタ

MFB フィルタ応答の例

図13と図14は、プログラムを使用して設計した5次20kHzバターース型、3dBチェビシェフ型、およびベッセル型フィルタの、実際に測定された振幅応答のプロットです。どのフィルタにも、オペアンプOPA627が使用されています。図13から分かるように、チェビシェフ型フィルタのロールオフが最も急峻であり、ベッセル型フィルタのロールオフが最も緩やかです。ただし、どの5次フィルタも最終的には $-N \cdot 20\text{dB/ディケード}$ でロールオフ(減衰)します。ここで、Nはフィルタ次数です。(つまり、5極フィルタの場合は -100dB/ディケード になります)

オシロスコープ写真(図15~17)を見ると、各フィルタのステップ応答が分かります。予想通り、リングングがチェビシェフ型フィルタで最も多く、ベッセル型フィルタで最も少なくなっています。図18に示すのは、3種類のフィルタの歪みプロット対周波数です。上記と同じ3種類のサレンキー型フィルタのパフォーマンス実測値を知る必要がある場合には、アプリケーション・プレティンAB-017を参照してください。

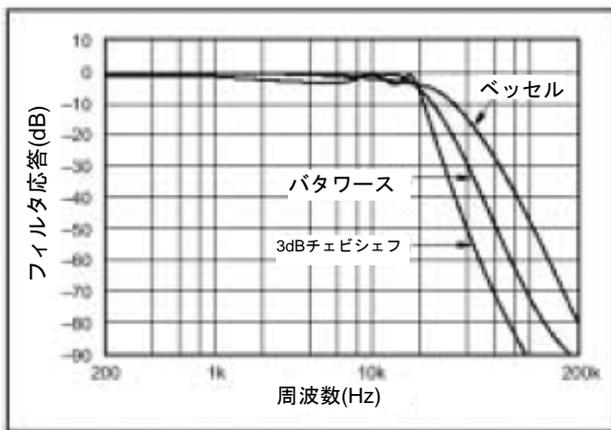


図 13. ユニティゲインMFB型ローパス・フィルタ(5次20kHzバターース型、チェビシェフ型、ベッセル型)のゲイン対周波数 (総合的なフィルタ応答)

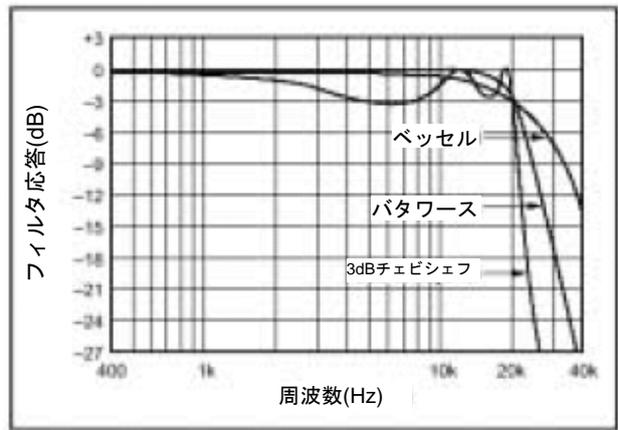


図 14. ユニティゲインMFB型ローパス・フィルタ(5次20kHzバターース型、チェビシェフ型、ベッセル型)のゲイン対周波数(遷移帯域幅の拡大図)

