

アナログ・デバイセズのアクティブ・フィルタ・デザイン・ツールの使い方

著者：Hank Zumbahlen

はじめに

アナログ・デバイセズのアクティブ・フィルタ・デザイン・ツールは、全極型アクティブ・フィルタのデザインを支援します。

フィルタのデザイン・プロセスは 2 つのステップから構成されます。ステップ 1 ではフィルタ応答を決定します。すなわちフィルタの減衰および/または位相の応答を決定します。ステップ 2 では、フィルタの回路すなわち構成方法を決定します。このアプリケーション・ノートは、ステップ 1 を支援することが目的です。幾つかの標準的な応答について説明し、その減衰、群遅延、ステップ応答、インパルス応答を紹介します。次に、フィルタ・ツールを使ってフィルタをデザインします。1 つの例も示します。

標準応答

多くの伝達関数を使って、特定のフィルタの減衰および/または位相条件を満たすことができます。選択するものは、特定のシステムに依存することになります。周波数領域応答対時間領域応答の重要性を調べておく必要があります。また、これら両者とフィルタの複雑さ、したがってコストとのトレードオフも行う必要があります。

バターワース・フィルタ

バターワース・フィルタは、減衰応答と位相応答との間の最適妥協を表しています。通過帯域または阻止帯域にリップルがないため、最平坦フィルタと呼ばれることもあります。バターワース・フィルタでは、通過帯域から阻止帯域への遷移領域を比較的広くすることにより、平均過渡特性を持つ平坦性を実現しています。

バターワース・フィルタのエレメント値は、他の多くのフィルタ・タイプに比べると、実用的であり、かつクリティカルではありません。図 1 に、周波数応答、群遅延、インパルス応答、ステップ応答を示します。表 II に、極の位置と対応する ω_0 項と α 項を示します。

チェビシェフ・フィルタ

チェビシェフ(ロシア後から Chevyshev, Tschebychev, Tschebyscheff または Tchevysheff と翻訳されることがあります)フィルタは、同じ次数のバターワース・フィルタより狭い遷移領域を持っていますが、通過帯域のリップルが大きくなっています。このフィルタ名は、最大リップルの大きさを制限するチェビシェフ基準に由来します。

チェビシェフ・フィルタは、DC で 0 dB の相対減衰量を持っています。奇数次フィルタは、0 dB からリップル値までの減衰帯域を持っています。偶数次フィルタは、通過帯域のリップルに等しいゲインを持っています。通過帯域内のリップルのサイクル数は、フィルタの次数に一致します。

チェビシェフ・フィルタは、一般にリップル帯域のエッジが $\omega_0 = 1$ となるように正規化されます。

3 dB 帯域幅は次式で表されます。

$$A_{3dB} = \frac{1}{n} \cosh^{-1} \left(\frac{1}{\epsilon} \right) \quad (1)$$

表 I に、この値を示します。

図 2～図 6 に、種々のチェビシェフ・フィルタの周波数応答、群遅延、インパルス応答、ステップ応答を示します。表 III～表 VII に、極の位置と対応する ω_0 項と α 項を示します。

表 I. チェビシェフ・カットオフ周波数(-3 dB 周波数)

ORDER	0.01dB	0.1dB	0.25dB	0.5dB	1dB
2	3.30362	1.93432	1.59814	1.38974	1.21763
3	1.87718	1.38899	1.25289	1.16749	1.09487
4	1.46690	1.21310	1.13977	1.09310	1.05300
5	1.29122	1.13472	1.08872	1.05926	1.03381
6	1.19941	1.09293	1.06134	1.04103	1.02344
7	1.14527	1.06800	1.04495	1.03009	1.01721
8	1.11061	1.05193	1.03435	1.02301	1.01316
9	1.08706	1.04095	1.02711	1.01817	1.01040
10	1.07033	1.03313	1.02194	1.01471	1.00842

ベッセル・フィルタ

バターワース・フィルタでは、振幅動作と過渡動作が優れています。チェビシェフ・フィルタでは、過渡動作を犠牲にして振幅応答を改善しています。ベッセル・フィルタは、通過帯域での線形位相(すなわち遅延の一定化)により過渡応答を向上させるように最適化されています。これは、周波数応答が比較的低下すること(振幅弁別の低下)を意味しています。

図 7 に、ベッセル・フィルタの周波数応答、群遅延、インパルス応答、ステップ応答を示します。表 VIII に、極の位置と対応する ω_0 項と α 項を示します。

等リップル誤差を持つ線形位相

線形位相フィルタは、ベッセル・フィルタと比較すると、広い範囲の通過帯域で線形位相応答を提供し、さらにカットオフより離れたところで優れた減衰量を提供します。これは、チェビシェフの場合の振幅リップルと同様に、位相応答にリップルを持たせることにより実現されています。リップルを大きくすると、一定遅延の領域が阻止帯域まで広がります。このために群遅延にもリップルが発生します。リップルは位相応答から発生するためです。ステップ応答では、オーバーシュートがベッセル・フィルタより少し大きくなり、インパルス応答ではリングングが少し大きくなります。

図 8 と図 9 に、それぞれ誤差 0.05° と 0.5° での等リップル・フィルタの周波数応答、群遅延、インパルス応答、ステップ応答を示します。表 IX と表 X に、極の位置と対応する ω_0 項と α 項を示します。

6dB ガウス・フィルタと 12 dB ガウス・フィルタ

6dB ガウス・フィルタと 12dB ガウス・フィルタは、ベッセル・フィルタの場合と同様に、チェビシェフ・フィルタとガウス・フィルタとの間の妥協を表しています。トランジション・フィルタは、通過帯域でほぼ線形の位相シフトと滑らかで単調なロールオフを持っています。通過帯域より上には(特に大きな値の n では)、ブレイク・ポイントがあります。このブレイク・ポイントを超えると、ベッセル・フィルタに比べて減衰量が急激に大きくなります。

6dB ガウス・フィルタは、バターワース・フィルタの場合に比べて、通過帯域の過渡応答が優れています。ブレイク・ポイント($\omega_0 = 1.5$)の上では、ロールオフはバターワース・フィルタの場合に似ています。

12dB ガウス・フィルタの通過帯域の過渡応答は、バターワース・フィルタの場合よりかなり優れています。12 dB ブレイク・ポイント($\omega_0 = 2$)の上では、減衰量はバターワース・フィルタの場合より小さくなっています。

図 10 と図 11 に、それぞれ 6dB ガウス・フィルタと 12dB ガウス・フィルタの周波数応答、群遅延、インパルス応答、ステップ応答を示します。表 XI と表 XII に、極の位置と対応する ω_0 項と α 項を示します。

プロトタイプ応答カーブの使い方

前述の全極型応答を持つ幾つかのローパス・プロトタイプについて、応答カーブとデザイン・テーブルをカタログ化できるようになりました。すべてのカーブは、 -3 dB カットオフ周波数 = 1 Hz に正規化されます。これにより、種々の応答を直接比較することができます。すべてのケースで、 $2 \sim 10$ 極のケースの振幅応答を 0.1 Hz \sim 10 Hz の周波数範囲について示します。次に、0.1 Hz \sim 2 Hz の通過帯域の詳細を示します。0.1 Hz \sim 10 Hz の群遅延、インパルス応答、0 sec \sim 5 sec のステップ応答も示します。

実在のフィルタの応答を求めるためにカーブを使う場合には、カーブを正規化する必要があります。振幅応答の場合、これは周波数軸にカットオフ周波数 F_c を乗算することにより行われます。群遅延カーブを非正規化するときは、遅延軸を $2\pi F_c$ で除算し、周波数軸に F_c を乗算します。ステップ応答を非正規化するときは、時間軸を $2\pi F_c$ で除算し、振幅軸に $2\pi F_c$ を乗算します。

ハイパス・フィルタの場合、振幅応答の周波数軸を単純に反転します。ローパス・フィルタをハイパス・フィルタへ変換するときは、過渡動作は保存されません。Zverev は、これらの応答を計算する方法を提供します。

ローパスを狭帯域バンドパスに変換するときは、0 Hz 軸を中心周波数 F_0 へ移動します。これは、中心周波数を中心とするバンドパスのケースの応答が 0 Hz を中心とするローパス応答に一致することに由来します。ローパス・フィルタの周波数応答カーブは、実際に 0 Hz を中心とする鏡像になります(一般には負の周波数を考慮しませんが)。

バンドパス・フィルタの群遅延カーブを非正規化するときは、遅延軸を πBW で除算します。ここで、BW は 3 dB 帯域幅(単位は Hz)です。次に、周波数軸に $BW/2$ を乗算します。一般に、 F_0 でのバンドパス・フィルタの遅延は、0 Hz で同じ帯域幅を持つローパス・プロトタイプの遅延の 2 倍になります。これは、ローパスからバンドパスへ変換すると次数 $2n$ のフィルタが得られるという事実に基づいています(一般に、変換対象のローパス・フィルタと同じ次数を持つとは言われています)。この近似は、狭帯域フィルタに適用されます。フィルタの帯域幅を大きくすると、カーブに歪みが発生します。遅延の対称性が損なわれて、 F_0 より下でピーキングが発生します。

バンドパス・フィルタ応答の包絡線は、ローパス・プロトタイプのステップ応答に似ています。さらに正確には、 $1/2$ の帯域幅を持つローパス・フィルタのステップ応答とほぼ同じです。バンドパス・フィルタの包絡線応答を求めるときは、ローパス・プロトタイプのステップ応答の時間軸を πBW で除算します。ここで、BW は 3 dB 帯域幅です。前述のオーバーシュートやリングングなどは、キャリアの包絡線に適用できるようになりました。

キャリアの短いパースト(ここでパースト幅はバンドパス・フィルタの非正規化ステップ応答の立ち上がり時間より十分小さい)に対する狭帯域バンドパス・フィルタ応答の包絡線は、ローパス・プロトタイプインパルス応答を非正規化することにより求めることができます。これを実行するときは、振幅軸に πBW を乗算し、時間軸を πBW で除算します。ここで、 BW は 3 dB 帯域幅です。パ

