



AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

アンプとADCとを適切に インターフェースする技法 【中編：最適なパッシブ フィルタの実現】

アナログ・デバイセズ株式会社

石井 聡



Agenda

1. ADC入力回路アーキテクチャとドライブするうえでの問題点
2. バッファ無しADCをドライブするADCドライバの考え方と必要性
3. AD変換で生じるエイリアシング
4. 最適なフィルタリングによる最適な信号再生とエイリアシングの除去
5. 数表を用いたフィルタ設計技法
6. フィルタ設計に関する話題
7. ADCで生じるキックバック
8. ADCのキックバック抑制とコンデンサ
9. ADCのドライブとインピーダンスマッチングとフィルタリング
10. まとめと参考文献

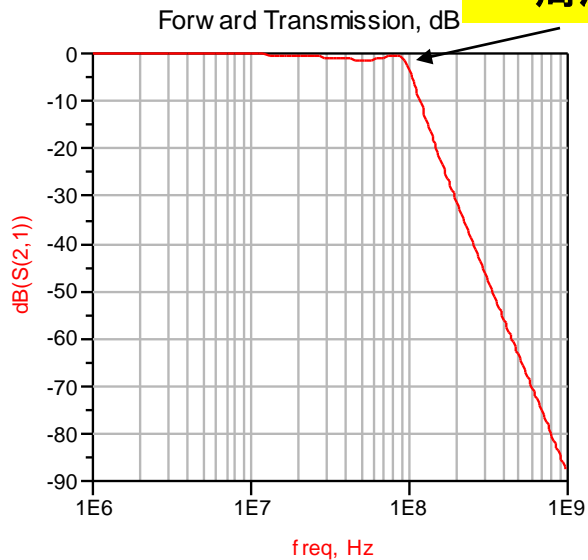
4. 最適なフィルタリングによる最適な信号再生とエイリアシングの除去

フィルタの必要性と特性

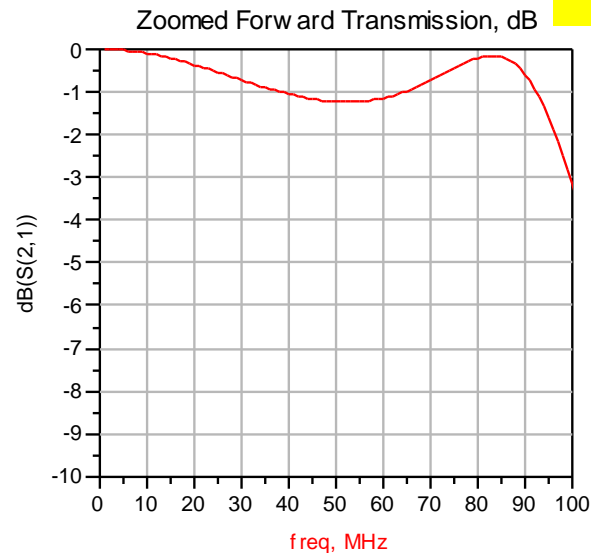
- ▶ 通常、エイリアシングを抑制するため、LPFかBPFをドライバ・アンプとADCの間に挿入する（アンチ・エイリアシング・フィルタ;AAF）
- ▶ エイリアシングが問題にならなくとも、特定周波数の干渉除去のためフィルタを挿入することが多い
- ▶ フィルタの種類
 - LPF, HPF, BPF, BEF（ノッチ）
 - バタワース、チェビシェフ（Type I & II）、楕円（Cauer）、ベッセル、ガウシヤン
- ▶ 一般的に考慮すべきフィルタの特性
 - パスバンド／ストップバンド周波数（より急峻なスカート特性）
 - A_p ; Passband Attenuation = パスバンドの減衰（インサーション・ロス）
 - A_s ; Stopband Attenuation = ストップ・バンドの減衰（除去量）
 - **パスバンド・リップル**（Typ. 0.5~1dBが望ましい）
 - 広帯域システムの場合は**群遅延変動にとくに注意**

フィルタの一般的な特性

コーナー
周波数

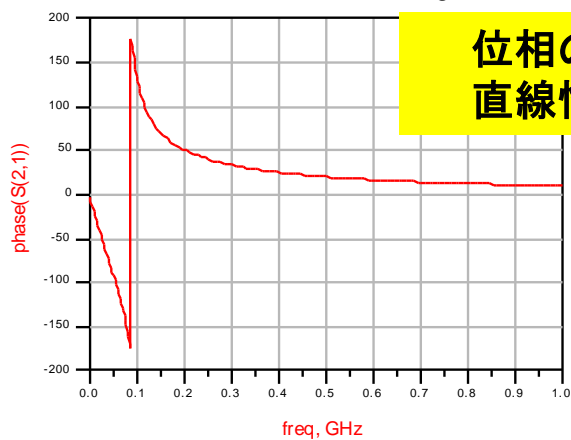


パスバンド
リップル



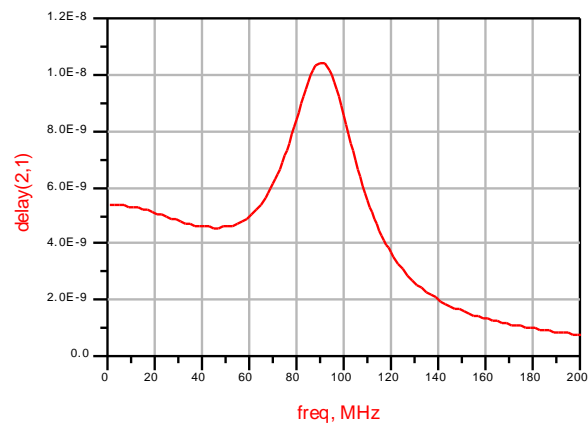
Δ dB

Forward Transmission, degrees



位相の
直線性

Group Delay, sec.

