

シンプルでデジタル・チューニング可能なアクティブRCフィルタ

Philip Karantzalis 著

PDFをダウンロード

はじめに

アクティブRCフィルタのカットオフ周波数 (f_{CUTOFF}) のチューニングは、スイッチド・キャパシタ回路または連続時間回路を用いて実行できます。単一のパッケージで任意次数フィルタの無限チューニング分解能が必要なアプリケーションでは、スイッチド・キャパシタ方式が適しています (クロック周波数を変えるだけで f_{CUTOFF} をチューニング可能)。連続時間フィルタを数個のカットオフ周波数に合わせてチューニングする必要があるアプリケーションでは、オペアンプ、CMOSスイッチ、抵抗またはキャパシタ・アレイを用いてチューニングできます。

連続時間フィルタは、DACを使用してオペアンプ式積分器のRC時定数を乗算することで、デジタル制御により、広い周波数範囲を高い分解能でチューニングできます (例えば、8ビットDAC内蔵チューナでは256の周波数ステップが可能)。図1に、シンプルで低次かつ低コストの連続時間フィルタ回路を示します。

このフィルタは、シリアル・ペリフェラル・インターフェース (SPI) ¹ を介して、いくつかのカットオフ周波数にチューニングできます。これは、抵抗やキャパシタ・アレイを配したスイッチを使用したり、能動部品や受動部品が多数必要な複数のDACを使用したりするよりも簡単なチューニング方法です。

SPIを介したデジタル制御は、センサーや変換器の信号の帯域制限を制御する様々なアプリケーションで役に立ちます。代表的なアプリケーションには、振動解析用の加速度センサー、ソナー探知用の水中聴音器、直線運動測定用のLVDT、音響受信・録音用のマイクロフォンなどがあります。

SPIを介してチューニング可能な2次フィルタ

図1の回路は、低ノイズCMOSクワッド・オペアンプ (LTC6242) と低ノイズデュアルPGA (プログラマブル・ゲイン・アンプ) (LTC6912-X) の2つのICを用いた状態変数型2次フィルタです。2つ

のLTC6912-Xアンプ (GAとGB) のゲインは、SPI制御により独立してプログラムされます。SPI制御によるゲイン設定値は、LTC6912-1が1、2、5、10、20、50、100、LTC6912-2が1、2、4、8、16、32、64です。図1のフィルタには3つの反転出力があり、ハイパス、バンドパス、ローパスの周波数応答を提供します。オプションの反転アンプを3つの反転出力の1つに接続すると、非反転または差動フィルタ出力になります。フィルタの2次伝達関数は、回路の共振周波数 f_0 とQ値の関数です。 f_0 周波数は、積分器のRC定数、デュアルPGAゲイン、抵抗 R_4 と R_2 の比に等しくなります ($R_4 = R_2$ かつ $G_A = G_B = \text{ゲイン}$ の場合、 $f_0 = \text{ゲイン} / 2\pi RC$)。フィルタのQ値は、抵抗 R_3 と R_2 の比、2つのPGAゲインに等しくなります ($R_4 = R_2$ かつ $G_A = G_B$ の場合、 $Q = R_3/R_2$)。フィルタの通過帯域ゲインは、ローパス、バンドパス、ハイパスの各フィルタについて、それぞれ抵抗比 R_4/R_1 、 R_3/R_1 、 R_2/R_1 に等しくなります。