ースト区間で多くのサイクルが発生するようにキャリア周波数は十分高いものと仮定します。

群遅延、ステップ、インパルスの各カーブを使って、フィルタによって発生する波形に対する歪みを予測できませんが、フィルタを比較するときにはこれらは有効な係数です。

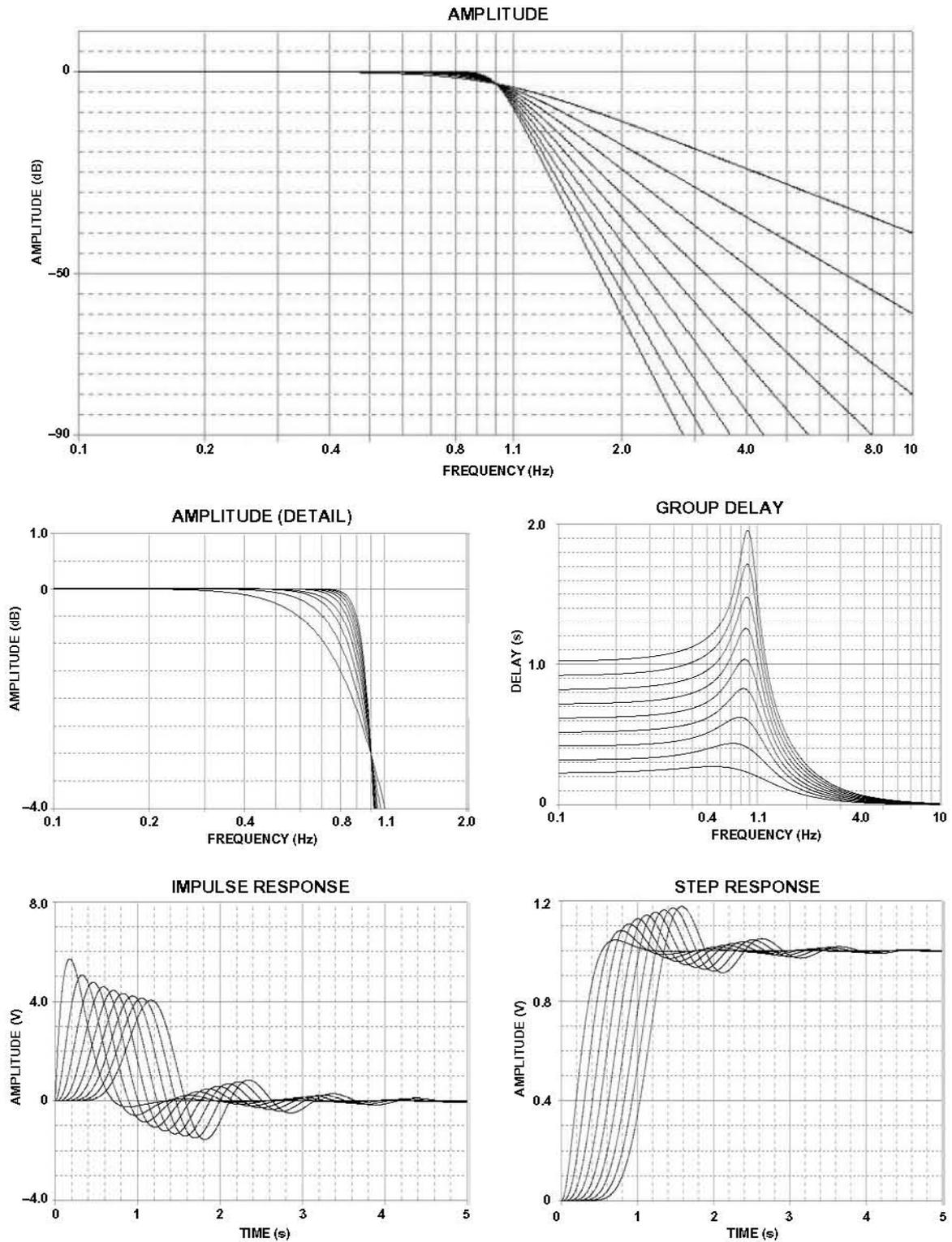


図 1.パワース応答

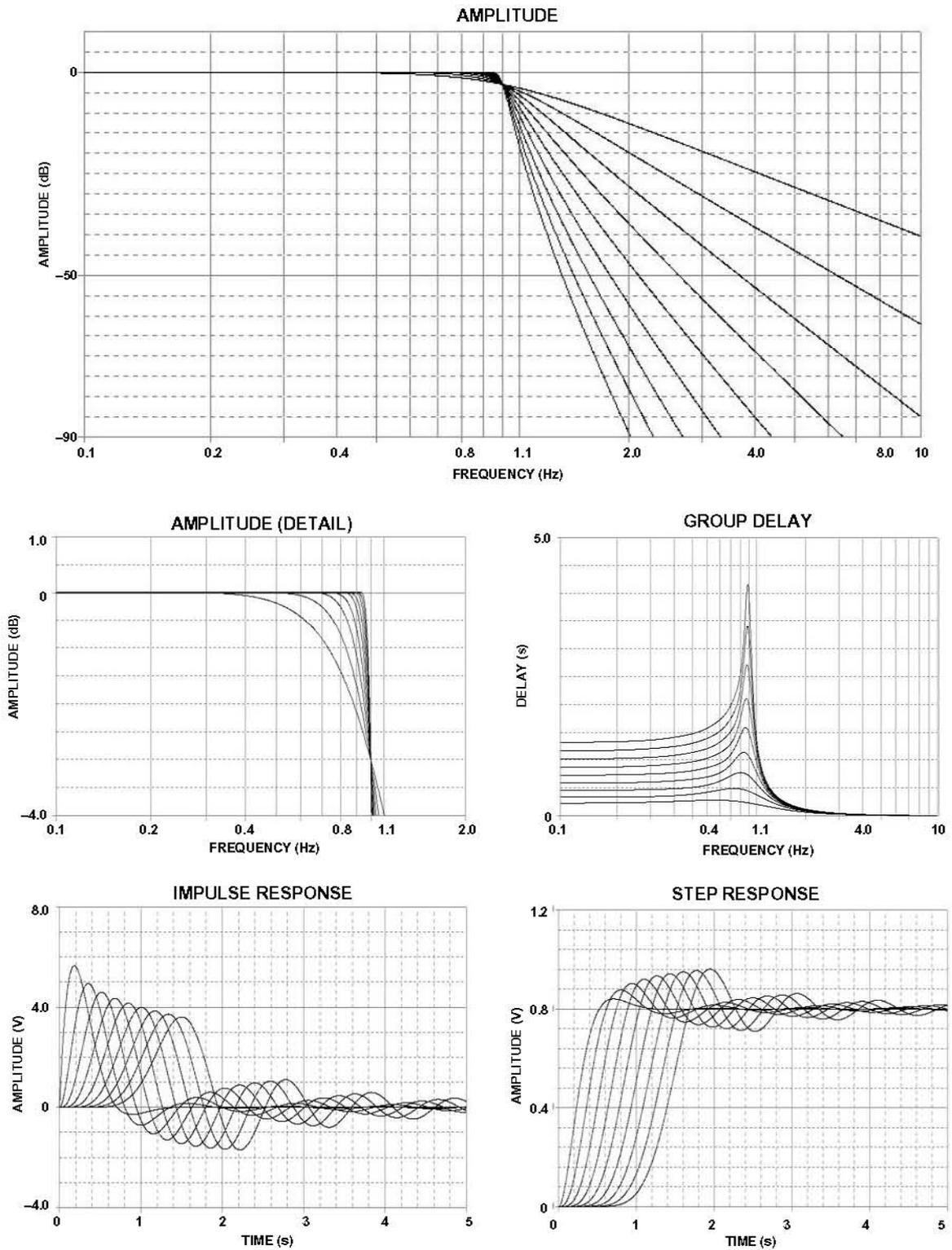


図 2. 0.01 dB チェビシェフ応答

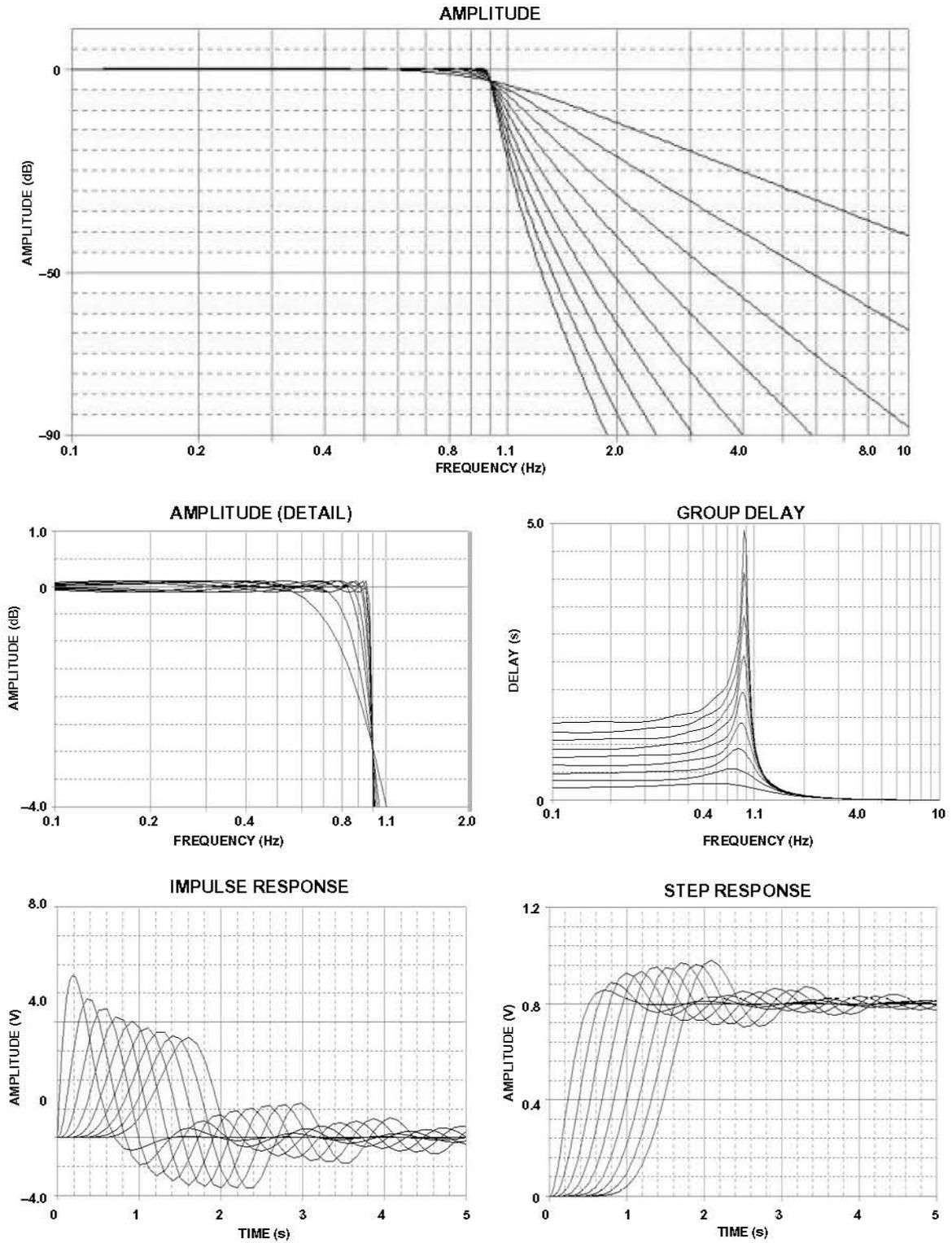


図 3. 0.1 dB チェビシェフ応答

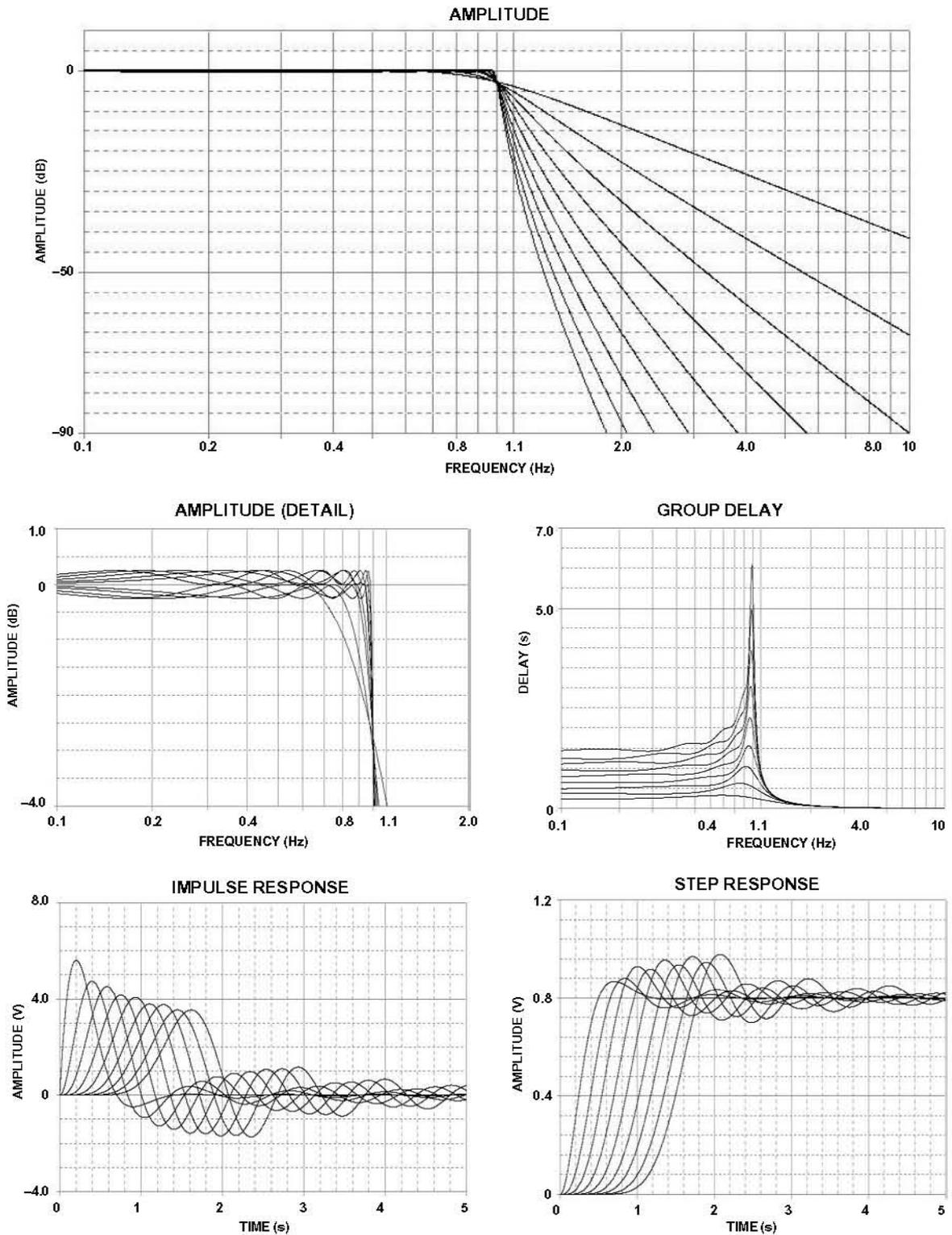


図 4. 0.25 dB チェビシェフ応答

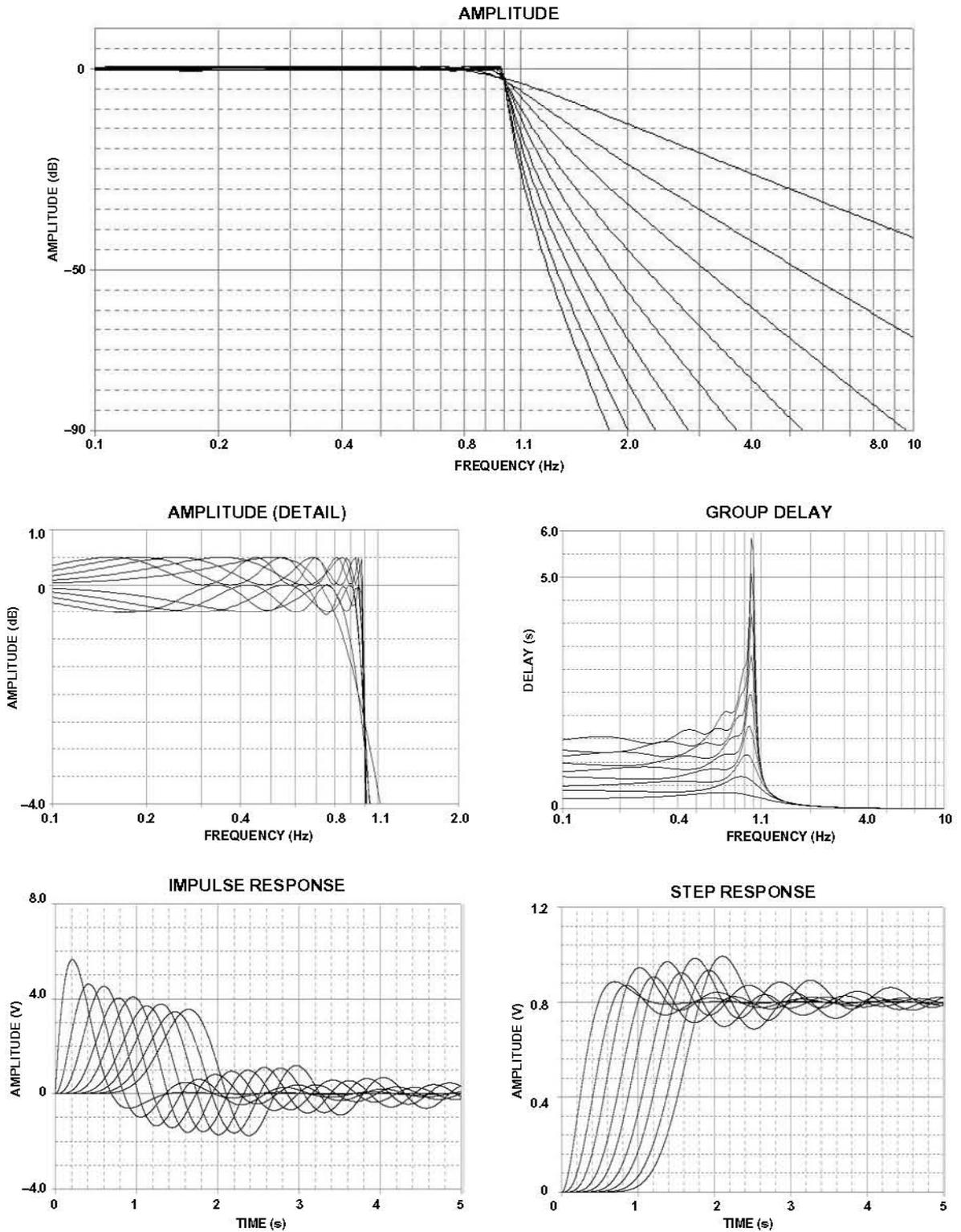


図 5. 0.5 dB チェビシェフ応答

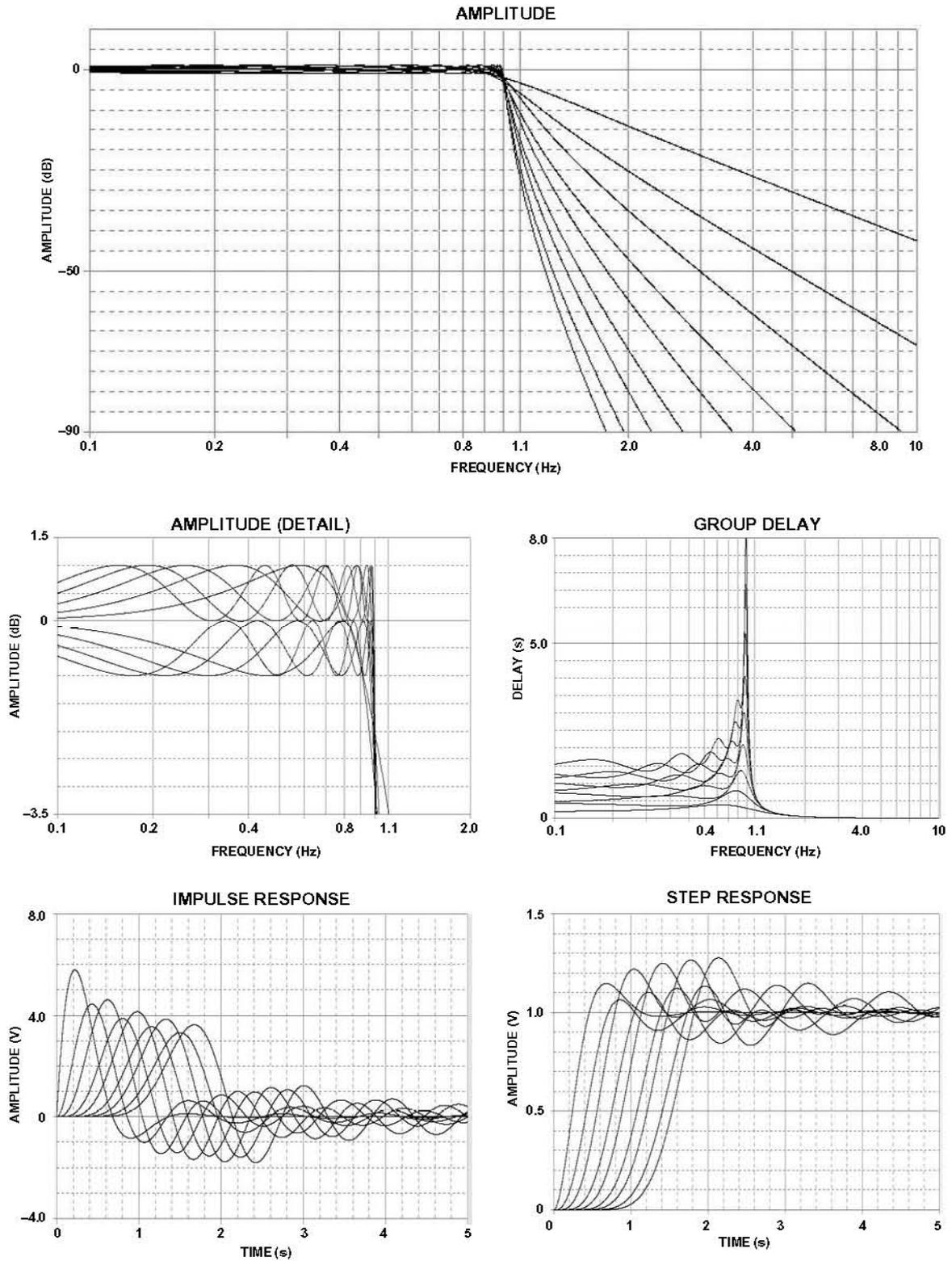


図 6.1 dB チェビシェフ応答

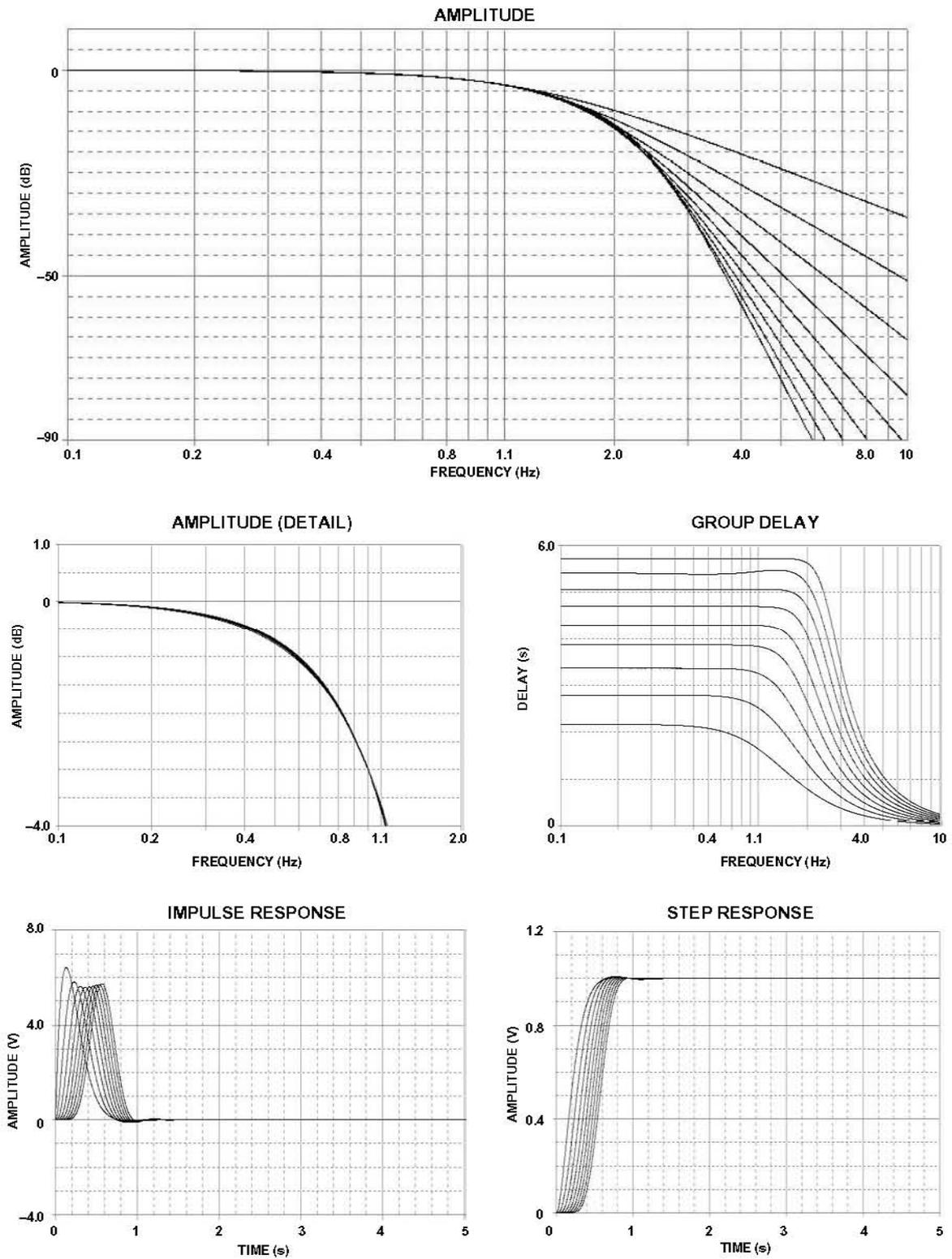


図7.ベッセル応答

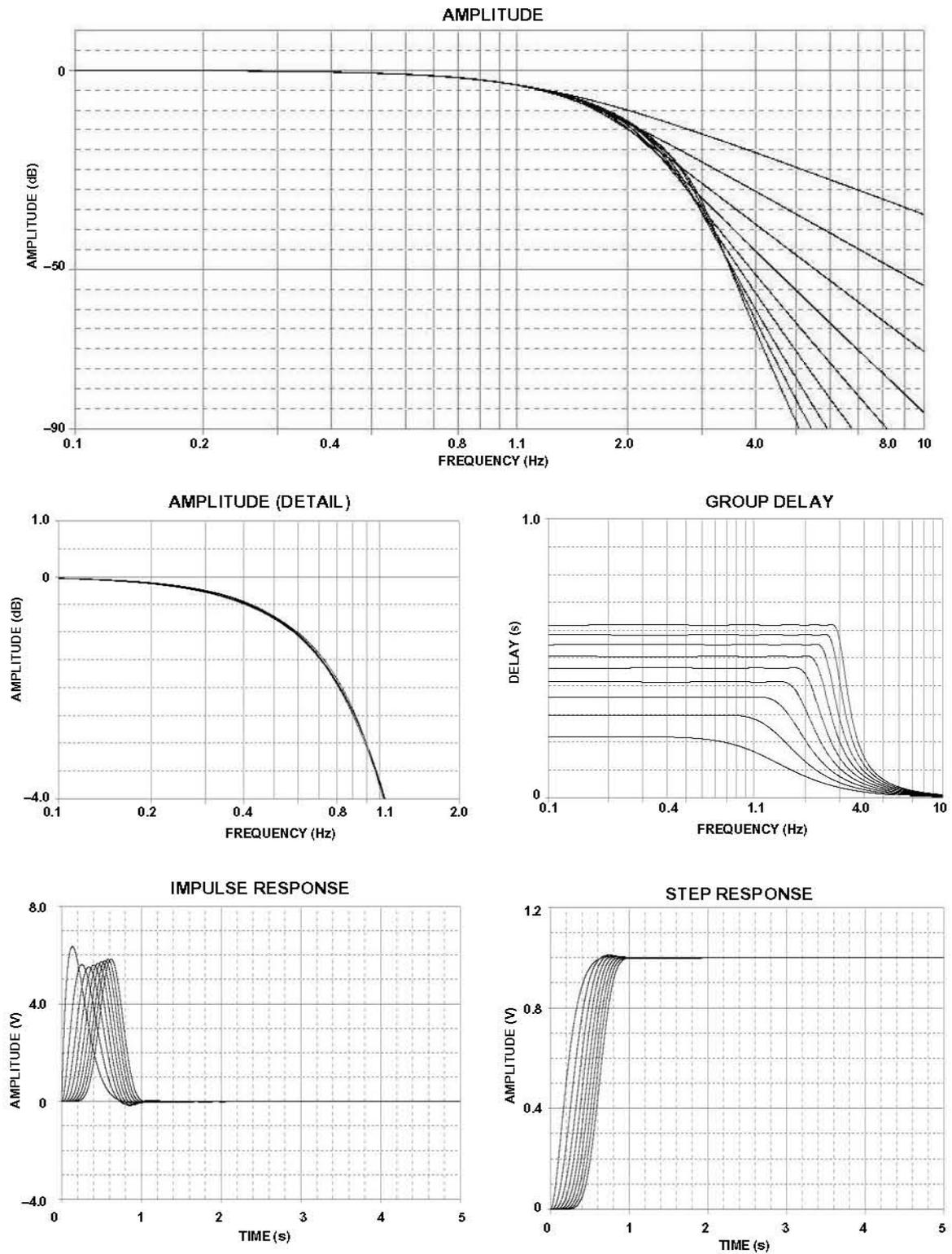


図 8.等リップル誤差 0.05°の線形位相応答

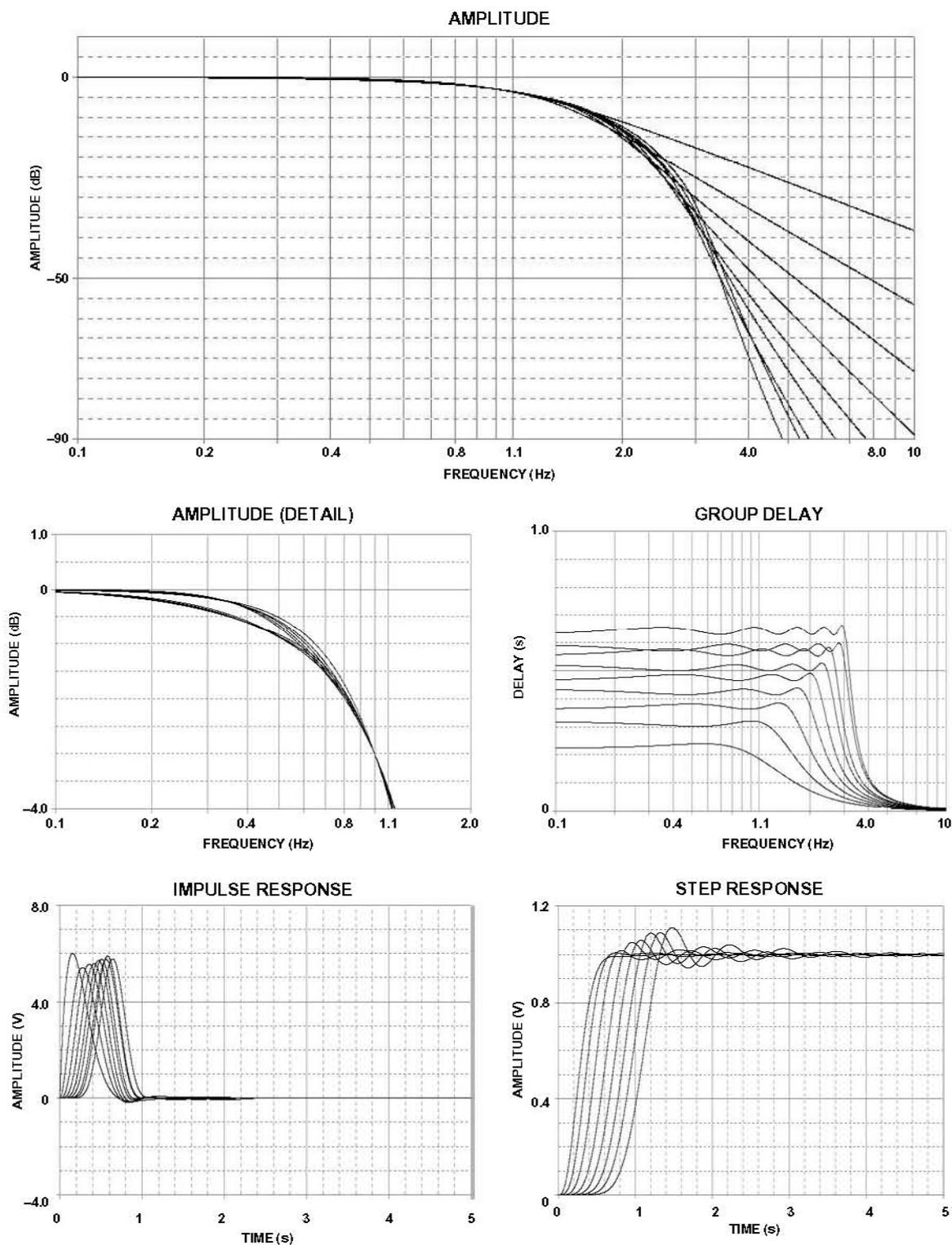


図 9.等リップル誤差 0.5°の線形位相応答

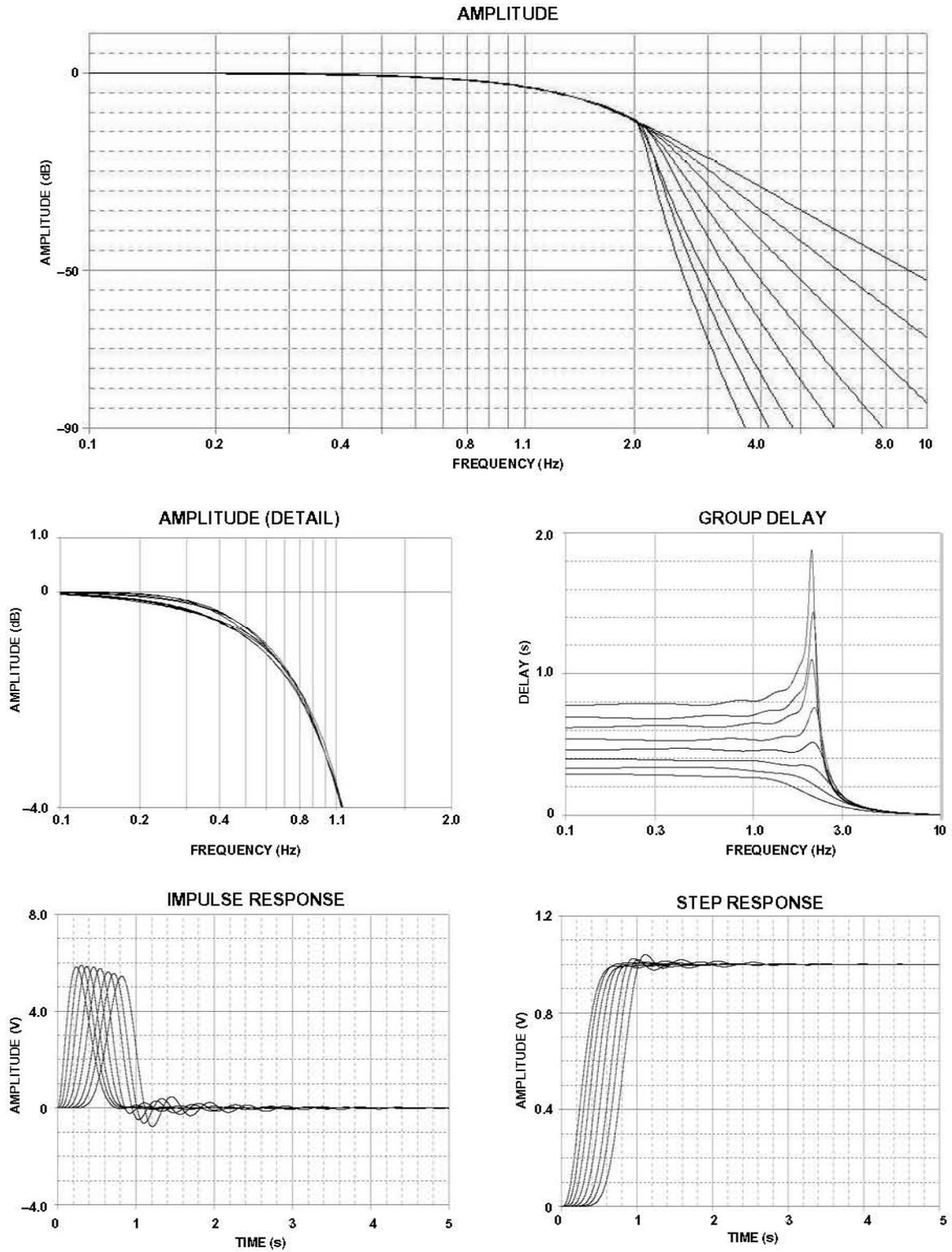


図 10. 12dB ガウス応答

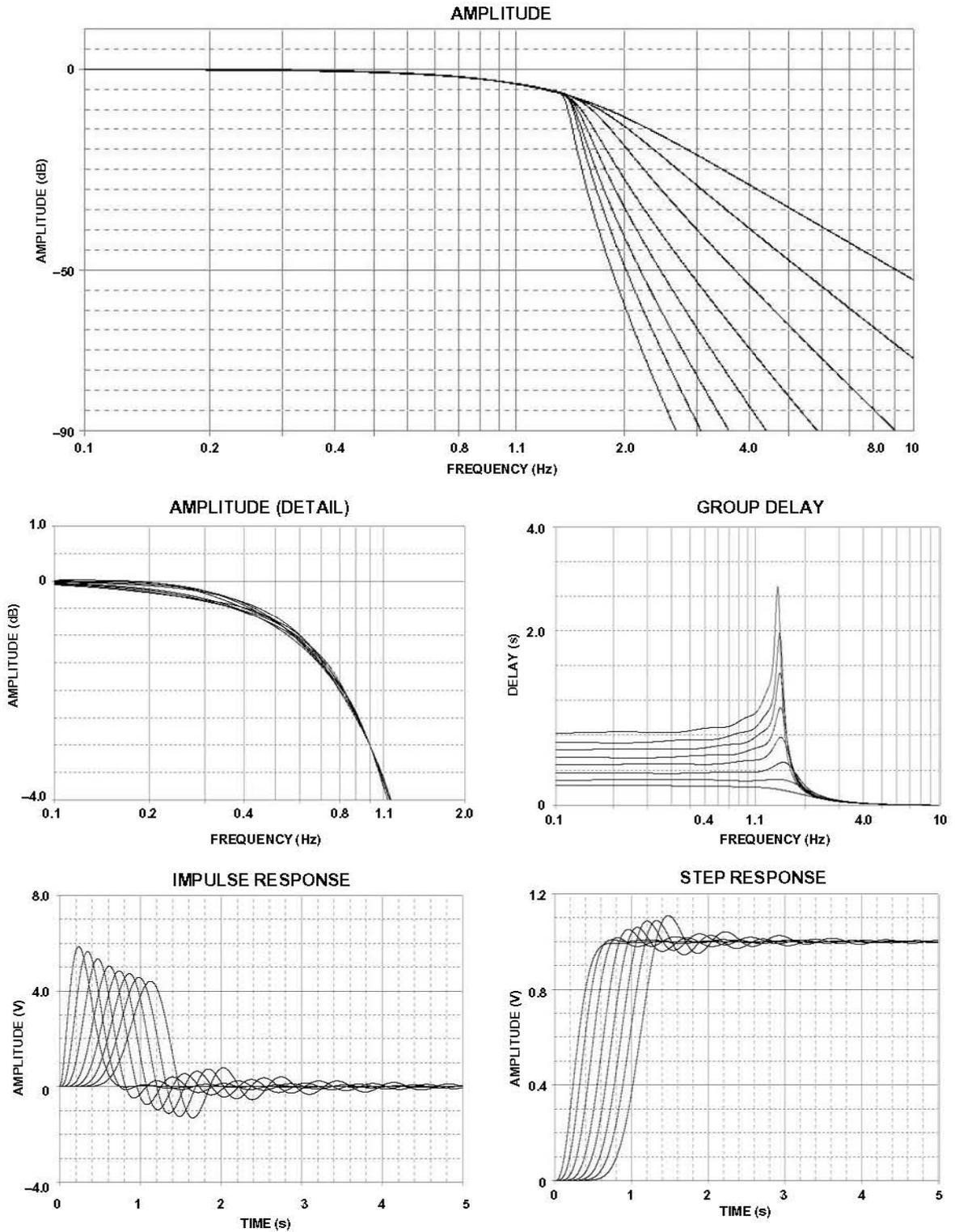


図 11. 6dB ガウス応答

表 II. バタワース・デザイン

ORDER	SECTION	REAL PART	IMAGINARY PART	F_0	α	Q	-3 dB FREQUENCY	PEAKING FREQUENCY	PEAKING LEVEL
2	1	0.7071	0.7071	1.0000	1.4142	0.7071	1.0000		
3	1	0.5000	0.8660	1.0000	1.0000	1.0000		0.7071	1.2493
	2	1.0000		1.0000			1.0000		
4	1	0.9239	0.3827	1.0000	1.8478	0.5412	0.7195		
	2	0.3827	0.9239	1.0000	0.7654	1.3065		0.8409	3.0102
5	1	0.8090	0.5878	1.0000	1.6180	0.6180	0.8588		
	2	0.3090	0.9511	1.0000	0.6180	1.6182		0.8995	4.6163
	3	1.0000		1.0000			1.0000		
6	1	0.9659	0.2588	1.0000	1.9319	0.5176	0.6758		
	2	0.7071	0.7071	1.0000	1.4142	0.7071	1.0000		
	3	0.2588	0.9659	1.0000	0.5176	1.9319		0.9306	6.0210
7	1	0.9010	0.4339	1.0000	1.8019	0.5550	0.7449		
	2	0.6235	0.7818	1.0000	1.2470	0.8019		0.4717	0.2204
	3	0.2225	0.9749	1.0000	0.4450	2.2471		0.9492	7.2530
	4	1.0000		1.0000			1.0000		
8	1	0.9808	0.1951	1.0000	1.9616	0.5098	0.6615		
	2	0.8315	0.5556	1.0000	1.6629	0.6013	0.8295		
	3	0.5556	0.8315	1.0000	1.1112	0.9000		0.6186	0.6876
	4	0.1951	0.9808	1.0000	0.3902	2.5628		0.9612	8.3429