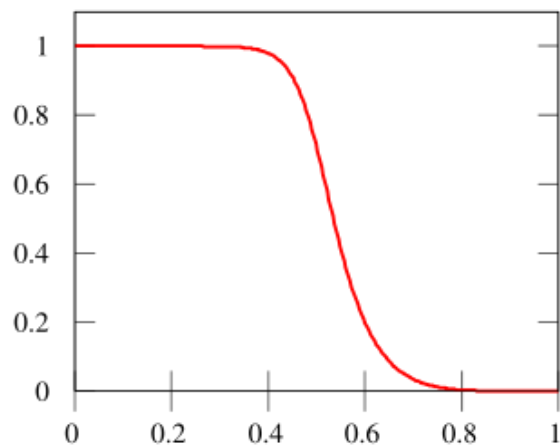


群遅延

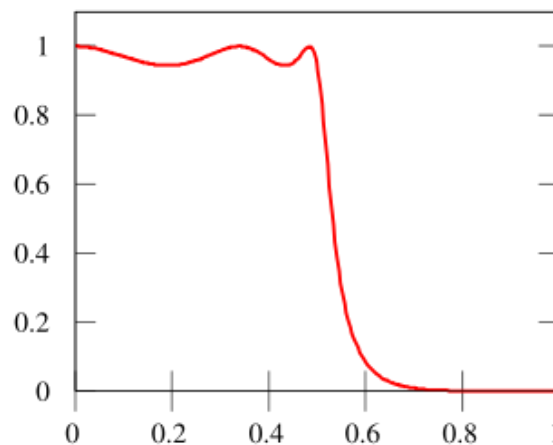
$\frac{\delta\phi}{\delta f}$ sec

色々なフィルタの種類

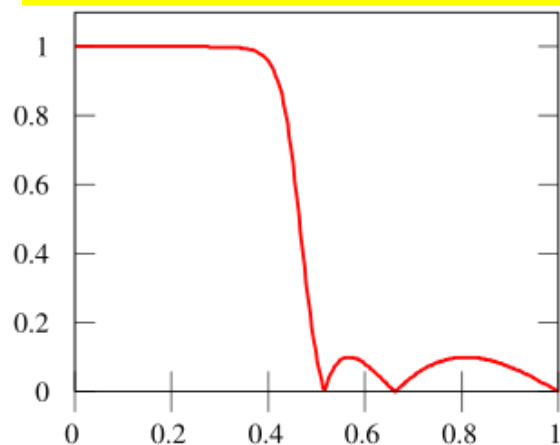
バターース



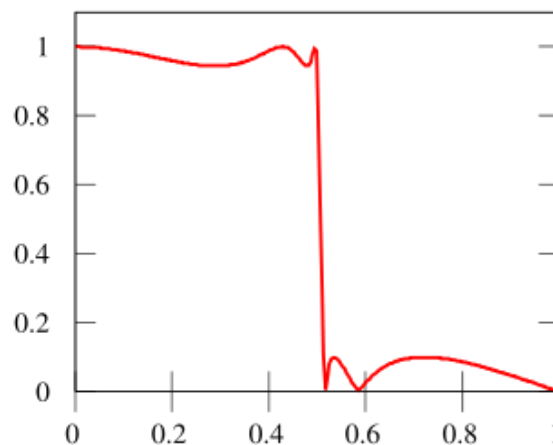
チェビシェフ Type I



チェビシェフ Type II



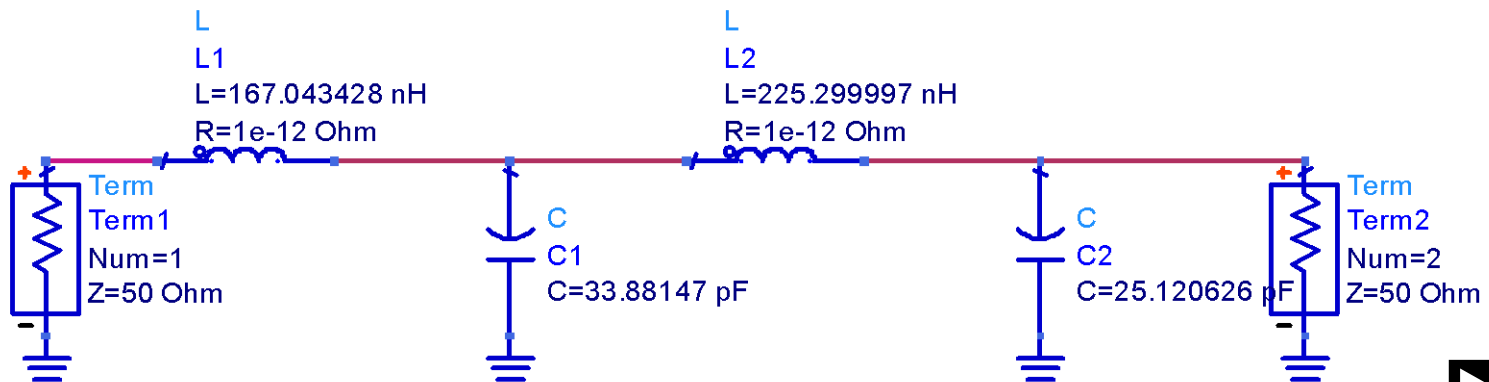
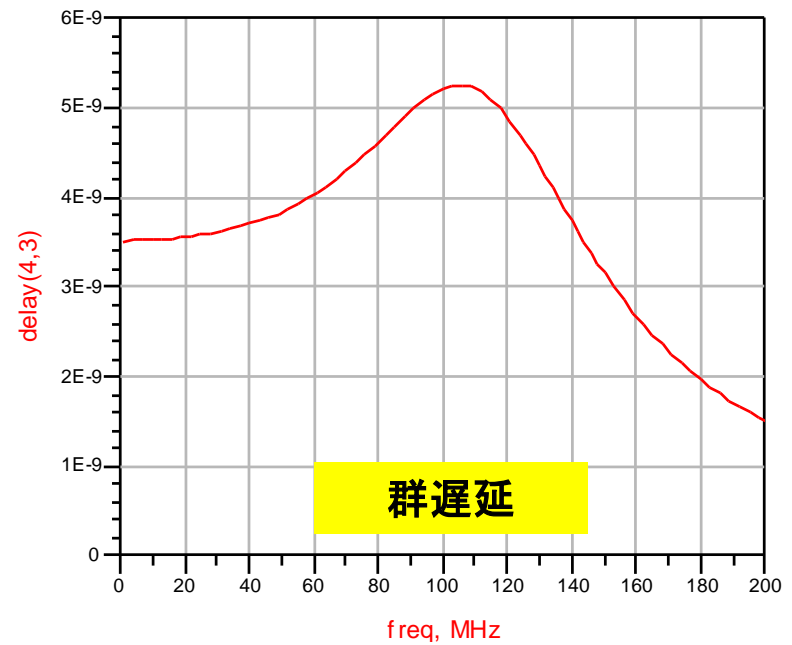
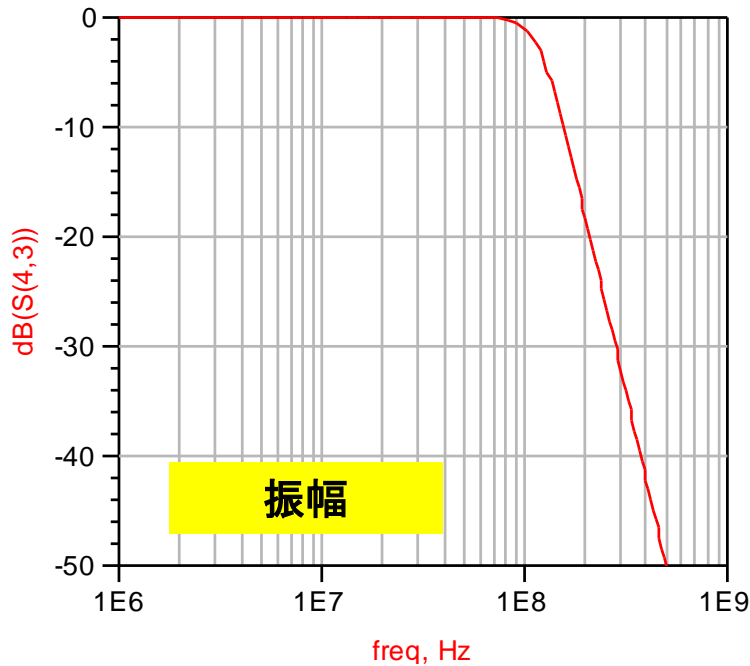
楕円



(逆チェビシェフ)

(Cauer)

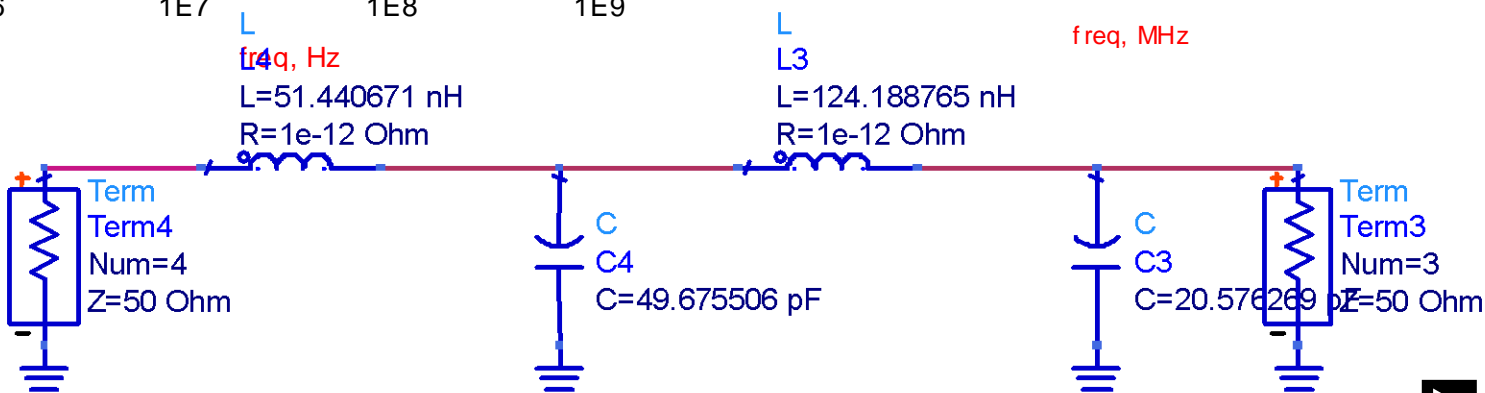
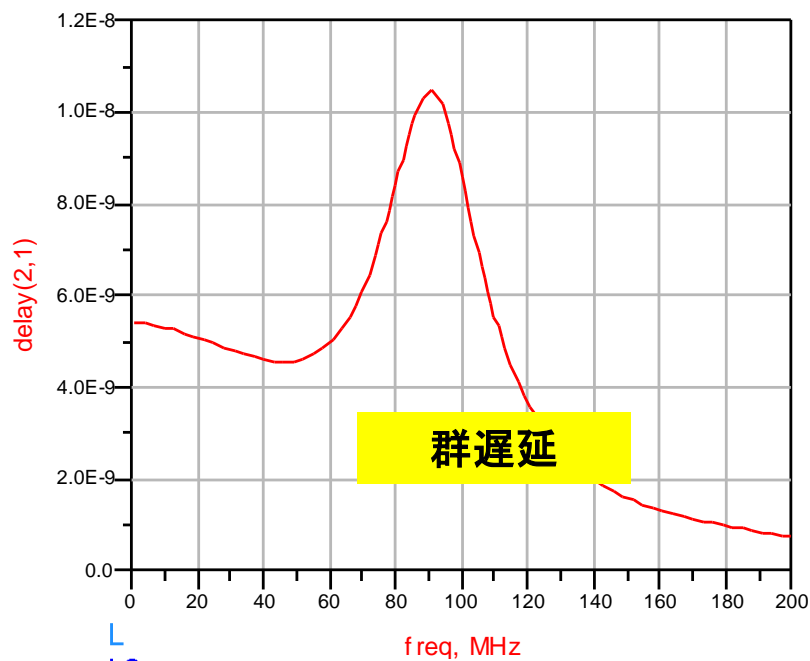
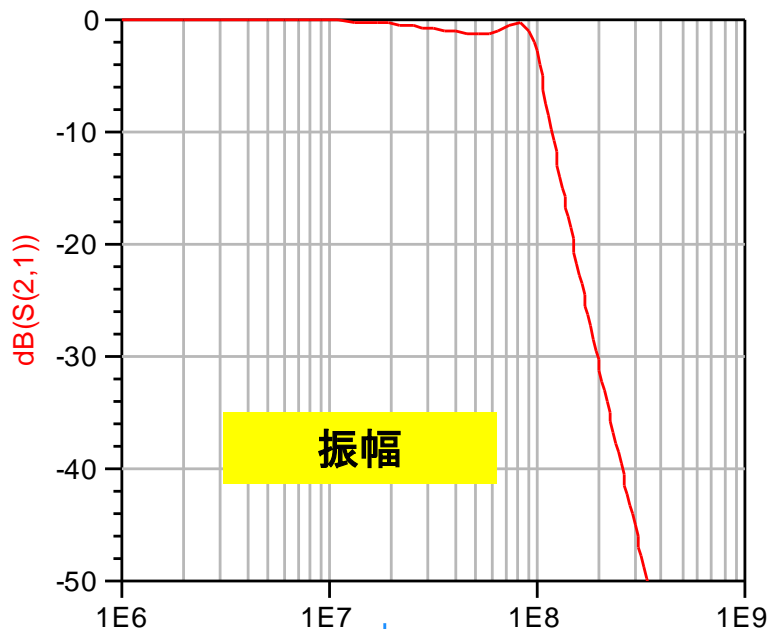
バターワース特性（別名「最大平坦性フィルタ」）