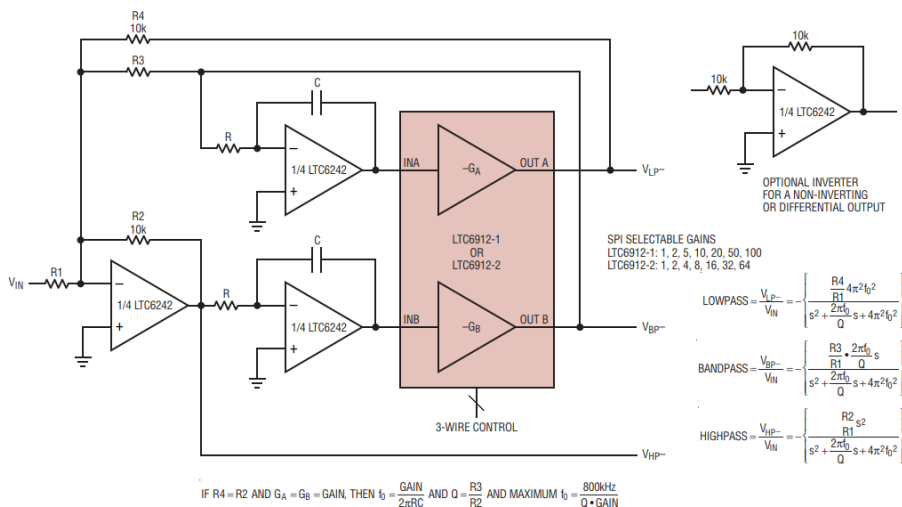


図1. SPIを介してチューニング可能な2次アクティブRCフィルタ。

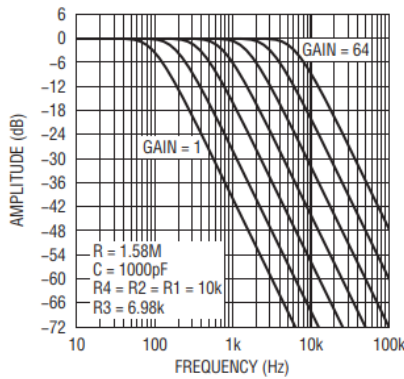


図2. LTC6912-2を使用したチューニング可能な2次バターワース・ローパス応答。

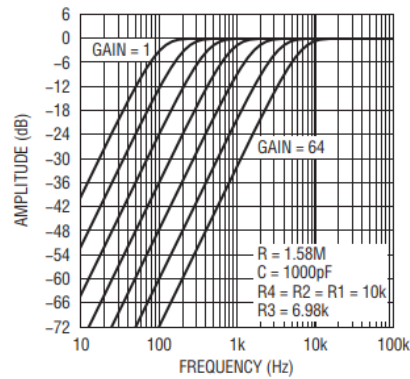


図3. LTC6912-2を使用したチューニング可能な2次バターワース・ハイパス応答。

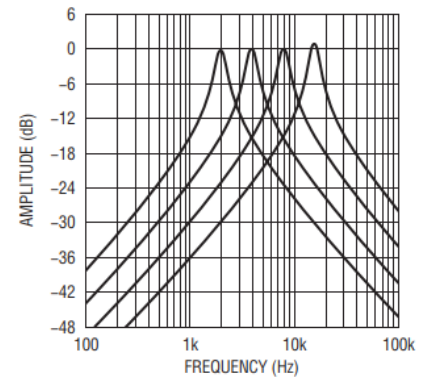


図4. ゲインが1～8のLTC6912-1を用いたチューニング可能な2次バンドパス・フィルタ。

チューニング可能なローパスまたはハイパス・フィルタ

2次の振幅応答の形状は、カットオフ周波数に対し相対的な f_0 周波数およびQ値に依存します。2次のバターワース・ハイパス応答またはローパス応答では、 f_0 周波数は f_{CUTOFF} ($f_{-3\text{dB}}$) に、フィルタのQ値は0.707になります。2次のベッセル・ハイパス応答またはローパス応答では、 f_0 周波数は $1.274 \times f_{\text{CUTOFF}}$ に、フィルタのQ値は0.577になります。図2はバターワース・ローパス・フィルタのチューニング可能範囲を示しており、100Hzの積分器周波数 ($R = 1.58\text{M}\Omega$ ($\pm 1\%$), $C = 1000\text{pF}$ ($\pm 5\%$)) とLTC6912-2を使用して、フィルタの f_{CUTOFF} を100Hzから6.4kHzまでチューニングしています。図3は、図2のバターワース・ローパス・フィルタの応答とは正反対のバ

ターワース・ハイパス・フィルタのチューニング可能範囲を示しています。ステップ変化に対する出力応答は $5/f_{\text{CUTOFF}}$ にほぼ等しくなります (例えば、ステップ変化が $1\text{kHz} \times f_{\text{CUTOFF}}$ に相当する場合、ステップ変化の5ミリ秒後にフィルタが安定します)。チューニング可能な最大の f_0 周波数は、オペアンプのゲインと帯域幅の積と、チューニングに使用される最大PGAゲインに対する回路の感度の関数です。ここに示したアンプでは、経験データに基づくと、最大 $f_0 = 800\text{kHz}/[Q \times \text{ゲイン}]$ の場合、ゲイン誤差は2dB以下に制限されます。例えば、LTC6912-1の最低のゲイン設定値1、2、5、10のみを使用してチューニングすると、2次バターワース・ローパス・フィルタ ($f_0 = f_{\text{CUTOFF}}$) を110kHz (最大 $f_0 = 800\text{kHz}/[0.707 \times 10]$) にチューニングできます。