9	1	0.9397	0.3420	1.0000	1.8794	0.5321	0.7026		
	2	0.7660	0.6428	1.0000	1.5320	0.6527	0.9172		
	3	0.5000	0.8660	1.0000	1.0000	1.0000		0.7071	1.2493
	4	0.1737	0.9848	1.0000	0.3474	2.8785		0.9694	9.3165
	5	1.0000		1.0000			1.0000		
10	1	0.9877	0.1564	1.0000	1.9754	0.5062	0.6549		
	2	0.8910	0.4540	1.0000	1.7820	0.5612	0.7564		
	3	0.7071	0.7071	1.0000	1.4142	0.7071	1.0000		
	4	0.4540	0.8910	1.0000	0.9080	1.1013		0.7667	1.8407
	5	0.1564	0.9877	1.0000	0.3128	3.1970		0.9752	10.2023

表 III.0.01 dB チェビシェフ・デザイン

ORDER	SECTION	REAL PART	IMAGINARY PART	F_0	α	Q	-3 dB FREQUENCY	PEAKING FREQUENCY	PEAKING LEVEL
2	1	0.6743	0.7075	0.9774	1.3798	0.7247		0.2142	0.0100
3	1	0.4233	0.8663	0.9642	0.8780	1.1389		0.7558	2.0595
	2	0.8467		0.8467			0.8467		
4	1	0.6762	0.3828	0.7770	1.7405	0.5746	0.6069		
	2	0.2601	0.9241	0.9656	0.5801	1.7237		0.8806	5.1110
5	1	0.5120	0.5879	0.7796	1.3135	0.7613		0.2889	0.0827
	2	0.1956	0.9512	0.9711	0.4028	2.4824		0.9309	8.0772
	3	0.6328		0.6328			0.6328		
6	1	0.5335	0.2588	0.5930	1.7995	0.5557	0.4425		
	2	0.3906	0.7072	0.8079	0.9670	1.0342		0.5895	1.4482
	3	0.1430	0.9660	0.9765	0.2929	3.4144		0.9554	10.7605
7	1	0.4393	0.4339	0.6175	1.4229	0.7028	0.6136		
	2	0.3040	0.7819	0.8389	0.7247	1.3798		0.7204	3.4077
	3	0.1085	0.9750	0.9810	0.2212	4.5208		0.9689	13.1578
	4	0.4876		0.4876			0.4876		
8	1	0.4268	0.1951	0.4693	1.8190	0.5498	0.3451		
	2	0.3168	0.5556	0.6396	0.9907	1.0094		0.4564	1.3041
	3	0.2418	0.8315	0.8659	0.5585	1.7906		0.7956	5.4126
	4	0.0849	0.9808	0.9845	0.1725	5.7978		0.9771	15.2977
9	1	0.3686	0.3420	0.5028	1.4661	0.6821	0.4844		
	2	0.3005	0.6428	0.7096	0.8470	1.1807		0.5682	2.3008
	3	0.1961	0.8661	0.8880	0.4417	2.2642		0.8436	7.3155
	4	0.0681	0.9848	0.9872	0.1380	7.2478		0.9824	17.2249
	5	0.3923		0.3923			0.3923		