バターース特性の特徴

- ▶ パスバンドの振幅特性は一番フラット
 - ▶ 群遅延はカットオフ周辺でうねる
 - ▶ パルス応答は若干リングングが生じる
-
- ▶ 周波数特性としてフラットな特性が求められるときに使える

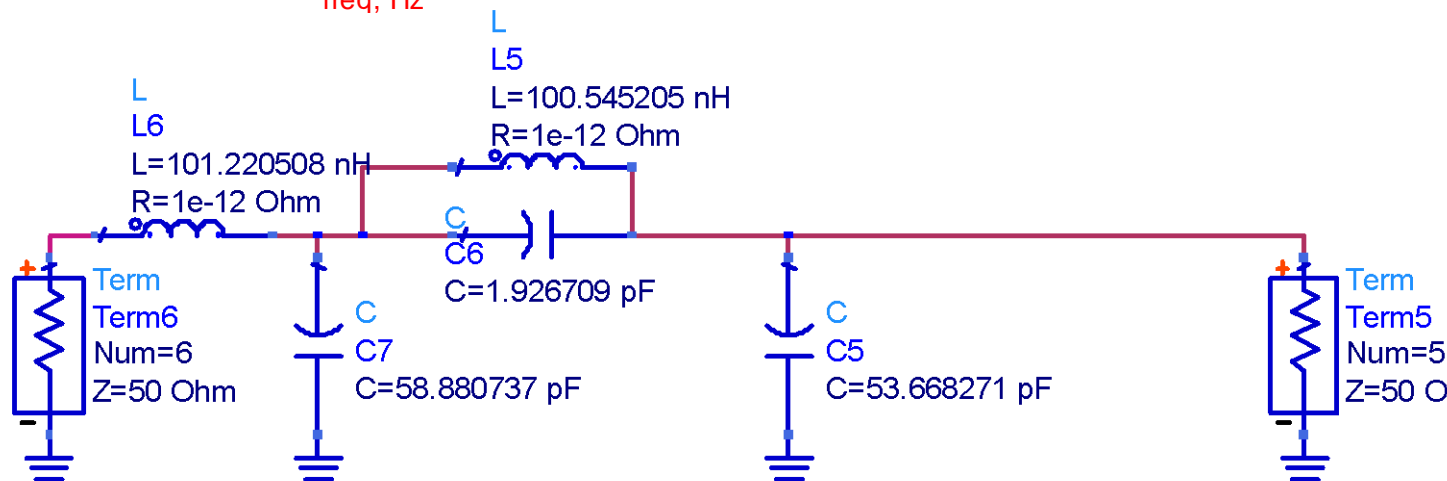
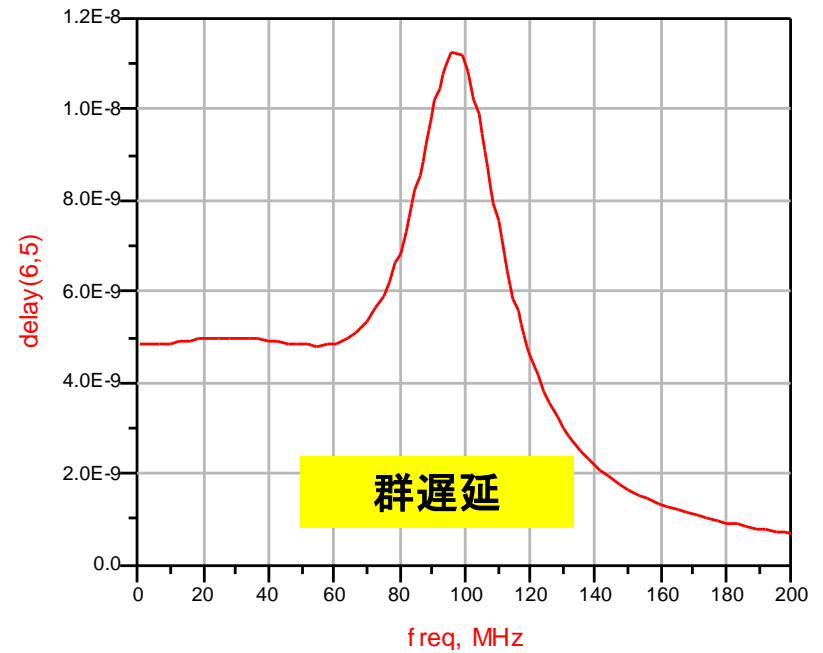
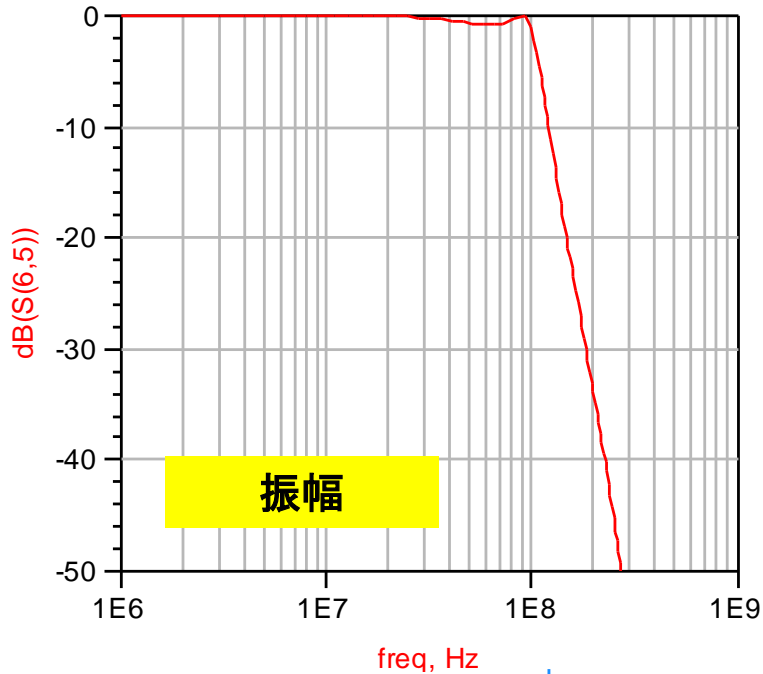
チェビシェフ特性 (Type I)



チェビシェフ特性 (Type I) の特徴

- ▶ パスバンドからストップバンドへの遷移が急しゅん
 - ▶ パスバンドの振幅特性にはリップルが生じる
 - ▶ 群遅延は大きい
 - ▶ パルス応答はリングングが生じる
-
- ▶ ストップバンドへの遷移領域に急しゅんな特性を求められるとき（不要波がパスバンドに近いなど）に使える

楕円関数特性 (Elliptic)

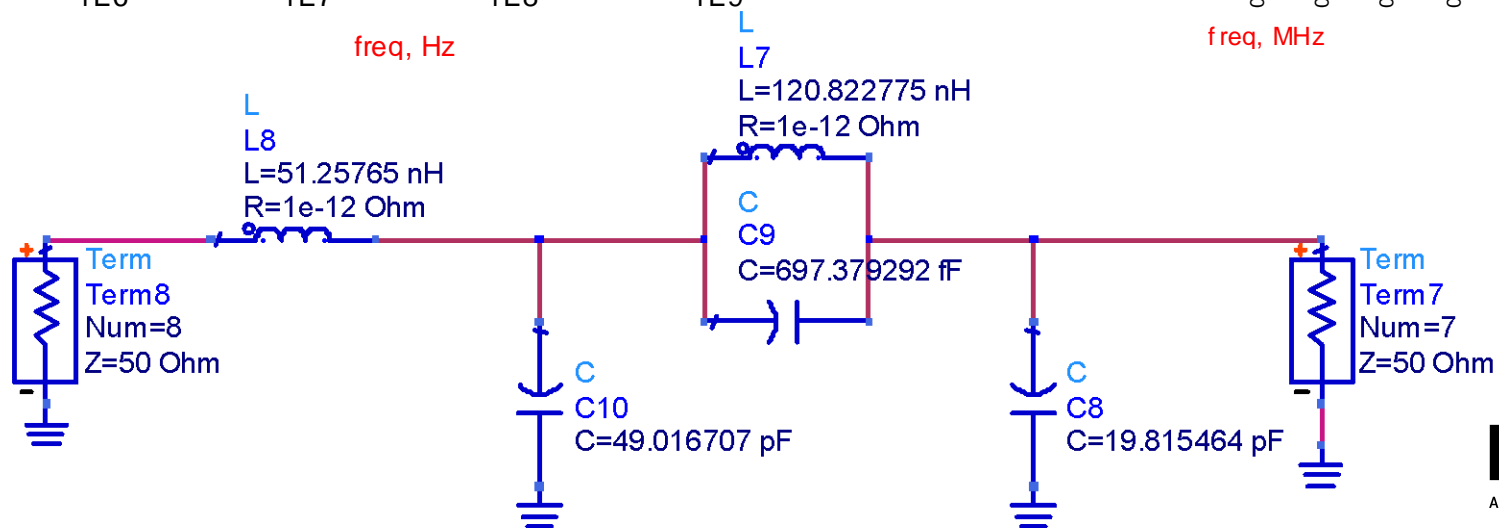
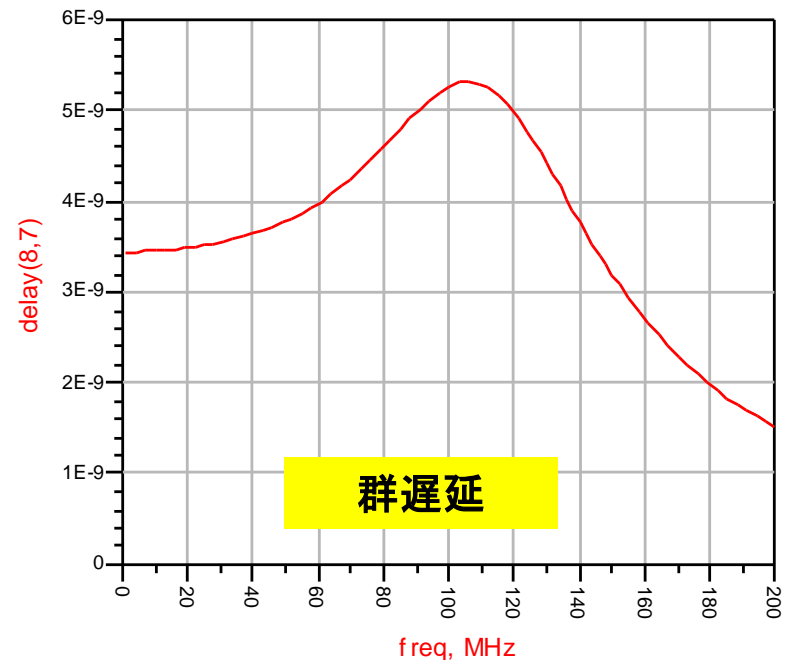
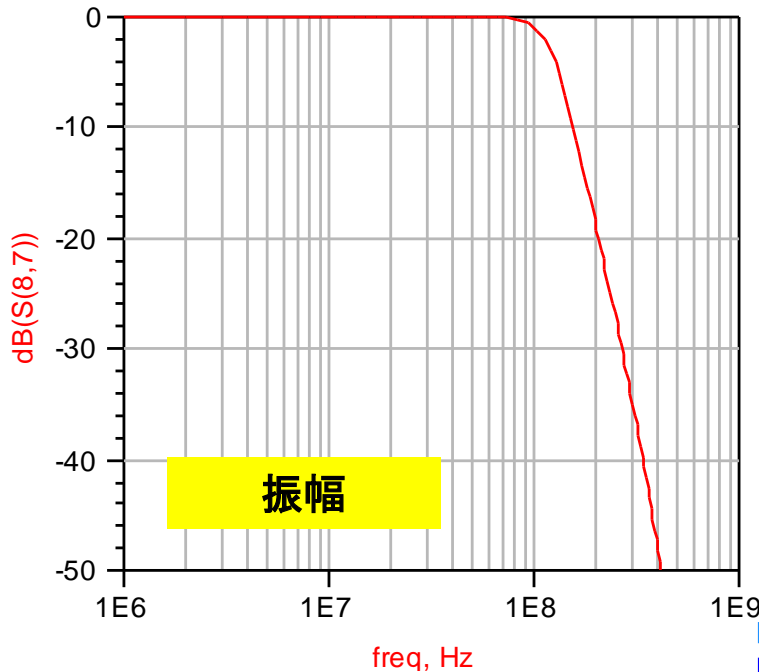