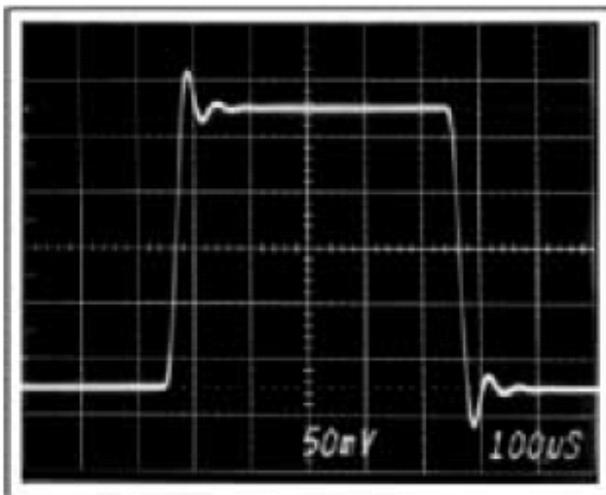


図 16. MFB型ローパス・フィルタ(5次20kHzバターース型)のステップ応答

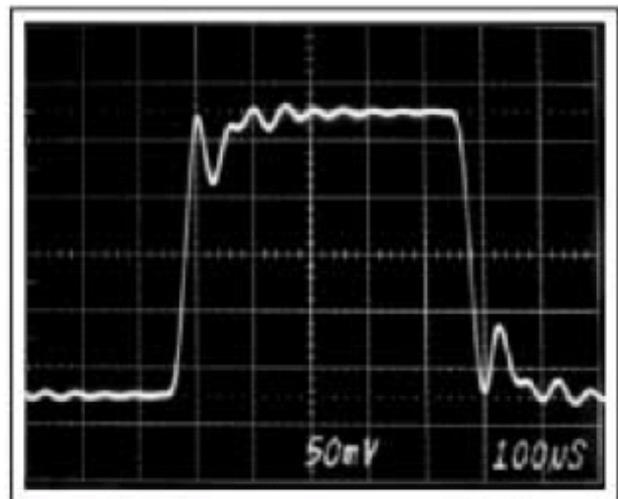


図 15. MFB型ローパス・フィルタ(5次20kHzチェビシェフ型)のステップ応答

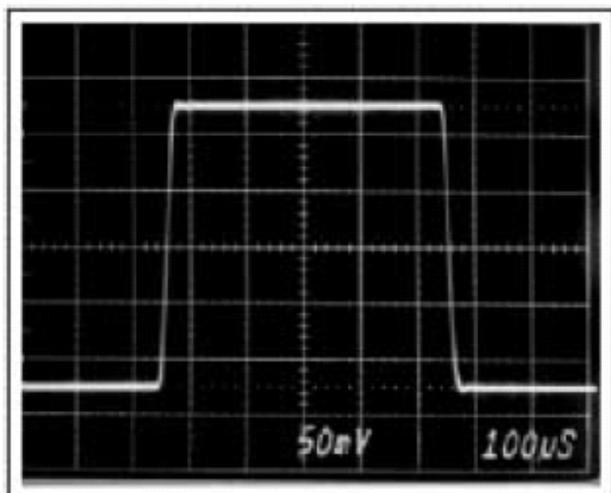


図 17. MFB型ローパス・フィルタ(5次20kHzベッセル型)のステップ応答

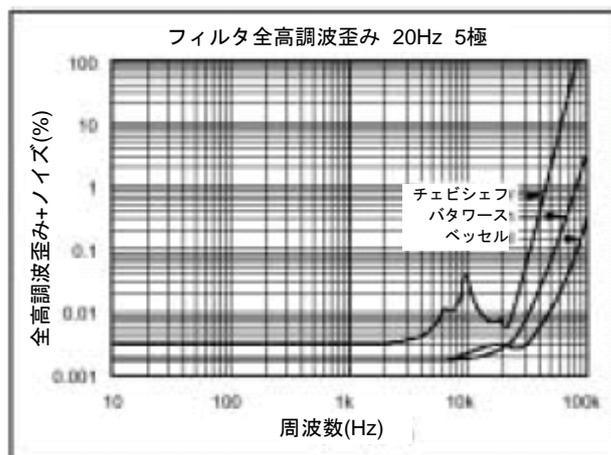


図 18. 3種類の20kHzMFB型ローパス・フィルタで実際に測定された歪み

結論

FilterProを使用すると、数多くの多様なアプリケーション用のローパス・フィルタを、複雑な計算を行わずに開発することが可能になります。

ご注意

日本テキサス・インスツルメンツ株式会社(以下TIJといたします)及びTexas Instruments Incorporated(TIJの親会社、以下TIJないしTexas Instruments Incorporatedを総称してTIJといたします)は、その製品及びサービスを任意に修正し、改善、改良、その他の変更をし、もしくは製品の製造中止またはサービスの提供を中止する権利を留保します。従いまして、お客様は、発注される前に、関連する最新の情報を取得して頂き、その情報が現在有効かつ完全なものであるかどうかをご確認下さい。全ての製品は、お客様とTIJとの間に取引契約が締結されている場合は、当該契約条件に基づき、また当該取引契約が締結されていない場合は、ご注文の受諾の際に提示されるTIJの標準販売契約約款に従って販売されます。

TIJは、そのハードウェア製品が、TIの標準保証条件に従い販売時の仕様に対応した性能を有していること、またはお客様とTIJとの間で合意された保証条件に従い合意された仕様に対応した性能を有していることを保証します。検査およびその他の品質管理技法は、TIが当該保証を支援するのに必要とみなす範囲で行なわれております。各デバイスの全てのパラメータに関する固有の検査は、政府がそれ等の実行を義務づけている場合を除き、必ずしも行なわれておりません。

TIJは、製品のアプリケーションに関する支援もしくはお客様の製品の設計について責任を負うことはありません。TI製部品を使用しているお客様の製品及びそのアプリケーションについての責任はお客様にあります。TI製部品を使用したお客様の製品及びアプリケーションについて想定される危険を最小のものとするため、適切な設計上および操作上の安全対策は、必ずお客様にてお取り下さい。

TIJは、TIの製品もしくはサービスが使用されている組み合わせ、機械装置、もしくは方法に関連しているTIの特許権、著作権、回路配置利用権、その他のTIの知的財産権に基づいて何らかのライセンスを許諾するということは明示的にも黙示的にも保証も表明もしていません。TIが第三者の製品もしくはサービスについて情報を提供することは、TIが当該製品もしくはサービスを使用することについてライセンスを与えるとか、保証もしくは承認をすることを意味しません。そのような情報を使用するには第三者の特許その他の知的財産権に基づき当該第三者からライセンスを得なければならない場合もあり、またTIの特許その他の知的財産権に基づきTIからライセンスを得て頂かなければならない場合もあります。