10	1	0.3522	0.1564	0.3854	1.8279	0.5471	0.2814		
	2	0.3178	0.454	0.5542	1.1469	0.8719		0.3242	0.5412
	3	0.2522	0.7071	0.7507	0.6719	1.4884		0.6606	3.9742
	4	0.1619	0.891	0.9056	0.3576	2.7968		0.8762	9.0742
	5	0.0558	0.9877	0.9893	0.1128	8.8645		0.9661	18.9689

表 IV.0.1 dB チェビシェフ・デザイン

ORDER	SECTION	REAL PART	IMAGINARY PART	F ₀	α	Q	-3 dB FREQUENCY	PEAKING FREQUENCY	PEAKING LEVEL
2	1	0.6104	0.7106	0.9368	1.3032	0.7673		0.3638	0.0999
3	1	0.3490	0.8684	0.9359	0.7458	1.3408		0.7952	3.1978
	2	0.6970		0.6970			0.6970		
4	1	0.2177	0.9254	0.9507	0.4580	2.1834		0.8994	7.0167
	2	0.5257	0.3833	0.6506	1.6160	0.6188	0.5596		
5	1	0.3842	0.5884	0.7027	1.0935	0.9145		0.4457	0.7662
	2	0.1468	0.9521	0.9634	0.3048	3.2812		0.9407	10.4226
	3	0.4749		0.4749			0.4749		
6	1	0.3916	0.2590	0.4695	1.6682	0.5995	0.3879		
	2	0.2867	0.7077	0.7636	0.7509	1.3315		0.6470	3.1478
	3	0.1049	0.9687	0.9724	0.2158	4.6348		0.9610	13.3714
7	1	0.3178	0.4341	0.5380	1.1814	0.8464		0.2957	0.4157
	2	0.2200	0.7823	0.8126	0.5414	1.8469		0.7507	5.6595
	3	0.0785	0.9755	0.9787	0.1604	6.2335		0.9723	15.9226
	4	0.3528		0.3528			0.3528		
8	1	0.3058	0.1952	0.3628	1.6858	0.5932	0.2958		
	2	0.2529	0.5558	0.6106	0.6283	1.2073		0.4949	2.4532
	3	0.1732	0.8319	0.8497	0.4077	2.4531		0.8137	7.9794
	4	0.0608	0.9812	0.9831	0.1237	8.0819		0.9793	18.1669
9	1	0.2622	0.3421	0.4310	1.2166	0.8219		0.2197	0.3037
	2	0.2137	0.6430	0.6776	0.6308	1.5854		0.6064	4.4576
	3	0.1395	0.8663	0.8775	0.3180	3.1450		0.8550	10.0836
	4	0.0485	0.9852	0.9864	0.0982	10.1795		0.9840	20.1650
	5	0.2790		0.2790			0.2790		
10	1	0.2493	0.1564	0.2943	1.6942	0.5902	0.2382		
	2	0.2249	0.4541	0.5067	0.8876	1.1266		0.3945	1.9880
	3	0.1785	0.7073	0.7295	0.4894	2.0434		0.6844	6.4750
	4	0.1146	0.8913	0.8986	0.2551	3.9208		0.8839	11.9386
	5	0.0395	0.9880	0.9888	0.0799	12.5163		0.9872	21.9565