楕円関数特性 (Elliptic) の特徴

- ▶ パスバンドからストップバンドへの遷移が（同じ次数およびリップルの規定において）一番急しゅん
- ▶ パスバンドとストップバンドで同じリップル特性が実現できる
- ▶ 群遅延はカットオフ周辺でうねる
- ▶ パルス応答はリングングが生じる

- ▶ （設計の要素をいくぶん制限すれば）素子の誤差に対して寛容なフィルタにできる

逆チェビシェフ特性（別名「チェビシェフType II」）

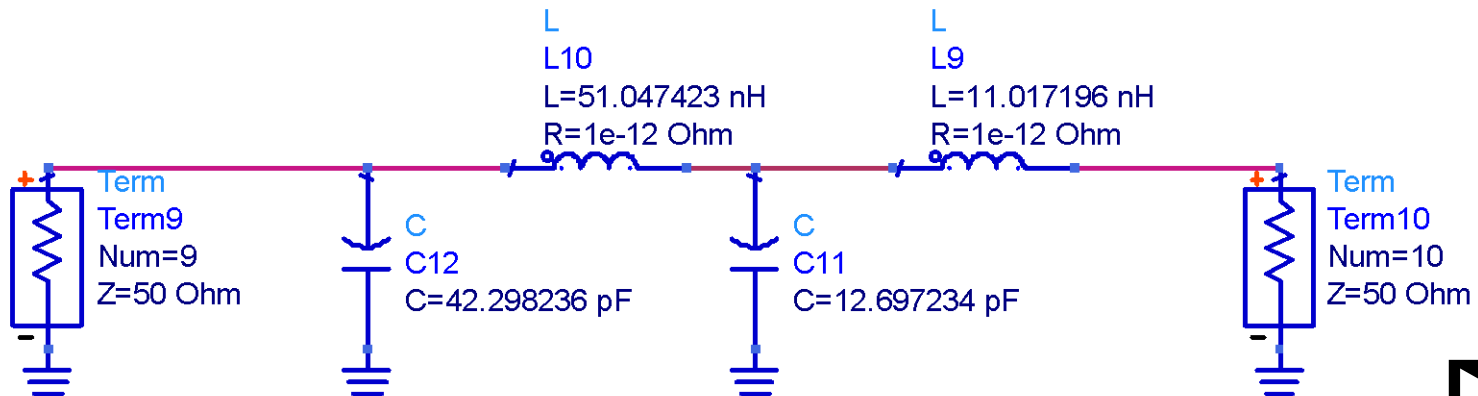
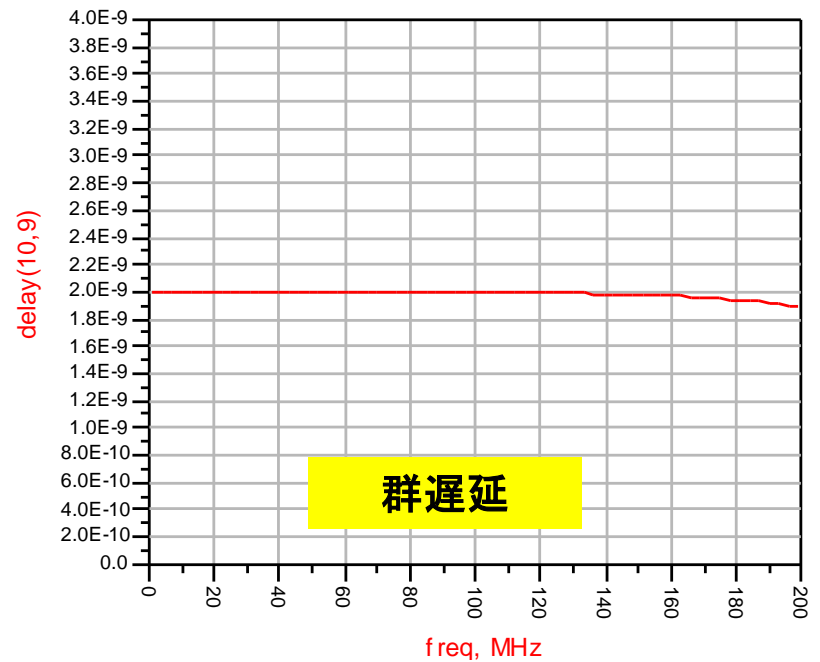
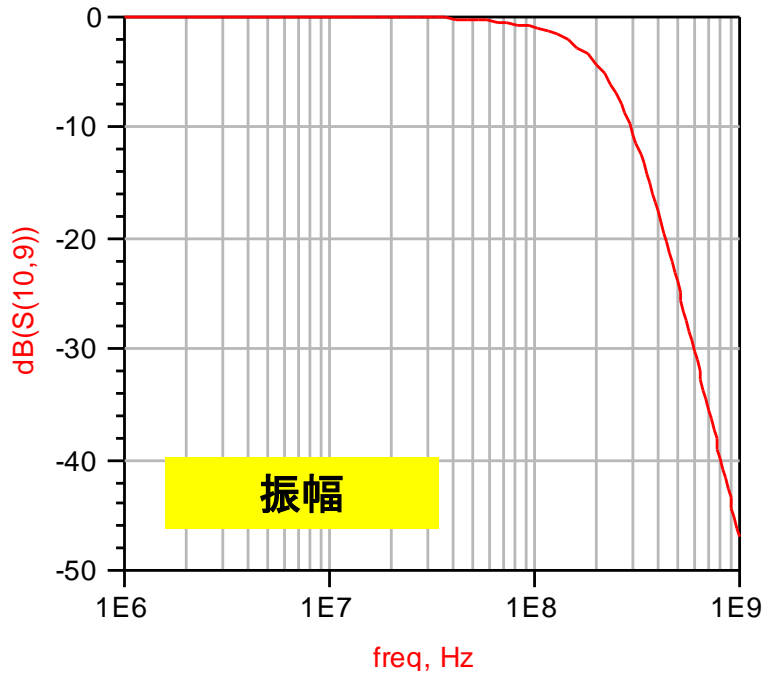


逆チェビシェフ特性（別名「チェビシェフType II」）の特徴

- ▶ パスバンドからストップバンドへの遷移はType Iほどではない
- ▶ パスバンドの振幅特性はフラットにできるが、ストップバンドにリップルが生じる
- ▶ 群遅延は大きい
- ▶ パルス応答はリングングが生じる