チューニング可能なバンドパス・フィルタ

2次フィルタの-3dB帯域幅は、中心周波数 (f_{CENTER}) をQ値で割った値に等しくなります (帯域幅 $= f_{\text{CENTER}}/Q$)。積分器のRC値の許容値に対する2次バンドパス・フィルタの感度は、フィルタのQ値に比例します。一般的に $Q \leq 4$ のため、2次バンドパス・フィルタには、フィルタの2つの積分器の $\pm 1\%$ Rと $\pm 5\%$ Cを使用するのが実用的です。 $Q > 4$ である2次バンドパス・フィルタの感度は、Qが1単位増加するごとに急激に増加するため、フィルタの2つの積分器には $\pm 1\%$ RC成分の使用が望まれます。

図4は、2kHzの積分器周波数 ($R = 205\text{k}$ ($\pm 1\%$), $C = 390\text{pF}$ ($\pm 5\%$)) と、ゲイン設定値が1、2、4、8の

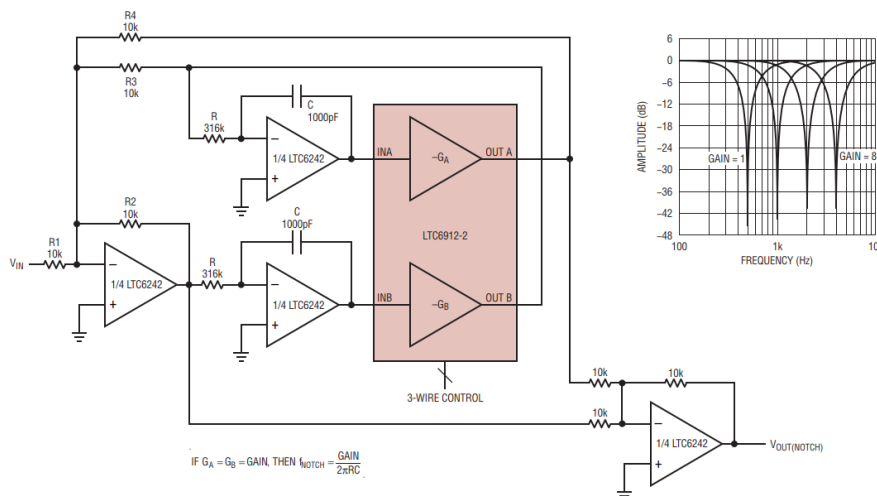


図5. SPIを介してチューニング可能な2次ノッチ・フィルタ。

LTC6912-2を使用して、2kHzから16kHzまでチューニングされた図1のバンドパス・フィルタを示しています。図4のチューニング済みの中心周波数応答は、2kHz、4kHz、8kHz、16kHzの設計値より2.73%低く、2つの積分器の回路RC値の誤差に等しくなっています（測定値はそれぞれ、Rが約206k、Cが約403pF）。16kHzでのゲイン誤差は、フィルタの周波数 f_0 が、 $Q = 4$ 、PGAゲイン = 8の場合に最大の f_0 周波数に近づくためです（最大 $f_0 = 25\text{kHz} = 800\text{kHz}/(4 \times 8)$ ）。最大 f_0 周波数は、LTC6912-Xオペアンプのゲインと帯域幅の積の関数です。

その他のフィルタ・オプション

図5に2次ノッチ・フィルタの例を示します。ノッチ・フィルタの積分器周波数は500Hz ($1/[2\pi \times 316\text{k}\Omega \times 1000\text{pF}]$) で、1、2、4、8のPGAゲインを使用すると、ノッチ周波数はそれぞれ、500Hz、1kHz、2kHz、4kHzにチューニングされます。上記のフィルタはいずれも、2つの2次回路をカスケード接続することにより、SPIを介してチューニング可能な4次フィルタにすることができます。

注

¹ SPIは、マイクロプロセッサと周辺機器との間に3線式インターフェースを使用する同期通信プロトコルです。

著者について

Philip Karantzalis

1973年以来、アナログ信号回路およびシステムのテストと設計に従事。1986年アナログ・デバイセズに入社。シグナル・コンディショニング・グループに所属し、データ・アクワイジション、RF変調器／復調器・ミキサー、ADC、高精度テスト・システム向けにベースバンド信号設計を担当。現在、アナログ・デバイセズの高精度システム・グループでシニア・アプリケーション・エンジニアとして勤務。ニューヨーク市のRCAインスティテューツ・オブ・エレクトロニクスを卒業後、サンフランシスコ州立大学で高等数学を専攻。