表 V. 0.25 dB チェビシェフ・デザイン

ORDER	SECTION	REAL PART	IMAGINARY PART	F ₀	α	Q	-3 dB FREQUENCY	PEAKING FREQUENCY	PEAKING LEVEL
2	1	0.5621	0.7154	0.9098	1.2396	0.8093		0.4425	0.2502
3	1	0.3062	0.8712	0.9234	0.6632	1.5079		0.6150	4.0734
	2	0.6124		0.6124			0.6124		
4	1	0.4501	0.3840	0.5916	1.5215	0.6572	0.5470		
	2	0.1865	0.9272	0.9458	0.3044	2.5396		0.9082	8.2538
5	1	0.3247	0.5097	0.6727	0.9651	1.0359		0.4917	1.4585
	2	0.1240	0.9533	0.9613	0.2580	3.8763		0.9452	11.8413
	3	0.4013		0.4013			0.4013		
6	1	0.3284	0.2593	0.4184	1.5697	0.6371	0.3730		
	2	0.2404	0.7083	0.7480	0.6428	1.5557		0.6863	4.3121
	3	0.0880	0.9675	0.9715	0.1611	5.5205		0.9635	14.6753
7	1	0.2852	0.4344	0.5090	1.0421	0.9598		0.3441	1.0173
	2	0.1835	0.7620	0.8010	0.4565	2.1906		0.7610	7.0443
	3	0.0655	0.9761	0.9783	0.1330	7.4670		0.9730	17.4835
	4	0.2944		0.2944			0.2944		
8	1	0.2543	0.1851	0.3206	1.5667	0.6304	0.2622		
	2	0.2156	0.5501	0.5964	0.7280	1.3832		0.5120	3.4258
	3	0.1441	0.8323	0.8447	0.3412	2.9309		0.8197	9.4693
	4	0.0506	0.9617	0.9630	0.1079	9.7173		0.9604	19.7624
9	1	0.2176	0.3423	0.4056	1.0730	0.9320		0.2842	0.8624
	2	0.1774	0.6133	0.6673	0.5317	1.8906		0.6164	5.8052
	3	0.1158	0.8667	0.8744	0.2649	3.7755		0.8580	11.6163
	4	0.0402	0.9856	0.9884	0.0815	12.2859		0.9848	21.7812
	5	0.2315		0.2315			0.2315		
10	1	0.2065	0.1565	0.2591	1.5840	0.6274	0.2287		
	2	0.1863	0.4543	0.4910	0.7588	1.3176		0.4143	3.0721
	3	0.1478	0.7075	0.7228	0.4000	2.4451		0.6919	7.9515
	4	0.0949	0.8915	0.8965	0.2117	4.7236		0.8864	13.5344
	5	0.0327	0.9883	0.9888	0.0681	15.1199		0.9878	25.5957

表 VI.0.5 dB チェビシェフ・デザイン

ORDER	SECTION	REAL PART	IMAGINARY PART	F ₀	α	Q	-3 dB FREQUENCY	PEAKING FREQUENCY	PEAKING LEVEL
2	1	0.5129	0.7225	1.2314	1.1577	0.8638		0.7072	0.5002
3	1	0.2683	0.8753	1.0688	0.5861	1.7061		0.9727	5.0301
	2	0.5366		0.6265			0.6265		
4	1	0.3872	0.3850	0.5969	1.4182	0.7051	0.5951		
	2	0.1605	0.9297	1.0313	0.3402	2.9391		1.0010	9.4918
5	1	0.2767	0.5902	0.6905	0.8490	1.1779		0.5522	2.2849
	2	0.1057	0.9550	1.0178	0.2200	4.5451		1.0054	13.2037
	3	0.3420		0.3623			0.3623		
6	1	0.2784	0.2596	0.3963	1.4627	0.6836	0.3827		
	2	0.2037	0.7091	0.7680	0.5522	1.8109		0.7071	5.5025
	3	0.0746	0.9687	1.0114	0.1536	6.5119		1.0055	16.2998
7	1	0.2241	0.4349	0.5040	0.9161	1.0916		0.3839	1.7838
	2	0.1550	0.7836	0.8228	0.3881	2.5767		0.7912	8.3880
	3	0.0553	0.9771	1.0081	0.1130	8.8487		1.0049	18.9515
	4	0.2487		0.2562			0.2562		
8	1	0.2144	0.1955	0.2968	1.4779	0.6767	0.2835		
	2	0.1817	0.5565	0.5989	0.6208	1.6109		0.5381	4.5815
	3	0.1214	0.8328	0.8810	0.2885	3.4662		0.8429	10.8885
	4	0.0426	0.9824	1.0060	0.0867	11.5305		1.0041	21.2452
9	1	0.1831	0.3425	0.3954	0.9429	1.0605		0.2947	1.6023
	2	0.1493	0.6436	0.6727	0.4520	2.2126		0.6374	7.1258
	3	0.0974	0.8671	0.8884	0.2233	4.4779		0.8773	13.0759
	4	0.0338	0.9861	1.0046	0.0686	14.5829		1.0034	23.2820
	5	0.1949		0.1984			0.1984		
10	1	0.1736	0.1566	0.2338	1.4851	0.6734	0.2221		
	2	0.1566	0.4545	0.4807	0.6515	1.5349		0.4267	4.2087
	3	0.1243	0.7078	0.7186	0.3459	2.8907		0.6968	9.3520
	4	0.0798	0.8919	0.8955	0.1782	5.6107		0.8883	15.0149
	5	0.0275	0.9887	0.9891	0.0556	17.9833		0.9883	25.1008

表 VII.1 dB チェビシェフ・デザイン

ORDER	SECTION	REAL PART	IMAGINARY PART	F ₀	α	Q	-3 dB FREQUENCY	PEAKING FREQUENCY	PEAKING LEVEL
2	1	0.4508	0.7351	0.8623	1.0456	0.9554		0.5806	0.9955
3	1	0.2257	0.8822	0.9108	0.4957	2.0173		0.8528	6.3708
	2	0.4513		0.4513			0.4513		
4	1	0.3199	0.3888	0.5019	1.2746	0.7845		0.2174	0.1557
	2	0.1325	0.9339	0.9433	0.2809	3.5584		0.9245	11.1142
5	1	0.2265	0.5918	0.6337	0.7149	1.3988		0.5467	3.5089
	2	0.0865	0.9575	0.9614	0.1800	5.5559		0.9536	14.9305
	3	0.2800		0.2800			0.2800		
6	1	0.2268	0.2601	0.3451	1.3144	0.7608		0.1273	0.0813
	2	0.1550	0.7108	0.7273	0.4262	2.3462		0.6935	7.6050
	3	0.0608	0.9707	0.9726	0.1249	8.0036		0.9688	18.0827
7	1	0.1819	0.4354	0.4719	0.7710	1.2971		0.3956	2.9579
	2	0.1259	0.7846	0.7946	0.3169	3.1558		0.7744	10.0927
	3	0.0449	0.9785	0.9795	0.0918	10.8962		0.9775	20.7563
	4	0.2019		0.2019			0.2019		
8	1	0.1737	0.1956	0.2616	1.3260	0.7530		0.0899	0.0611
	2	0.1473	0.5571	0.5762	0.5112	1.9560		0.5373	6.1210
	3	0.0984	0.8337	0.8395	0.2344	4.2657		0.8279	12.6599
	4	0.0346	0.9836	0.9842	0.0702	14.2391		0.9830	23.0750
9	1	0.1482	0.3427	0.3734	0.7938	1.2597		0.3090	2.7498
	2	0.1208	0.6442	0.6554	0.3686	2.7129		0.6328	8.8187
	3	0.0788	0.8679	0.8715	0.1809	5.5268		0.8643	14.8852
	4	0.0274	0.9869	0.9873	0.0555	18.0226		0.9865	25.1197
	5	0.1577		0.1577			0.1577		
10	1	0.1403	0.1567	0.2103	1.3341	0.7498		0.0898	0.0530
	2	0.1266	0.4548	0.4721	0.5363	1.9645		0.4368	5.7354
	3	0.1005	0.7084	0.7155	0.2809	3.5597		0.7012	11.1147
	4	0.0645	0.8926	0.8849	0.1441	6.9374		0.8903	16.8466
	5	0.0222	0.9895	0.9897	0.0449	22.2916		0.9893	26.9650

表 VIII. ベッセル・デザイン

ORDER	SECTION	REAL PART	IMAGINARY PART	F_0	α	Q	-3 dB FREQUENCY	PEAKING FREQUENCY	PEAKING LEVEL
2	1	1.1050	0.8368	1.2754	1.7328	0.5771	1.0020		
3	1	1.0509	1.0025	1.4524	1.4471	0.6910	1.4185		
	2	1.3270		1.3270			1.3270		
4	1	1.3596	0.4071	1.4192	1.9160	0.5219	0.9705		
	2	0.9877	1.2476	1.5912	1.2414	0.8055		0.7622	0.2349
5	1	1.3851	0.7201	1.5611	1.7745	0.5635	1.1876		
	2	0.9606	1.4756	1.7607	1.0911	0.9165		1.1201	0.7768
	3	1.5089		1.5089			1.5089		
6	1	1.5735	0.3213	1.6060	1.9596	0.5103	1.0638		
	2	1.3836	0.9727	1.6913	1.6361	0.6112	1.4323		
	3	0.9318	1.6640	1.9071	0.9772	1.0234		1.3766	1.3851
7	1	1.6130	0.5896	1.7174	1.8784	0.5324	1.2074		
	2	1.3797	1.1923	1.8235	1.5132	0.6608	1.6964		
	3	0.9104	1.8375	2.0507	0.8879	1.1262		1.5961	1.9860
	4	1.6853		1.6853			1.6853		
8	1	1.7627	0.2737	1.7838	1.9763	0.5060	1.1675		
	2	0.8955	2.0044	2.1953	0.8158	1.2258		1.7932	2.5585
	3	1.3780	1.3926	1.9591	1.4067	0.7109		0.2011	0.0005
	4	1.6419	0.8256	1.8378	1.7868	0.5597	1.3849		
9	1	1.8081	0.5126	1.8794	1.9242	0.5197	1.2774		
	2	1.6532	1.0319	1.9488	1.6966	0.5894	1.5747		
	3	1.3683	1.5885	2.0815	1.3148	0.7606		0.7668	0.0807
	4	0.8788	2.1509	2.3235	0.7564	1.3220		1.9632	3.0949
	5	1.8575		1.8575			1.8575		
10	1	1.9335	0.2451	1.9490	1.9841	0.5040	1.2685		
	2	1.8467	0.7335	1.9870	1.8587	0.5380	1.4177		
	3	1.6661	1.2246	2.0678	1.6115	0.6205	1.7848		
	4	1.3648	1.7395	2.2110	1.2346	0.8100		1.0785	0.2531
	5	0.8686	2.2994	2.4580	0.7067	1.4150		2.1291	3.5944

表 IX. 0.05° の等リップル誤差デザイン

ORDER	SECTION	REAL PART	IMAGINARY PART	F_0	α	Q	-3 dB FREQUENCY	PEAKING FREQUENCY	PEAKING LEVEL
2	1	1.0087	0.6680	1.2098	1.6675	0.5997	0.9999		
3	1	0.8541	1.0725	1.3710	1.2459	0.8026		0.6487	0.2232
	2	1.0459		1.0459			1.0459		
4	1	0.9648	0.4748	1.0753	1.7945	0.5573	0.8056		
	2	0.7448	1.4008	1.5865	0.9389	1.0650		1.1884	1.6286
5	1	0.8915	0.8733	1.2480	1.4267	0.6999	1.2351		
	2	0.6731	1.7085	1.8363	0.7331	1.3641		1.5703	3.3234
	3	0.9430		0.9430			0.9430		
6	1	0.8904	0.4111	0.9807	1.8158	0.5507	0.7229		
	2	0.8233	1.2179	1.4701	1.1201	0.8928		0.8975	0.6495
	3	0.6152	1.9810	2.0743	0.5932	1.6859		1.8831	4.9365
7	1	0.8425	0.7791	1.1475	1.4684	0.6810	1.1036		
	2	0.7708	1.5351	1.7177	0.6975	1.1143		1.3276	1.9162
	3	0.5727	2.2456	2.3175	0.4942	2.0233		2.1713	6.3948
	4	0.8615		0.8615			0.8615		
8	1	0.8195	0.3711	0.8996	1.8219	0.5489	0.6800		
	2	0.7930	1.1054	1.3604	1.1658	0.8578		0.7701	0.4705
	3	0.7213	1.8134	1.9516	0.7392	1.3528		1.6638	3.2627
	4	0.5341	2.4761	2.5330	0.4217	2.3713		2.4178	7.6973
9	1	0.7853	0.7125	1.0604	1.4812	0.6751	1.0102		
	2	0.7555	1.4127	1.6020	0.9432	1.0602		1.1937	1.6005
	3	0.6849	2.0854	2.1950	0.6241	1.6024		1.9697	4.5404
	4	0.5060	2.7133	2.7601	0.3667	2.7274		2.6657	8.9633
	5	0.7983		0.7983			0.7983		
10	1	0.7592	0.3413	0.8324	1.8241	0.5482	0.6096		
	2	0.7467	1.0195	1.2637	1.1818	0.8462		0.6941	0.4145
	3	0.7159	1.6836	1.8295	0.7826	1.2778		1.5238	2.9507
	4	0.6475	2.3198	2.4085	0.5377	1.8598		2.2276	5.7152
	5	0.4777	2.9128	2.9517	0.3237	3.0895		2.8734	9.9130

表 X. 0.5°の等リップル誤差デザイン

ORDER	SECTION	REAL PART	IMAGINARY PART	F ₀	α	Q	-3 dB FREQUENCY	PEAKING FREQUENCY	PEAKING LEVEL
2	1	0.8590	0.6981	1.1059	1.5521	0.6443	1.0000		
3	1	0.6969	1.1318	1.3282	1.0468	0.9538		0.8918	0.9836
	2	0.8257		0.8257			0.8257		
4	1	0.7448	0.5133	0.9045	1.5468	0.8072	0.7597		
	2	0.6037	1.4983	1.6154	0.7475	1.3379		1.3713	3.1817
5	1	0.6775	0.9401	1.1588	1.1693	0.8552		0.6518	0.4579
	2	0.5412	1.8256	1.9041	0.5884	1.7582		1.7435	5.2720
	3	0.7056		0.7056			0.7056		
6	1	0.6519	0.4374	0.7850	1.6608	0.8021	0.6522		
	2	0.6167	1.2983	1.4355	0.8592	1.1639		1.1402	2.2042
	3	0.4893	2.0982	2.1545	0.4542	2.2016		2.0404	7.0848
7	1	0.6190	0.8338	1.0385	1.1922	0.8388		0.5586	0.3788
	2	0.5816	1.6455	1.7453	0.6665	1.5004		1.5393	4.0353
	3	0.4598	2.3984	2.4431	0.3764	2.6567		2.3549	8.6433
	4	0.6283		0.6283			0.6283		
8	1	0.5791	0.3857	0.6958	1.6646	0.8007	0.5784		
	2	0.5865	1.1505	1.2624	0.8835	1.1319		1.0914	2.0187
	3	0.5303	1.8914	1.9643	0.5399	1.8521		1.8165	5.6819
	4	0.4148	2.5780	2.6112	0.3177	3.1475		2.5444	10.0703
9	1	0.5688	0.7525	0.9489	1.1989	0.8341		0.5033	0.3581
	2	0.5545	1.5089	1.6078	0.6899	1.4486		1.4033	3.7748
	3	0.5179	2.2329	2.2922	0.4519	2.2130		2.1720	7.1270
	4	0.4080	2.9028	2.9313	0.2784	3.5923		2.8740	11.1925
	5	0.5728		0.5728			0.5728		
10	1	0.5249	0.3487	0.6302	1.6659	0.8003	0.5215		
	2	0.5193	1.0428	1.1650	0.8915	1.1217		0.9044	1.9588
	3	0.5051	1.7264	1.7988	0.5616	1.7806		1.6509	5.3681
	4	0.4711	2.3850	2.4311	0.3876	2.5802		2.3380	8.3984
	5	0.3708	2.9940	3.0189	0.2458	4.0681		2.8709	12.2539