- ▶ あまり使われない。素子数も多い

ベッセル特性

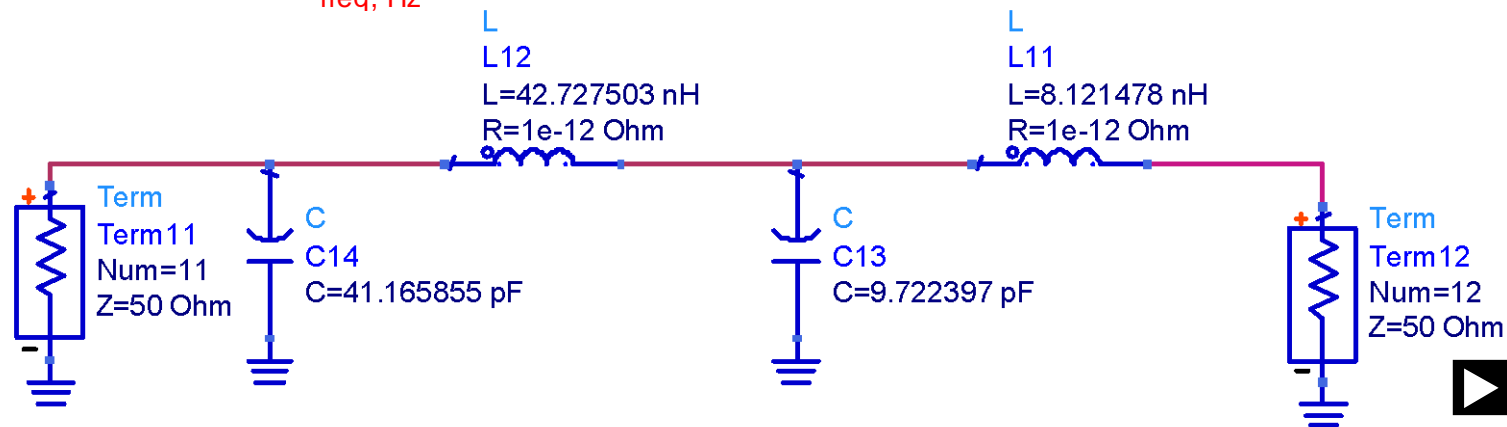
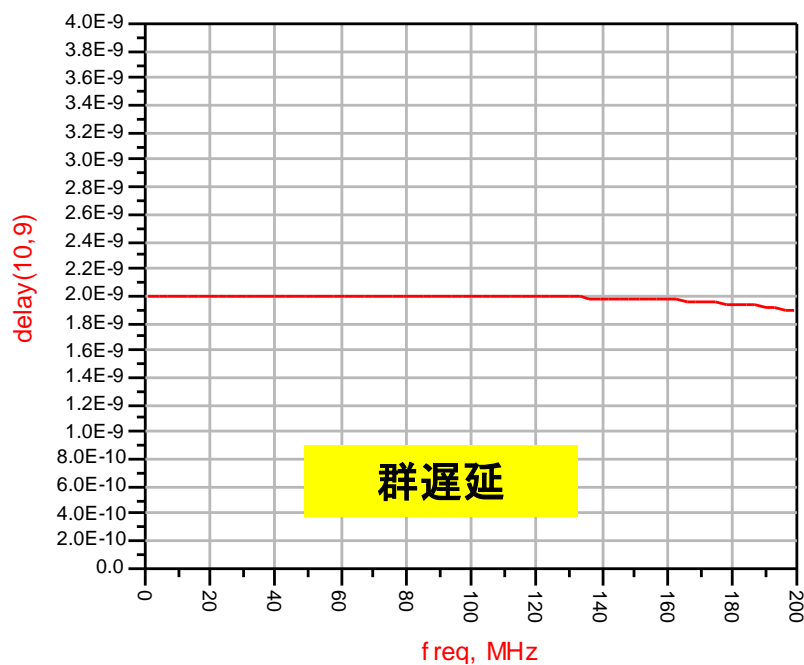
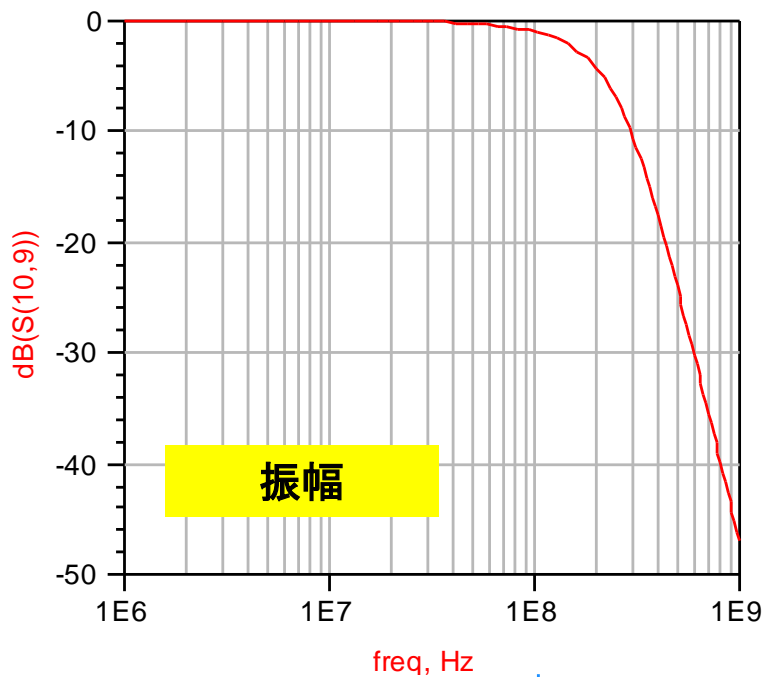


ベッセル特性の特徴

- ▶ パスバンドの振幅特性はなだらか
- ▶ 群遅延はうねりが無い
- ▶ パルス応答はリングングは生じない

- ▶ デジタル信号パルスなど信号伝送における波形整形に活用できる（よく使われる）

ガウシアン特性



ガウシャン特性の特徴

- ▶ パルス応答にリングングを生じさせず、パルス波形の遷移を一番高速にできる
- ▶ パスバンドの振幅特性はなだらか
- ▶ 群遅延はいちばんフラット

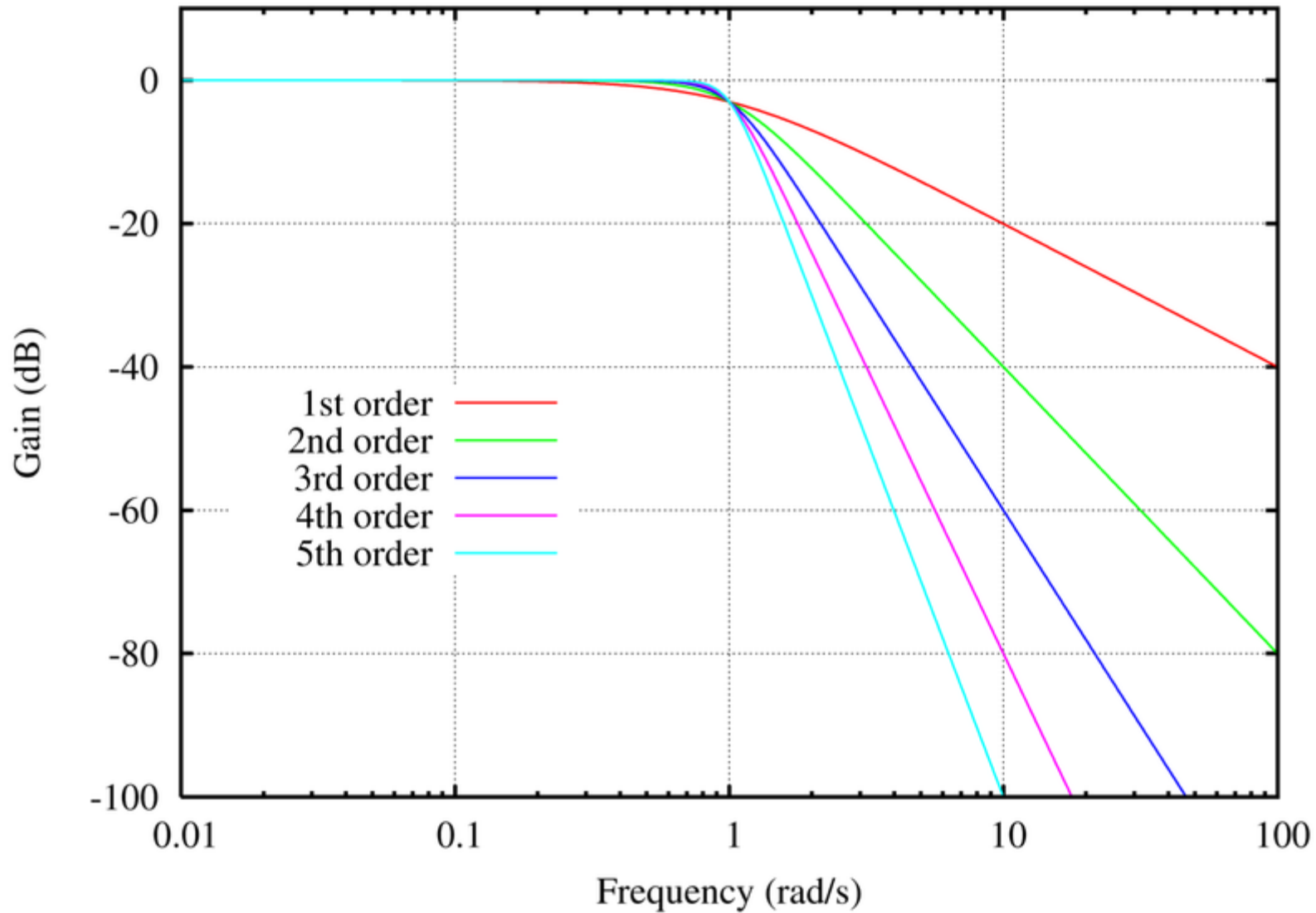
- ▶ ベッセルフィルタとかなり近い
- ▶ オシロスコープの入力段に使われている