TIのデータ・ブックもしくはデータ・シートの中にある情報を複製することは、その情報に一切の変更を加えること無く、かつその情報と結び付けられた全ての保証、条件、制限及び通知と共に複製がなされる限りにおいて許されるものとします。当該情報に変更を加えて複製することは不正で誤認を生じさせる行為です。TIは、そのような変更された情報や複製については何の義務も責任も負いません。

TIの製品もしくはサービスについてTIJにより示された数値、特性、条件その他のパラメータと異なる、あるいは、それを超えてなされた説明で当該TI製品もしくはサービスを再販売することは、当該TI製品もしくはサービスに対する全ての明示的保証、及び何らかの黙示的保証を無効にし、かつ不正で誤認を生じさせる行為です。TIJは、そのような説明については何の義務も責任もありません。

TIJは、TIの製品が、安全でないことが致命的となる用途ないしアプリケーション(例えば、生命維持装置のように、TI製品に不良があった場合に、その不良により相当な確率で死傷等の重篤な事故が発生するようなもの)に使用されることを認めておりません。但し、お客様とTIの双方の権限有る役員が書面でそのような使用について明確に合意した場合は除きます。たとえTIJがアプリケーションに関連した情報やサポートを提供したとしても、お客様は、そのようなアプリケーションの安全面及び規制面から見た諸問題を解決するために必要とされる専門的知識及び技術を持ち、かつ、お客様の製品について、またTI製品をそのような安全でないことが致命的となる用途に使用することについて、お客様が全ての法的責任、規制を遵守する責任、及び安全に関する要求事項を満足させる責任を負っていることを認め、かつそのことに同意します。さらに、もし万一、TIの製品がそのような安全でないことが致命的となる用途に使用されたことによって損害が発生し、TIないしその代表者がその損害を賠償した場合は、お客様がTIないしその代表者にその全額の補償をするものとします。

TI製品は、軍事的用途もしくは宇宙航空アプリケーションないし軍事的環境、航空宇宙環境にて使用されるようには設計もされていませんし、使用されることを意図されていません。但し、当該TI製品が、軍需対応グレード品、若しくは「強化プラスチック」製品としてTIが特別に指定した製品である場合は除きます。TIが軍需対応グレード品として指定した製品のみが軍需品の仕様書に合致いたします。お客様は、TIが軍需対応グレード品として指定していない製品を、軍事的用途もしくは軍事的環境下で使用することは、もっぱらお客様の危険負担においてなされるということ、及び、お客様がもっぱら責任をもって、そのような使用に関して必要とされる全ての法的要求事項及び規制上の要求事項を満足させなければならないことを認め、かつ同意します。

TI製品は、自動車用アプリケーションないし自動車の環境において使用されるようには設計されていませんし、また使用されることを意図されていません。但し、TIがISO/TS 16949の要求事項を満たしていると特別に指定したTI製品は除きます。お客様は、お客様が当該TI指定品以外のTI製品を自動車用アプリケーションに使用しても、TIは当該要求事項を満たしていなかったことについて、いかなる責任も負わないことを認め、かつ同意します。

Copyright © 2009, Texas Instruments Incorporated
日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社

弊社半導体製品の取り扱い・保管について

半導体製品は、取り扱い、保管・輸送環境、基板実装条件によっては、お客様での実装前後に破壊/劣化、または故障を起こすことがあります。

弊社半導体製品のお取り扱い、ご使用にあたっては下記の点を遵守して下さい。

1. 静電気

素手で半導体製品単体を触らないこと。どうしても触る必要がある場合は、リストストラップ等で人体からアースをとり、導電性手袋等をして取り扱うこと。

弊社出荷梱包単位(外装から取り出された内装及び個装)又は製品単品で取り扱いを行う場合は、接地された導電性のテーブル上で(導電性マットにアースをとったもの等)、アースをした作業者が行うこと。また、コンテナ等も、導電性のものを使うこと。

マウンタやはんだ付け設備等、半導体の実装に関わる全ての装置類は、静電気の帯電を防止する措置を施すこと。

前記のリストストラップ・導電性手袋・テーブル表面及び実装装置類の接地等の静電気帯電防止措置は、常に管理されその機能が確認されていること。

2. 温・湿度環境

温度: 0~40、相対湿度: 40~85%で保管・輸送及び取り扱いを行うこと。(但し、結露しないこと。)

直射日光があたる状態で保管・輸送しないこと。

3. 防湿梱包

防湿梱包品は、開封後は個別推奨保管環境及び期間に従い基板実装すること。

4. 機械的衝撃

梱包品(外装、内装、個装)及び製品単品を落下させたり、衝撃を与えないこと。

5. 熱衝撃

はんだ付け時は、最低限260以上の高温状態に、10秒以上さらさないこと。(個別推奨条件がある時はそれに従うこと。)

6. 汚染

はんだ付け性を損なう、又はアルミ配線腐食の原因となるような汚染物質(硫黄、塩素等ハロゲン)のある環境で保管・輸送しないこと。はんだ付け後は十分にフラックスの洗浄を行うこと。(不純物含有率が一定以下に保証された無洗浄タイプのフラックスは除く。)

以上