表 XI.12dB ガウス・デザイン

ORDER	SECTION	REAL PART	IMAGINARY PART	F ₀	α	Q	-3 dB FREQUENCY	PEAKING FREQUENCY	PEAKING LEVEL
3	1	0.9677	1.2714	1.5519	1.2377	0.8080		0.7523	0.7418
	2	0.9776	0.5029	1.0984	1.7785	0.5623	0.8338		
4	1	0.7910	0.5029	0.9399	1.6986	0.5919	0.7636		
	2	0.6304	1.5407	1.6847	0.7574	1.3203		1.4058	3.0859
5	1	0.6190	0.6751	1.0317	1.1989	0.8331		0.5160	0.3540
	2	0.3559	1.5888	1.6087	0.4425	2.2600		1.5279	7.3001
	3	0.6650		0.6650			0.6650		
6	1	0.5433	0.3431	0.6428	1.6910	0.5914	0.5215		
	2	0.4677	0.9001	1.1079	0.8477	1.1804		0.8831	2.2097
	3	0.2204	1.5067	1.5227	0.2095	3.4545		1.4905	10.0596
7	1	0.4580	0.5937	0.7191	1.2223	0.8187		0.3770	0.2874
	2	0.3849	1.1206	1.1061	0.6153	1.6253		1.0800	4.8503
	3	0.1522	1.4038	1.5015	0.2027	4.0528		1.4880	13.9067
	4	0.4828		0.4828			0.4828		
8	1	0.4222	0.2640	0.4979	1.8958	0.5897	0.4026		
	2	0.3833	0.7716	0.6616	0.6098	1.1239		0.6697	1.9727
	3	0.2678	1.2066	1.2380	0.4333	2.3076		1.1765	7.4721
	4	0.1122	1.4798	1.4840	0.1612	6.6134		1.4755	16.4334
9	1	0.3700	0.4704	0.5985	1.2385	0.8088		0.2905	0.2480
	2	0.3290	0.9068	0.9626	0.6711	1.4901		0.8473	3.0831
	3	0.2009	1.2631	1.2013	0.3586	2.7011		1.2121	9.0271
	4	0.0880	1.4740	1.4785	0.1165	8.5804		1.4715	18.6849
	5	0.3842		0.3842			0.3842		
10	1	0.3384	0.2101	0.3983	1.6981	0.5885	0.3212		
	2	0.3161	0.6180	0.6913	0.8114	1.0977		0.5309	1.8161
	3	0.2677	0.9052	1.0209	0.5244	1.9088		0.9401	5.9157
	4	0.1849	1.2745	1.2878	0.2871	3.4825		1.2610	10.6284
	5	0.0671	1.4389	1.4405	0.0931	10.7401		1.4373	20.6296

表 XII.6dB ガウス・デザイン

ORDER	SECTION	REAL		IMAGINARY		F ₀		Q	-3 dB PEAKING PEAKING		
		PART	PART	PART	PART	F ₀	α		FREQUENCY	FREQUENCY	LEVEL
3	1	0.9360	1.2168	1.5352	1.2194	0.8201	0.9360	0.7775	0.2956		
	2	0.9360		0.9360							
4	1	0.9278	1.6985	1.9363	0.9583	1.0435	0.8582	1.4239	1.5025		
	2	0.9192	0.5560	1.0743	1.7113						0.5844
5	1	0.9075	0.9973	1.2832	1.2585	0.7946	0.5065	0.5853	0.1921		
	2	0.7153	0.2053	0.7442	1.9224						0.5202
	3	0.8131		0.8131							
6	1	0.7019	0.4322	0.8243	1.7030	0.5872	0.6627	1.1080	1.7809		
	2	0.9667	1.2931	1.4549	0.9165						1.0911
	3	0.4479	2.1363	2.1827	0.4104						2.4366
7	1	0.6155	0.7703	0.9880	1.2485	0.8010	0.6291	0.4632	0.2168		
	2	0.5486	1.5154	1.1228	0.8808						1.4689
	3	0.2905	2.1488	2.1681	0.2880						3.7318
	4	0.6291		0.6291							
8	1	0.5441	0.3358	0.6394	1.7020	0.5876	0.5145	0.8512	1.7432		
	2	0.5175	0.9862	1.1228	0.9220						1.0846
	3	0.4328	1.6100	1.6672	0.5192						1.9260
	4	0.1978	2.0703	2.0797	0.1902						5.2571
9	1	0.4961	0.6192	0.7934	1.2505	0.7997	0.5065	0.3705	0.2116		
	2	0.4568	1.2145	1.2976	0.7041						1.4203
	3	0.3592	1.7429	1.7795	0.4037						2.4771
	4	0.1489	2.1003	2.1056	0.1414						7.0704
	5	0.5065		0.5065							
10	1	0.4535	0.2784	0.5327	1.7028	0.5873	0.4283	0.7055	1.6904		
	2	0.4352	0.8289	0.9362	0.9297						1.0756
	3	0.3886	1.3448	1.3998	0.5552						1.8011
	4	0.2908	1.7837	1.8072	0.3218						3.1074
	5	0.1136	2.0539	2.0630	0.1101						9.0802

各応答の比較

ここでは、ベッセル、バターワース、チェビシェフ(この場合 0.5 dB リップル)の全極型フィルタの応答を比較します。8 極フィルタを比較のベースとして使います。各応答は、カットオフ 1 Hz で正規化してあります。図 12 と図 13 を比較すると、種々の応答のトレードオフを容易に理解できます。ベッセルからバターワースを経てチェビシェフへ移行する場合、過渡動作が漸次低下すると、振幅分別が向上することが判ります。

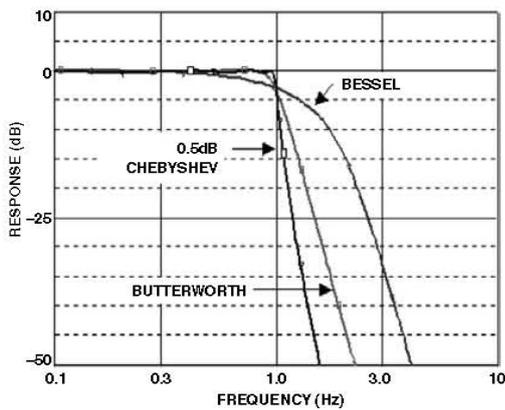


図 12. 振幅応答の比較

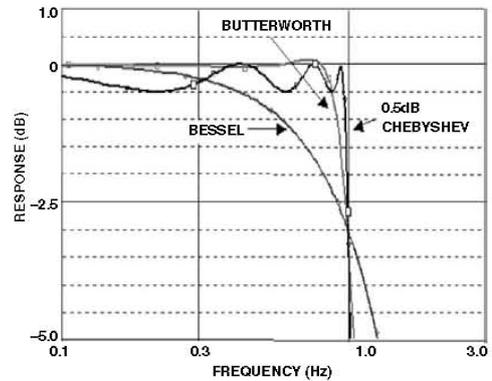


図 13. 振幅応答の比較(詳細)

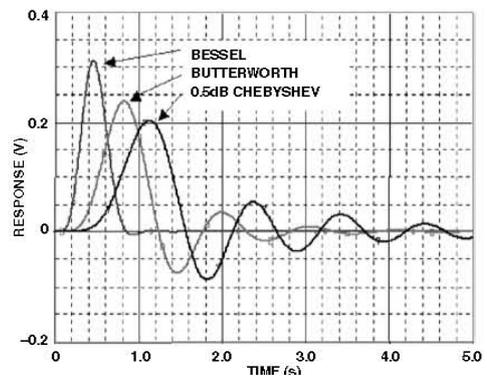


図 14. インパルス応答の比較

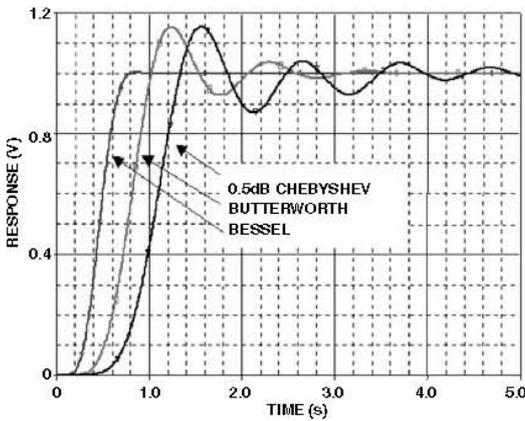


図 15.ステップ応答の比較

フィルタ回路

何を構築するかを決めた後は、構築方法を決める必要があります。これは、使用するフィルタ回路を決める必要があることを意味します。フィルタ・デザインは 2 ステップのプロセスです。すなわち、構築するもの(フィルタ伝達関数)を決めた後に、構築方法(使用する回路)を決めることです。一般に、フィルタは実数極は 1 極セクションで、極の対は 2 極セクションで、それぞれ構築します。フィルタを 3 極以上の次数のセクションから構築することができますが、セクション内にある複数の部品間の相互作用が大きくなるため、部品感度も大きくなります。バッファを使って種々のセクションをアイソレーションすることが望まれます。さらに、すべてのフィルタ・セクションは低インピーダンス・ソースから駆動されるものと仮定します。すべてのソース・インピーダンスは、フィルタ入力と直列であるとしてモデル化します。

すべてのデザイン式の値には、次の表記法を使います。

H = 通過帯域または共振点での回路ゲイン

F_c = カットオフ周波数または共振周波数(Hz)

ω_0 = カットオフ周波数または共振周波数(ラジアン/sec)

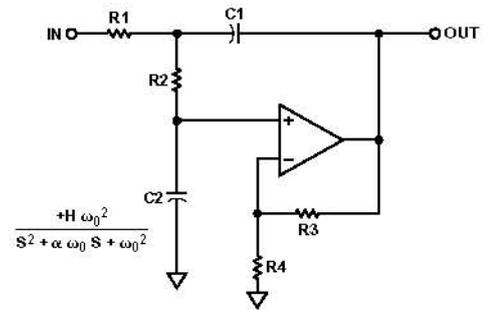
Q = 回路の“クオリティ・ファクタ”、回路のピーキングを表します。

$\alpha = 1/Q$ = 制動比

残念なことに、シンボル α は制動比に使われています。極位置($\alpha \pm j\beta$)に使われている α とは異なります。Q についても同じ問題が生じます。これは、回路のクオリティ・ファクタや部品のクオリティ・ファクタに使われ、これは同じ意味ではありません。回路の Q は、回路内でのピーキングの大きさを表します。これは、s 平面の原点に対する極角度の関数です。部品の Q は、無損失リアクタンスでの損失を基準とした損失数です。これらの損失は部品の損失ファクタの寄生であり、コンデンサと直列抵抗のリーク抵抗や ESR (等価直列抵抗)などと、インダクタの寄生容量です。

セイレン・キー・フィルタ

セイレン・キー構成は電圧制御電圧源(VCVS)とも呼ばれ、MIT Lincoln Labs の R.P. Sallen と E.L. Key により 1955 年に最初に発表されました。これは最も広範に使用されているフィルタ回路の 1 つです。この広範に使用されている理由の 1 つは、オペアンプ性能に対するフィルタ性能の依存性が最小となることです。これは、積分器として構成する代わりに、オペアンプをアンプとして構成するとゲイン帯域幅要求が小さくなることに起因しています。このことから、オペアンプのゲイン帯域幅積によりフィルタ性能が制限されない(積分器として構成された場合には制限されます)ため、他の回路を使った場合より高い周波数のフィルタをデザインできることが分かります。フィルタを通過する信号の位相は保持されます(非反転構成)。この構成のもう 1 つの利点は、最大抵抗値と最小抵抗値の比、および最大コンデンサ値と最小コンデンサ値の比(部品の広がり)が小さいため、製造に便利なことです。周波数項と Q 項は、ある程度互いに独立ですが、ゲイン・パラメータには非常に敏感です。セイレン・キーは、エレメント値(特に高い Q のセクション)の Q に対して非常に敏感です。セイレン・キー・ローパス・フィルタのデザイン式を図 16 に示します。



$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{H \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + s \left[\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \frac{1}{C_2} + \frac{(1-H)}{R_2 C_2} \right] + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

CHOOSE: C_1 R_3

THEN: $k = 2\pi F_0 C_1$ $R_4 = \frac{R_3}{(H-1)}$

$$m = \frac{\alpha^2}{4} + (H-1)$$

$$C_2 = m C_1$$

$$R_1 = \frac{2}{\alpha k}$$

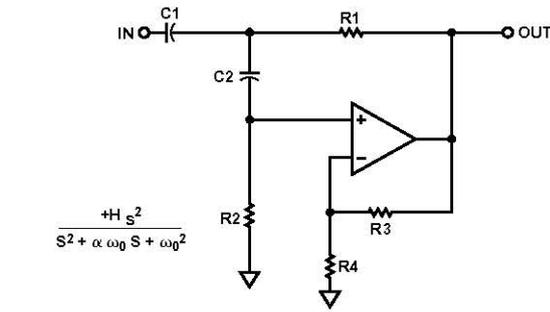
$$R_2 = \frac{\alpha}{2mk}$$

図 16.セイレン・キー・ローパスのデザイン式

2次セレン・キー・ローパス・フィルタには特別なケースがあります。ゲイン=2にすると、コンデンサ値と抵抗値が同じになります。

セレン・キー・フィルタは広く採用されていますが、深刻な欠点は、フィルタの調整が困難なことです。これは、 F_0 と Q の部品値の相互作用のためです。

セレン・キー・ハイパス・フィルタのデザイン式を図17に示します。



$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{H s^2}{S^2 + S \left[\frac{C_2}{R_2} + \frac{C_1}{R_2} + (1-H) \frac{C_2}{R_1} \right] + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

CHOOSE: C1
 THEN: $k = 2 \pi F_0 C_1$

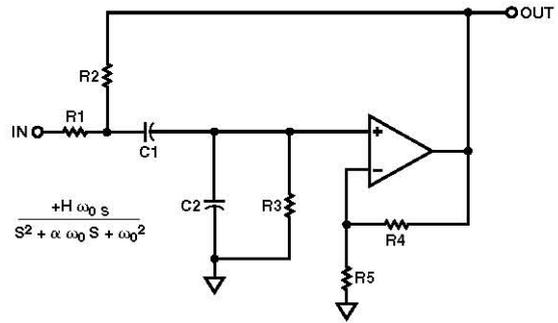
CHOOSE: R3
 THEN: $R_4 = \frac{R_3}{(H-1)}$

$C_2 = C_1$

$$R_1 = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (H-1)}}{4k}$$

$$R_2 = \frac{4}{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (H-1)}} \times \frac{1}{k}$$

図17.セレン・キー・ハイパスのデザイン式



$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{H s \frac{1}{R_1 C_2}}{S^2 + S \left[\frac{C_1}{R_3} + \frac{(C_1 + C_2)}{R_1} + \frac{C_2}{R_2} + \frac{C_1}{R_2} (1-H) \right] + \frac{1}{R_3 C_1 C_2} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)}$$

CHOOSE: C1
 THEN: $k = 2 \pi F_0 C_1$

CHOOSE: R4
 THEN: $R_5 = \frac{R_4}{(H-1)}$

$$C_2 = \frac{1}{2} C_1$$

$$R_1 = \frac{2}{k}$$

$$R_2 = \frac{2}{3k}$$

$$R_3 = \frac{4}{k}$$

$$H = \frac{1}{3} \left(6.5 - \frac{1}{Q} \right)$$

図18.セレン・キー・バンドパスのデザイン式

セレン・キー・フィルタのバンドパスの場合、制限があります。 Q の値によりフィルタのゲインが決定されます。すなわち、ローパスまたはハイパスの場合のように独立に設定することができません。セレン・キー・バンドパスのデザイン式を図18に示します。