5. 数表を用いたフィルタ 設計技法

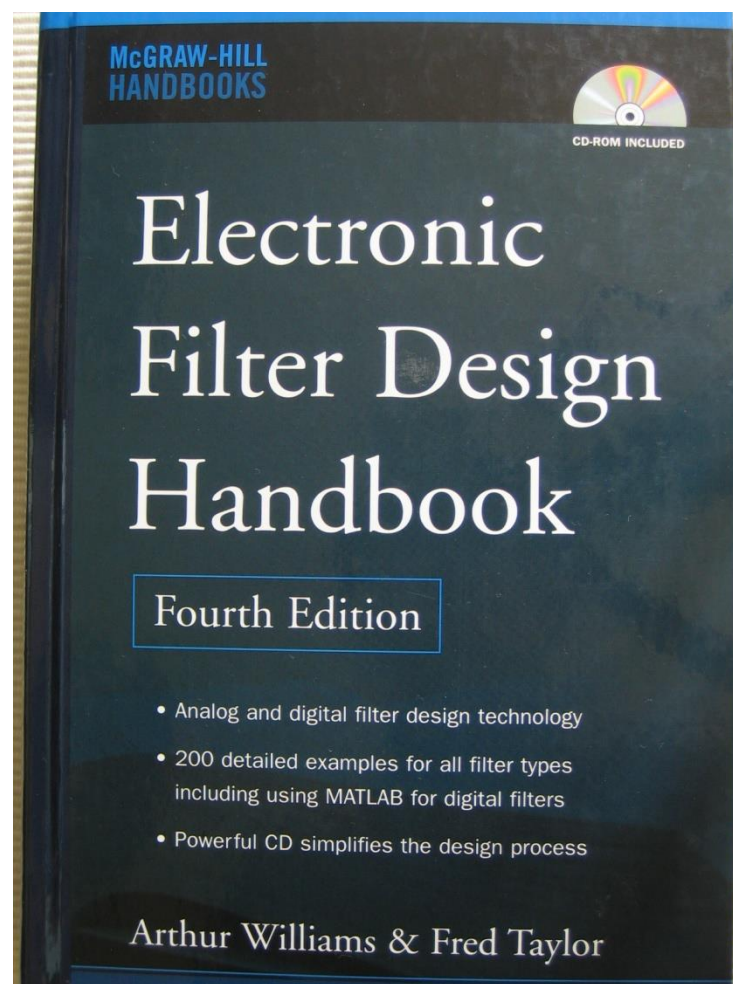
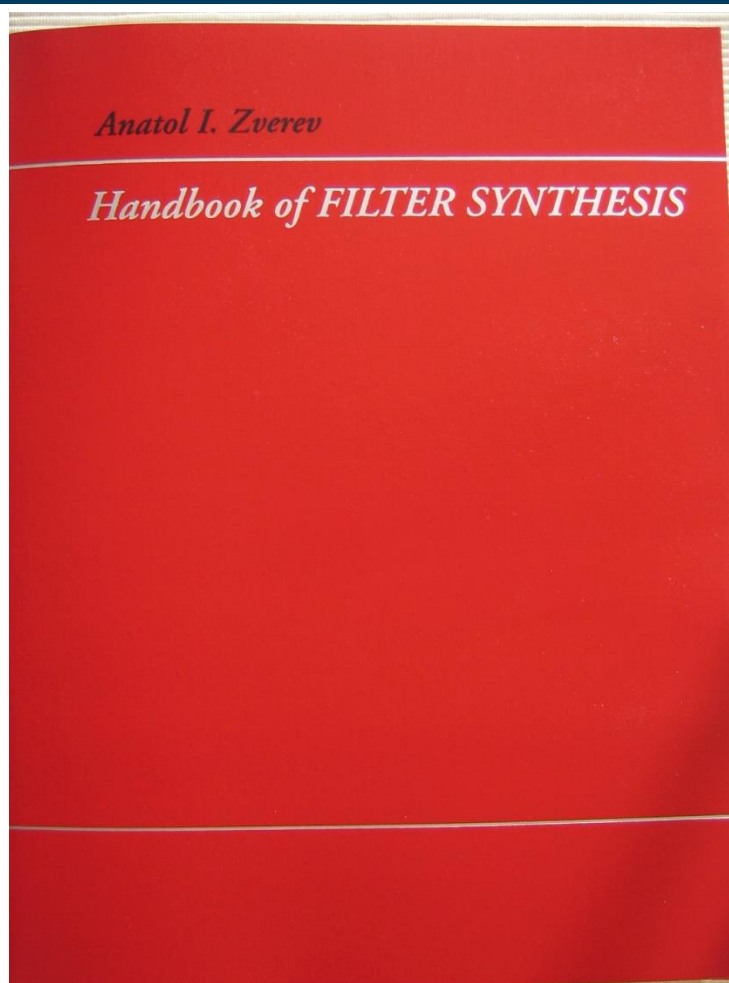
フィルタの設計ステップ 数表を用いる方法

- ▶ 1) 目的とする周波数応答と適切なフィルタ・タイプを決める
 $\omega =$ 除去目的角周波数 $\omega_c =$ 3dBカットオフ周波数
- ▶ 2) ω/ω_c を計算し目的とする減衰量に適合するフィルタ次数を、フィルタ減衰曲線図から選定する
- ▶ 3) R_S/R_L もしくは R_L/R_S を計算し、それに適切にあてはまる数表を参照して、フィルタ係数値を得る
- ▶ 4) 周波数によるスケーリング係数 & インピーダンス（フィルタ・タイプを決定するときに使ったスケーリング係数 ω_c をここでも用いる）
- ▶ 5) （必要であれば）HPFやBPF、差動フィルタ形状に変換

ステップ1と2 : バタワース特性の応答



ステップ3 : 規格化プロトタイプ・フィルタ数表の例

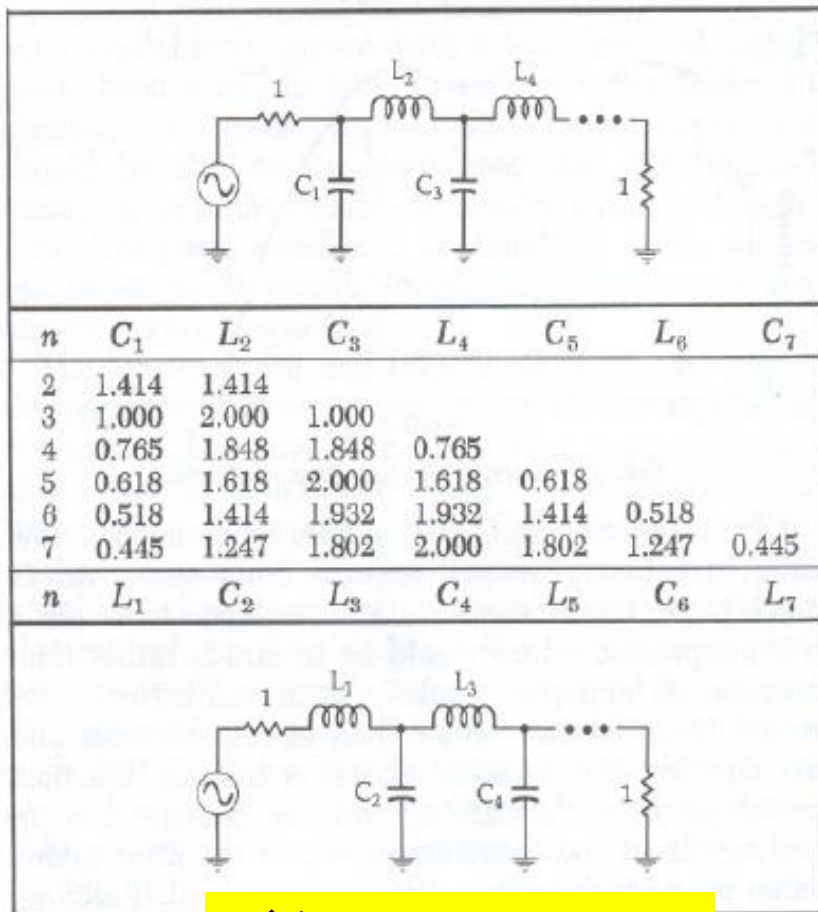


左) Anatol I. Zverev; Handbook of Filter Synthesis, Wiley-Interscience.

右) Arthur Williams, Fred Taylor; Electronic Filter Design Handbook, Fourth Edition, McGraw-Hill.

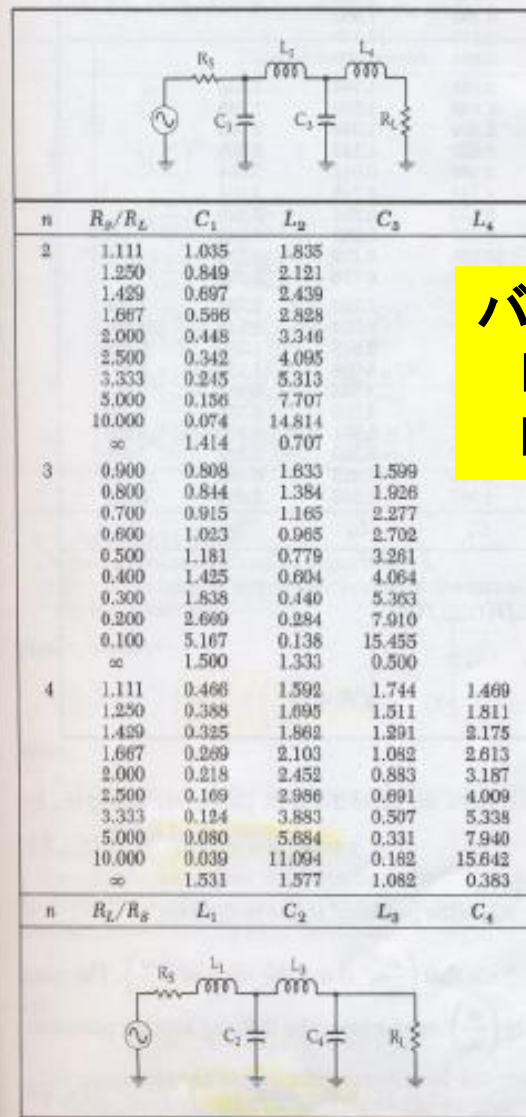
ステップ3：規格化プロトタイプ・フィルタ数表

Table 3-1. Butterworth Equal Termination Low-Pass Prototype Element Values ($R_S = R_L$)



バターース $R_S = R_L$

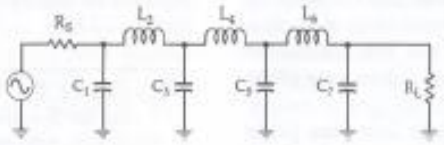
Table 3-2A. Butterworth Low-Pass Prototype Element Values