多重帰還フィルタ

多重帰還フィルタではオペアンプを積分器として使います。このため、伝達関数のオペアンプ・パラメータに対する依存性は、セレン・キーの場合より大きくなります。オペアンプのオープン・ループ・ゲインに制約されるため、高い Q の高周波セクションを生成することは困難です。オペアンプのオープン・ループ・ゲインは、共振(またはカットオフ)周波数での振幅応答(フィルタの Q から生ずるピーキングを含む)より少なくとも20dB($\times 10$)高い必要があります。 Q によるピーキングから振幅 A_0 が発生します。

$$A_0 = H Q \tag{2}$$

ここで、 H は回路のゲイン。多重帰還フィルタでは、信号の位相が反転します。これは、フィルタ自体の位相シフトに 180° の位相シフトを追加することと等価です。

多重帰還での最大部品値対最小部品値の比は、セイレン・キーの場合より大きくなります。多重帰還ローパス・フィルタのデザイン式を図 19 に示します。

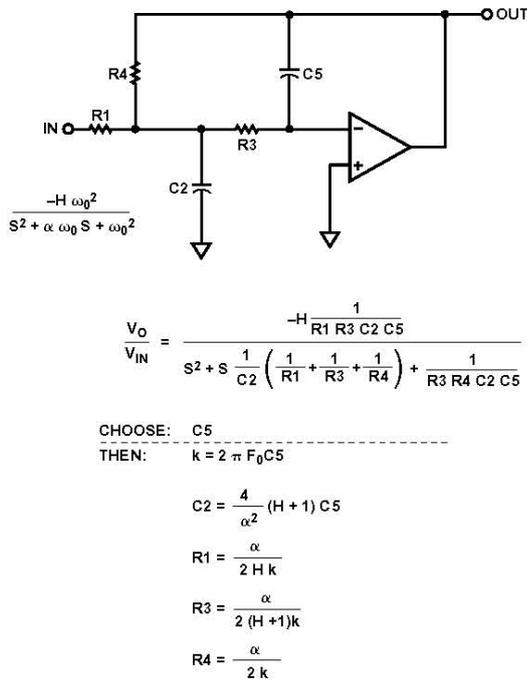


図 19. 多重帰還ローパスのデザイン式

多重帰還ハイパス・フィルタのデザイン式を図 20 に示します。

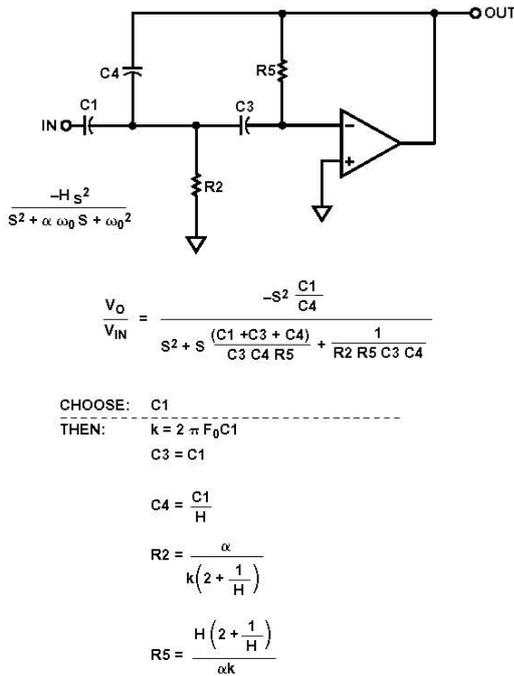


図 20. 多重帰還ハイパスのデザイン式

多重帰還バンドパスのデザイン式を図 21 に示します。この回路は、低い Q (<20) のアプリケーションで広く採用されています。R2 を変数とすることにより、共振周波数 F₀ をある程度チューニングする

ことができます。Q も調整できますが(R5 により)、これにより F₀ も変化します。F₀ のチューニングは、オシロスコープの水平チャンネルでフィルタ出力をモニタし、フィルタへの入力を垂直チャンネルに接続して、行うことができます。表示は楕円のリサージュ・パターンになります。この楕円は、共振点で位相シフトが 180° になるため直線になります。出力を最大出力にするように調節することもできますが、これも共振点で最大になります。これは正確ではありません。特に、ピークが大きくなり低い値の Q では正確ではありません。

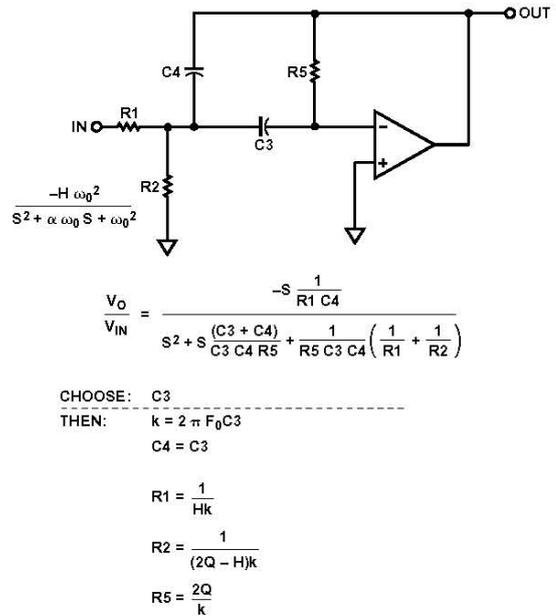


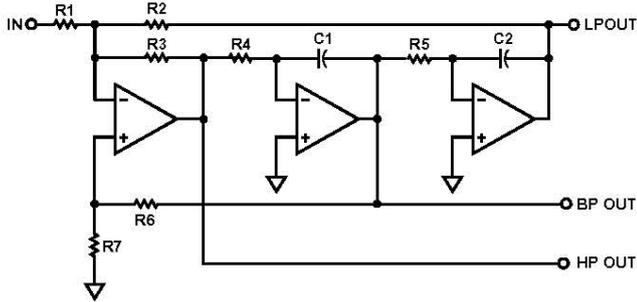
図 21. 多重帰還バンドパスのデザイン式

状態変数フィルタ

状態変数フィルタは、使用する回路エレメント数が増えますが、最も正確な構成になります。3 つの全主要パラメータ(ゲイン、Q、ω₀)を独立に調整できるため、ローパス出力、ハイパス出力、バンドパス出力を同時に得ることができます。ローパス出力とハイパス出力は位相が反転しますが、バンドパス出力は同位相であることに注意してください。各フィルタ出力のゲインも独立に変えることができます。

状態変数フィルタのすべてのパラメータを独立に調整することができるため、部品の広がり小さくすることができます。また、温度と部品偏差に起因する変動も小さくすることができます。積分器セクションで使用するオペアンプには、オペアンプ・ゲイン帯域幅について、多重帰還セクションで説明したものと同一制約があります。

状態変数フィルタのデザイン式を図 22 に示します。



$$A_{LP}(s=0) = -\frac{R2}{R1}$$

$$A_{HP}(s=\infty) = -\frac{R3}{R1}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R3}{R2 R4 R5 C1 C2}}$$

LET $R4 = R5 = R, C1 = C2 = C$

$$A_{BP}(s=\omega_0) = \frac{R6 + R7}{R7} \frac{1}{R1 \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \right)}$$

CHOOSE R1:
 $R2 = A_{LP} R1$
 $R3 = A_{HP} R1$

CHOOSE C:
 $R = \frac{2 \pi F_0}{C} \sqrt{\frac{A_{HP}}{A_{LP}}}$

CHOOSE R7:
 $R6 = R7 \sqrt{R2 R3 Q} \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \right)$

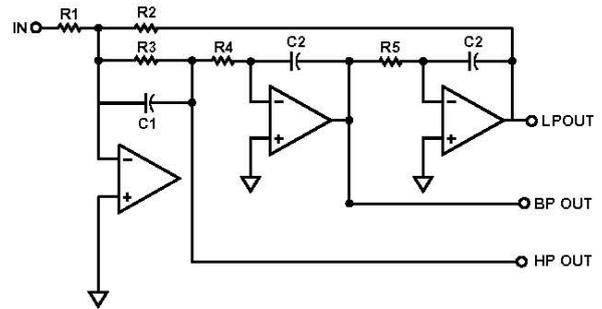
図 22.状態変数のデザイン式

状態変数フィルタの共振周波数のチューニングは、R4 と R5 を変えることにより行います。両方を調節する必要はありませんが、広い範囲で変える場合には一般に望ましいことです。R1 を一定に維持して、R2 を調整するとローパス・ゲインが、R3 を調整するとハイパス・ゲインが、それぞれ設定されます。バンドパス・ゲインと Q は、R6 と R7 の比で設定されます。

状態変数フィルタのパラメータは独立に調節可能であるため、周波数、Q、 ω_0 の電子的制御を容易に追加することができます。この調整は、乗算 DAC (MDAC) またはデジタル・ポテンショメータを使って行います。積分器セクションの場合、MDAC を接続すると、抵抗を駆動する電圧が分割されることにより、時定数が大きくなり、これから積分器コンデンサの充電電流が供給されます。この結果、抵抗が大きくなるので、時定数も大きくなります。Q とゲインは、種々の帰還パスの比を変えることにより、変えることができます。デジタル・ポテンショメータで抵抗値を直接変更することにより、さらに直接的な方法で同じことを行うことができます。このようにして得られた調節可能なフィルタは、計測回路と制御回路で多くの機能を提供します。

双 2 次(BIQUAD)フィルタ

状態変数フィルタの最も近い親類は、双 2 次フィルタです。この回路の名前は、1968 年に J. Tow により最初に使用され、その後 1971 年に L.C. Thomas により使用され、伝達関数の分子と分母が 2 次であることに由来しています。このため、伝達関数は双 2 次関数になります。この回路は、状態変数回路を少し変更したものです。大きな違いの 1 つは、ハイパス出力がないことです。バンドパス出力の位相は反転しています。ローパスには、同相と逆相の 2 つの出力があります。4 つ目のアンプ・セクションの追加により、ハイパス・フィルタを実現することができます。双 2 次フィルタのデザイン式を図 23 に示します。



CHOOSE C, R2, R5
 $K = 2 \pi f_0 C$
 $C1 = C2 = C$
 $R1 = \frac{R2}{H}$
 $R3 = \frac{1}{k \alpha}$
 $R4 = \frac{1}{k^2 R2}$

CHOOSE C, R5, R7
 $K = 2 \pi f_0 C$
 $C1 = C2 = C$
 $R1 = R2 = R3 = \frac{1}{k \alpha}$
 $R4 = \frac{1}{k^2 R2}$
 $R6 = R5$

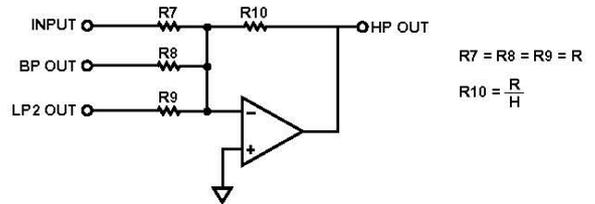


図 23.双 2 次のデザイン式

図 23 から、入力、バンドパス出力、2 つ目のローパス出力が加算されてハイパス出力が得られることが分かります。この場合、制約は $R1 = R2 = R3$ 、かつ $R7 = R8 = R9$ です。

状態変数フィルタと同様に、双 2 次フィルタも調整可能です。R3 を調整すると Q が調整され、R4 を調整すると共振周波数が設定されます。R1 を調整するとゲインが設定されます。一般に周波数が最初に調整され、この後に Q とゲインの順に調整が続きます。この方法でパラメータを設定すると、部品値間の相互作用の影響が小さくなります。

オペアンプの条件

プロトタイプ応答から得られたカーブでは理想オペアンプを使用しています。実際には、オペアンプは 1 極のローパス・フィルタです。アンプの支配的な極は、フィルタのコーナー周波数です。オペアンプの伝達関数は、フィルタ応答に加算されます。

実際には、これは、オペアンプのゲイン帯域幅積がフィルタのカットオフ周波数より少なくとも 1 桁大きくない場合、相互作用があることを意味しています。アンプのゲイン帯域幅積がフィルタより 1 桁大きい場合は、オペアンプの応答を無視することができます。いずれの場合でも、問題がある場合には、フィルタ SPICE デッキをダウンロードし、使用する特定のオペアンプの SPICE モデルを SPICE を使ってシミュレーションすることができます。

電流帰還アンプはセイレン・キー回路でのみ使用することができます。これは、オペアンプがアンプとして構成される唯一の回路であるためです。他の回路ではオペアンプとコンデンサの組み合わせを帰還回路内で使用するため、電流帰還アンプには適していません。

もう 1 つの選択肢は、バイポーラ入力または FET 入力のデバイスです。一般に、フィルタのインピーダンス・レベルが $1\text{ k}\Omega$ より小さい場合、バイポーラ・オペアンプが適しています。インピーダンスが $10\text{ k}\Omega$ より大きい場合は、FET 入力オペアンプが適しています。これは単に FET アンプの入力インピーダンスが大きいため、回路に対する負荷が小さくなるためです。

最後の注意は、高い Q セクションを持つフィルタでは、オペアンプのダイナミック・レンジを超えてしまうことがあります。これは、セクションのピーキングにより発生します。 Q によるピーキングから次の振幅 A_0 が発生します。

$$A_0 = H Q$$

ここで、 H は回路のゲイン。

また、次にも注意してください。

$$\alpha = \frac{1}{Q}$$

一例

一例として、折り返し防止フィルタをデザインします。

フィルタの仕様を次のように決めます。

1. カットオフ周波数 = 8 kHz 。
2. 阻止帯域減衰量 = 72 dB 。これは 12 ビット・システムに対応。
3. 阻止帯域周波数 = 42 kSPS 。これは 100 kSPS の A/D コンバータ使用を想定。ナイキスト周波数 = 50 kHz 。サンプル・レートを中心とする通過帯域のイメージの 8 kHz を減算すると 42 kHz になります。
4. 減衰応答と位相応答との間で最適妥協を与えるためバタワース・フィルタ応答を選択。

バタワース・カーブ(図 1)を使うと、水平ラインが 72 dB になります。垂直ラインは 5.25 Hz になります。これは F_s/F_0 の比になります(図 24 参照)。これは、フィルタ次数 5 が必要であることを示しています。この情報は、フィルタ・ツールへの入力として使います。