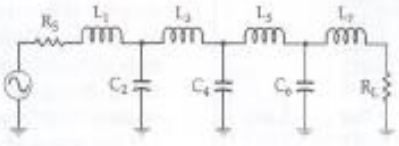
バターース
 $R_S \neq R_L$
 $R_S > R_L$

ステップ3 : 規格化プロトタイプ・フィルタ数表

Table 3-2B. Butterworth Low-Pass Prototype Element Values



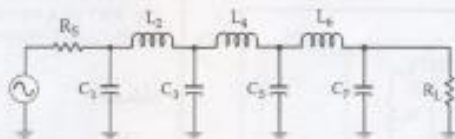
n	R_S/R_L	C_1	L_2	C_3	L_4	C_5	L_6	C_7
5	0.900	0.442	1.027	1.910	1.756	1.389		
	0.800	0.470	0.866	2.061	1.544	1.738		
	0.700	0.517	0.731	2.285	1.333	2.108		
	0.600	0.588	0.609	2.600	1.126	2.552		
	0.500	0.686	0.496	3.051	0.924	3.133		
	0.400	0.838	0.388	3.736	0.727	3.965		
	0.300	1.094	0.285	4.684	0.537	5.307		
	0.200	1.608	0.186	7.185	0.352	7.935		
	0.100	3.512	0.091	14.095	0.173	15.710		
∞	1.545	1.694	1.382	0.894	0.309			
6	1.111	0.289	1.040	1.322	2.054	1.744	1.335	
	1.250	0.245	1.116	1.126	2.239	1.550	1.688	
	1.429	0.207	1.236	0.957	2.499	1.346	2.082	
	1.667	0.173	1.407	0.801	2.858	1.143	2.509	
	2.000	0.141	1.653	0.654	3.369	0.942	3.094	
	2.500	0.111	2.028	0.514	4.141	0.745	3.931	
	3.333	0.082	2.656	0.379	5.433	0.552	5.290	
	5.000	0.054	3.917	0.248	8.020	0.363	7.922	
	10.000	0.026	7.705	0.122	15.788	0.179	15.738	
∞	1.553	1.759	1.553	1.202	0.758	0.259		
7	0.900	0.299	0.711	1.404	1.489	2.125	1.727	1.896
	0.800	0.322	0.606	1.517	1.278	2.334	1.546	1.852
	0.700	0.357	0.515	1.688	1.091	2.618	1.350	2.028
	0.600	0.408	0.432	1.928	0.917	3.005	1.150	2.477
	0.500	0.480	0.354	2.273	0.751	3.553	0.951	3.064
	0.400	0.590	0.278	2.795	0.592	4.380	0.754	3.904
	0.300	0.775	0.206	3.671	0.437	5.761	0.560	5.258
	0.200	1.145	0.135	5.427	0.287	8.526	0.369	7.908
	0.100	2.257	0.067	10.700	0.142	16.832	0.182	15.748
∞	1.558	1.799	1.659	1.397	1.055	0.656	0.223	
n	R_L/R_S	L_1	C_2	L_3	C_4	L_5	C_6	L_7



バタワース
 $R_S \neq R_L$
 $R_S < R_L$

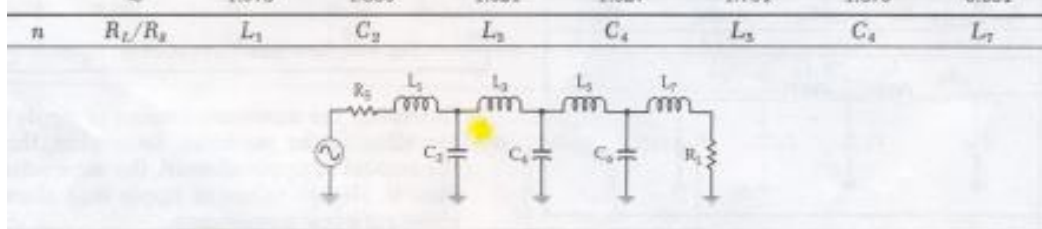
ステップ3：規格化プロトタイプ・フィルタ数表

Table 3-5B. Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 0.1-dB Ripple



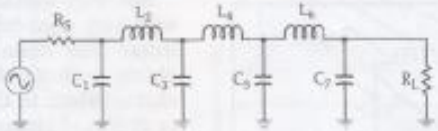
n	R_g/R_L	C_1	L_2	C_3	L_4	C_5	L_6	C_7	
5	1.000	1.301	1.558	2.241	1.556	1.301			
	0.900	1.285	1.433	2.390	1.488	1.488			
	0.800	1.300	1.282	2.582	1.382	1.738			
	0.700	1.358	1.117	2.886	1.244	2.062			
	0.600	1.470	0.947	3.289	1.085	2.484			
	0.500	1.654	0.778	3.845	0.913	3.055			
	0.400	1.954	0.612	4.720	0.733	3.886			
	0.300	2.477	0.451	6.196	0.550	5.237			
	0.200	3.546	0.295	9.127	0.366	7.889			
	0.100	6.787	0.115	17.957	0.182	15.745			
∞	1.561	1.807	1.766		1.417				
6	1.355	0.942	2.080	1.659	2.247	1.534	1.277		
	1.429	0.735	2.249	1.454	2.544	1.405	1.629		
	1.687	0.542	2.600	1.183	3.064	1.185	2.174		
	2.000	0.414	3.008	0.958	3.712	0.979	2.794		
	2.500	0.310	3.765	0.740	4.651	0.778	3.645		
	3.333	0.220	4.927	0.551	6.195	0.580	4.996		
	5.000	0.139	7.250	0.381	9.261	0.384	7.618		
	10.000	0.067	14.220	0.178	18.427	0.180	15.350		
	∞	1.534	1.884	1.831	1.749	1.394	0.638		
	7	1.000	1.262	1.520	2.239	1.680	2.239	1.520	1.262
0.900		1.242	1.395	2.361	1.578	2.397	1.459	1.447	
0.800		1.255	1.245	2.548	1.443	2.624	1.382	1.697	
0.700		1.310	1.083	2.819	1.283	2.942	1.233	2.021	
0.600		1.417	0.917	3.205	1.109	3.384	1.081	2.444	
0.500		1.595	0.753	3.784	0.928	4.015	0.914	3.018	
0.400		1.885	0.593	4.618	0.742	4.970	0.738	3.855	
0.300		2.392	0.437	6.054	0.556	6.569	0.557	5.217	
0.200		3.428	0.286	8.937	0.369	9.770	0.372	7.890	
0.100		6.570	0.141	17.603	0.184	19.376	0.186	15.813	
∞	1.575	1.858	1.921	1.827	1.734	1.379	0.831		

チェビシェフ type I
リップル = 0.1dB

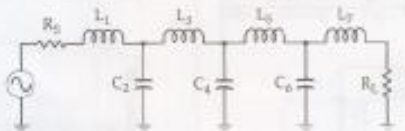


ステップ3 : 規格化プロトタイプ・フィルタ数表

Table 3-4B. Chebyshev Low-Pass Element Values for 0.01-dB Ripple



n	R_0/R_L	C_1	L_2	C_2	L_4	C_5	L_4	C_7
5	1.000	0.977	1.685	2.037	1.685	0.977		
	0.900	0.880	1.458	2.174	1.641	1.274		
	0.800	0.877	1.235	2.379	1.490	1.607		
	0.700	0.926	1.040	2.658	1.323	1.977		
	0.600	1.019	0.863	3.041	1.135	2.424		
	0.500	1.160	0.699	3.594	0.942	3.009		
	0.400	1.399	0.544	4.403	0.749	3.845		
	0.300	1.797	0.398	5.772	0.557	5.193		
	0.200	2.604	0.259	8.514	0.368	7.828		
	0.100	5.041	0.127	16.741	0.182	15.613		
∞	1.547	1.795	1.645	1.237	1.237	0.488		
6	1.101	0.851	1.796	1.841	2.027	1.631	0.937	
	1.111	0.760	1.782	1.775	2.094	1.638	1.083	
	1.250	0.545	1.864	1.489	2.403	1.507	1.504	
	1.429	0.436	2.038	1.266	2.735	1.332	1.899	
	1.667	0.351	2.298	1.061	3.167	1.145	2.337	
	2.000	0.279	2.678	0.807	3.768	0.954	2.948	
	2.500	0.214	3.261	0.682	4.667	0.781	3.790	
	3.333	0.155	4.245	0.503	6.163	0.568	5.143	
	5.000	0.100	6.223	0.330	9.151	0.378	7.785	
	10.000	0.048	12.171	0.162	18.105	0.187	15.595	
∞	1.551	1.847	1.790	1.596	1.190	0.469		
7	1.000	0.913	1.595	2.002	1.870	2.002	1.595	0.913
	0.900	0.818	1.362	2.089	1.722	2.202	1.581	1.206
	0.800	0.811	1.150	2.262	1.525	2.465	1.464	1.538
	0.700	0.857	0.967	2.516	1.323	2.802	1.307	1.910
	0.600	0.943	0.803	2.872	1.124	3.250	1.131	2.359
	0.500	1.080	0.650	3.382	0.928	3.875	0.947	2.948
	0.400	1.297	0.507	4.156	0.735	4.812	0.758	3.790
	0.300	1.680	0.372	5.454	0.546	6.370	0.568	5.148
	0.200	2.242	0.242	8.057	0.360	9.494	0.378	7.802
	0.100	4.701	0.119	15.872	0.178	18.818	0.188	15.652
∞	1.559	1.867	1.800	1.705	1.563	1.161	0.456	



チェビシェフ type I
リップル = 0.01dB

ステップ4：周波数とインピーダンスのスケーリング

$$C_{scaled} = \frac{C_n}{\omega_c \cdot 2\pi f_c R_L}$$

$$L_{scaled} = \frac{L_n R_L}{\omega_c \cdot 2\pi f_c}$$

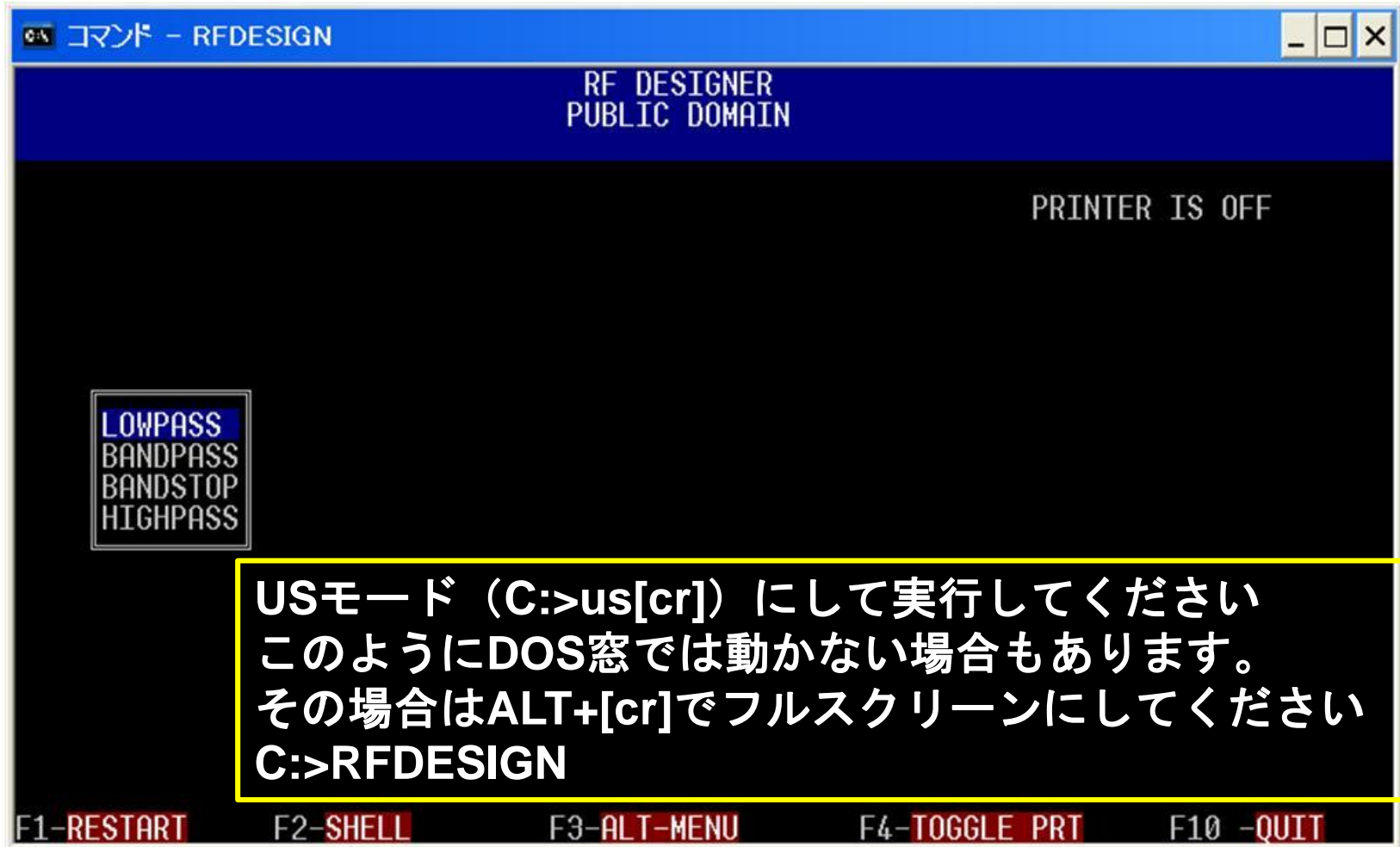
6. フィルタ設計に関する 話題

パッシブ・フィルタ設計/回路設計用ツールの例

- ▶ 直接Excel で表計算アプローチ（数式を知らないと無理）
- ▶ Keysight Advance Design System (ADS)（高価）
- ▶ Genesys（高価）
- ▶ Microwave Office（高価）
- ▶ AADE（フリー） <http://www.aade.com/filter.htm>
- ▶ Coilcraft LC Filter Designer（フリー）
http://www.coilcraft.com/apps/lc_filter_designer/lc_filter_designer.cfm
- ▶ AppCAD（Keysightのフリーソフト）
- ▶ NuHertz Filter Free（のうちフリーバージョン）
- ▶ Qucs（SPICEらしい <http://qucs.sourceforge.net/index.html>）
- ▶ Pspice/Hspice（応答の確認のみ）
- ▶ Circuit Sage: RF filters（いろいろ出ています）
http://www.circuitsage.com/filter_design

パッシブフィルタ設計ツールの一例（MSDOS上）

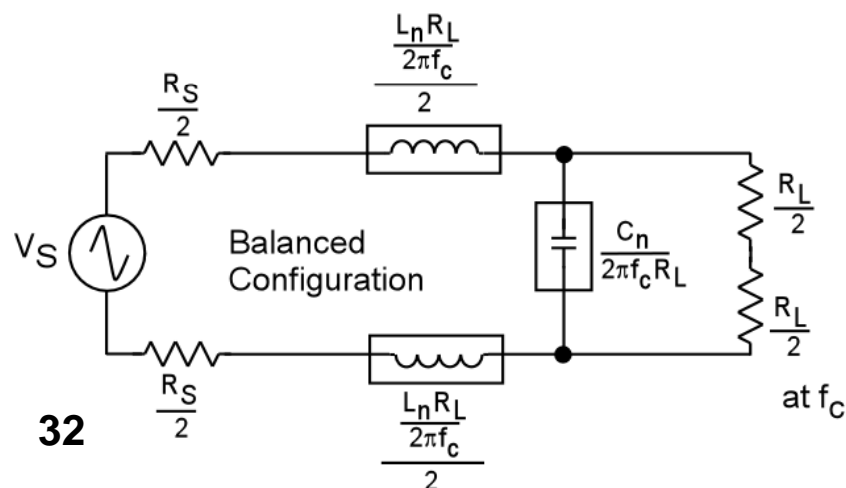
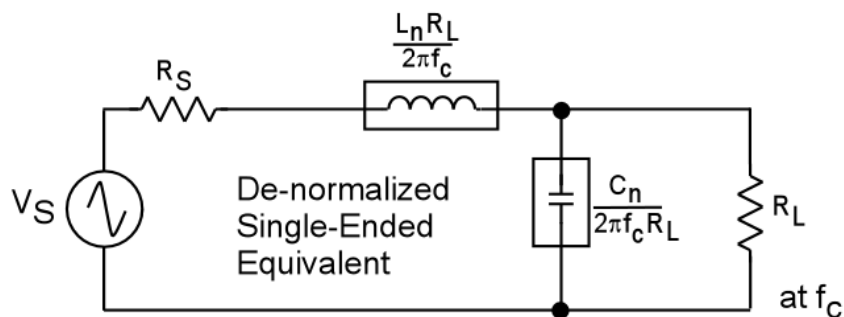
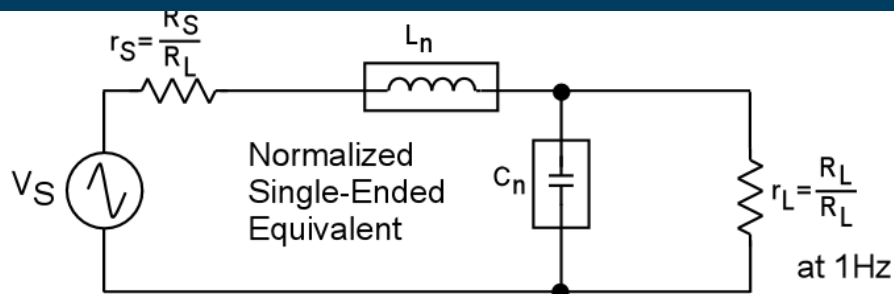
- ご興味あれば弊社「技術的なお問い合わせ」までお問い合わせください。ソフトウェアをお送りします



フィルタの実装で考慮すべきこと

- ▶ **最初**の素子を直列アーム、並列アームのどちらにするか？
- ▶ **最後**の素子を直列アーム、並列アームのどちらにするか？
 - ADC直前の素子は、並列アーム（シャント）のコンデンサにするのがベスト
- ▶ 次数は何次にする？「 $n = ?$ 」
 - 減衰量の要求にマッチする最小の次数のフィルタにすべき
- ▶ リプルをどうする？
 - 1dB以下が一般的。リプル許容度は後段のデジタル信号処理とも関係
- ▶ 振幅と位相のバランスをどうする？
- ▶ 部品ごとの誤差とマッチングをどうする？
 - 全体の周波数特性だけでなく、振幅変動と位相変動に大きく影響を与える
- ▶ 群遅延量をどうする？
 - 群遅延（**変動**）は無線通信デジタル変復調精度に影響（ISI & EVM）
ISI = Inter Symbol Interference, EVM = Error Vector Magnitude

差動フィルタへの変換（要約）



【設計手順】

- 1) フィルタ種類と次数を決める
- 2) 規格化プロトタイプ・フィルタの数字（目的の R_S/R_L に相当する）を見つける
- 3) 周波数と負荷 R_L の大きさをを用いて規格化プロト値からスケールリングする
- 4) シングルエンドで設計して、それを差動に（直列接続の要素ごとに分離して）変換する

$$C_{scaled} = \frac{C_n}{2\pi f_c R_L} \quad L_{scaled} = \frac{L_n R_L}{2\pi f_c}$$

中編のまとめ

- ▶ アンチ・エイリアシングのため、LPFかBPFをドライバ・アンプとADCの間に挿入する
- ▶ 目的とする諸特性に適合するフィルタ形状をまず考える
- ▶ 数表を用いたフィルタ設計技法を紹介した
- ▶ 近年では現実的には、CADのフィルタ合成ツールを用いる
- ▶ 差動回路への変更は上下に半分に分割したモデルで考える