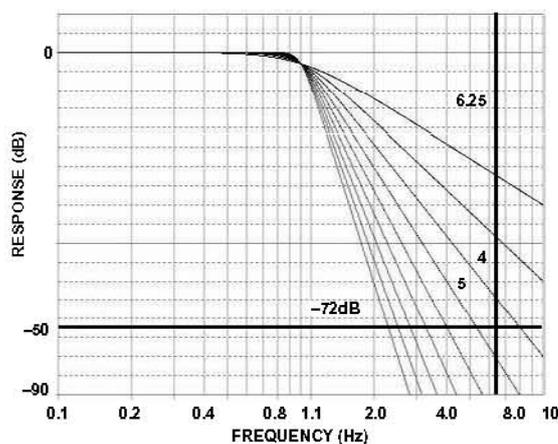


図 24. フィルタ次数の決定

ツールの使い方

まず、フィルタ次数を決めます。このために、図 24 のフィルタ応答カーブを使います。

この情報をデザイン・ツールで使います。最初に、フィルタ応答を入力します。この例では、Lowpass を選択します。その他のオプションが表示されます。

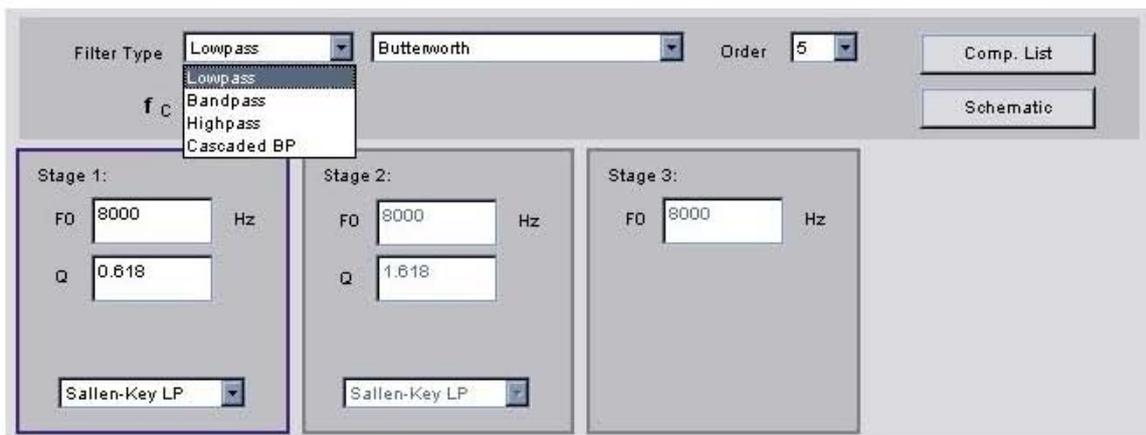


図 25. 応答タイプの入力

次に、応答形状を入力します。Butterworth を選択します。

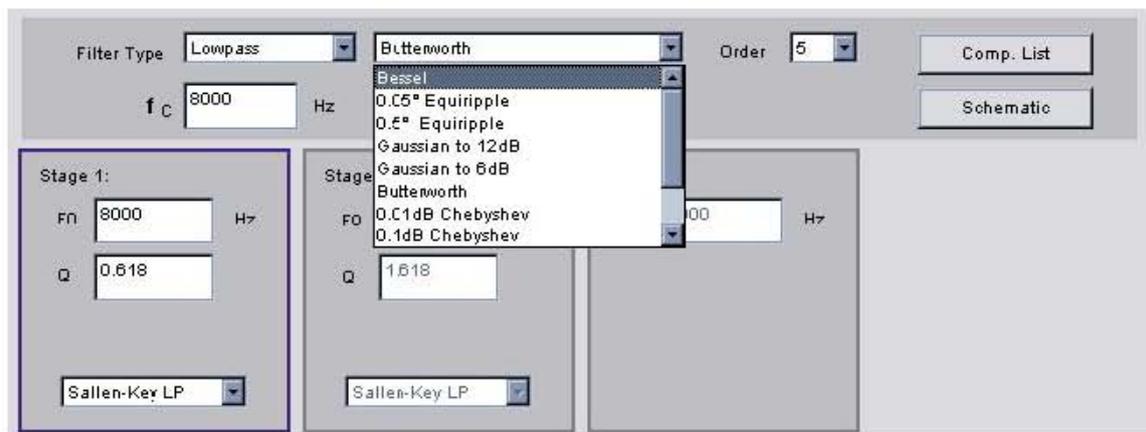


図 26. フィルタ応答

次にフィルタ次数を入力します。1~8 を選択することができます。この例では、**fifth-order** を選択します。カットオフ(または中心)周波数も入力します。

5 次フィルタは、2 個の 2 次セクションと 1 極セクションで構成されます。これは、ツール内のボックスの次の行に表示されます。各 2 次セクションに対して、フィルタ回路を入力します。アクティブ・ボックスが強調されます。

各セクションは任意の次数に設定することができます。一般に、低い Q のセクションが先に設定されます。これは、高い Q セクションのピーキングの前に減衰を与えることにより、フィルタのダイナミック・レンジを超える問題を回避するのに役立ちます。

これでフィルタ・ツールには、各 2 次セクションの該当する中心周波数と Q が、1 つの極には中心周波数が、それぞれ入力されま

した。カスタム・フィルタの場合、これらの値は手動で入力することに注意してください。次に、選択肢からフィルタ回路を選んで入力します。各セクションは別々です(図 27)。

各セクションの詳細を入力します。実際の部品値は比によって決まるため、1 つの値を指定すると、残りが決定されます。抵抗値の選択よりコンデンサ値の選択の自由度が小さいため、コンデンサの設定を選択します(図 28)。

次に、ゲインを入力します。ここでは、一般にユーザが別の部品値を入力する必要があります。ユニティ・ゲインのセイレン・キー・セクションの例の場合、帰還抵抗値を $0\ \Omega$ と指定することができます。部品入力についてはエラー検出機能があります。状態変数と双 2 次セクションには、他の抵抗値を入力します。

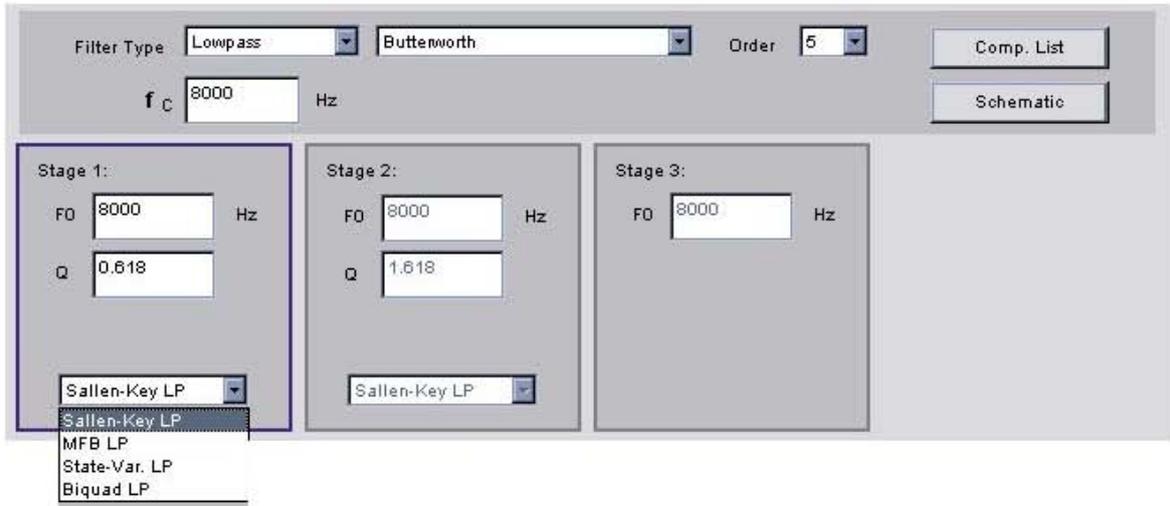


図 27.フィルタ回路

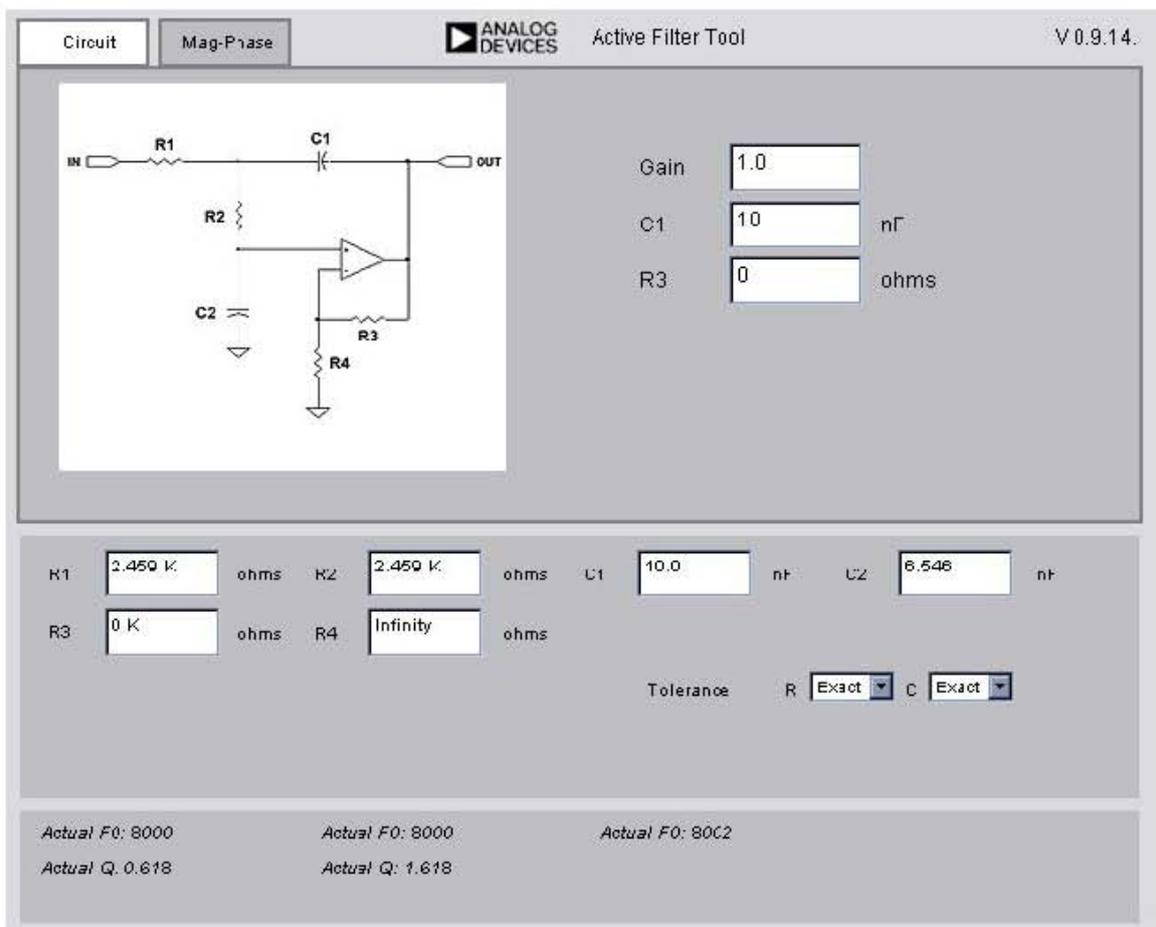


図 28.部品値(詳細)

これらの値は、計算された値です。フィルタは、一般に標準値部品を使って構築されます。このツールを使うと、ユーザは部品偏差を指定することができます。指定すると、ボックス内で標準値が置き換えられます。さらに、値の変更によって発生した F_0 と Q のパーセント誤差が計算されます。

カスタム・フィルタの場合、値は手動で入力することができます。

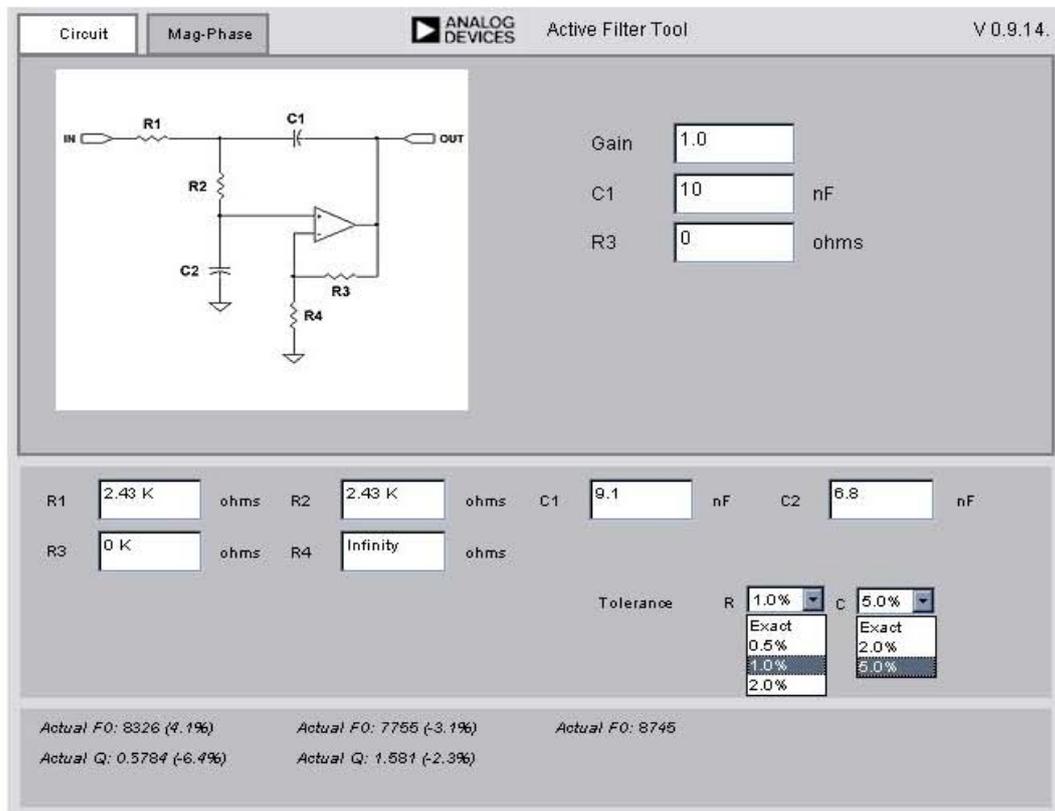


図 29. 部品値(標準)

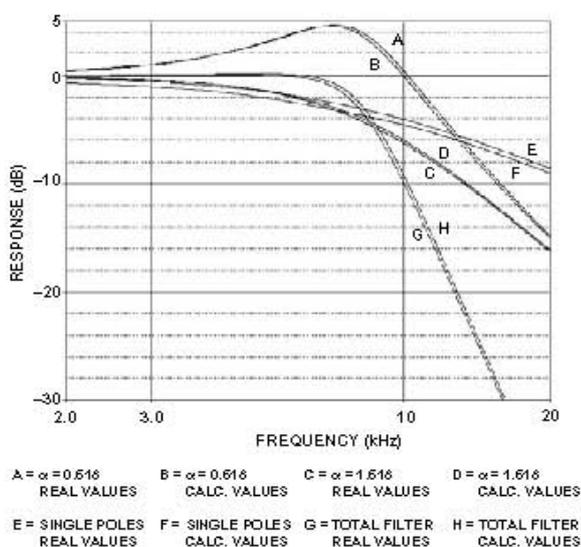


図 30. 標準値によるフィルタ応答の変化

図 30 に、標準値の使用に対して指定値の使用によるフィルタ応答の変化を示します。この許容の可否は設計者が判断する必要があります。

参考資料

- A.I. Zverev, *Handbook of Filter Synthesis*, John Wiley, 1967.
- A.B. Williams, *Electronic Filter Design Handbook*, McGraw-Hill, 1981.
- M.E. Van Valkenburg, *Analog Filter Design*, Holt, Rinehart & Winston, 1982
- H. Zumbahlen, AN-281, *Passive and Active Filtering*, Analog Devices, Inc.
- W. Slattery, AN-209, *8th Order Programmable Low Pass Analog Filter Using 12-Bit DACs*, Analog Devices, Inc.