フィルタ回路シミュレータの使い方　（Rev.1.1）

2024.4.12

1. 経 緯.

一般的にフィルタ特性の評価には伝達特性方程式を求める方法が採られている。　しかし、次数（素子数）が高くなると方程式が急激に複雑となり、正確に計算するのは困難です。筆者は 5 次連立チェビシェフフィルタに挑戦したが、大変な労力を要した。今回、Excel を使って数値処理を順々に行って「労力は PC に任せて！」減衰量、通過位相、群遅延時間、RL（リターンロス）を求めるプログラム（シート）を作りました。

本ソフトにより本格的なフィルタを簡単に設計･解析することができます。　今回の内容は以下のものです。使い難い点などをご指摘ください・ 3 次連立チェビシェフフィルタ　　（LPF, HPF）

- 3 次連立チェビシェフ＋1 素子フィルタ……　（LPF, HPF）
- 5 次連立チェビシェフフィルタ ……　（LPF, HPF）
- 7 次連立チェビシェフフィルタ ……　（LPF, HPF）
- 9 次 LC フィルタ ……（LPF, HPF：チェビシェフ、バターワース、ベッセル対応）

2.　使い方の手順

各フィルタの構成は 4 部構成で“設定部、”演算処理部“と”E 系列丸め“、”加工可能グラフ“から構成されています。

2-1. 設定部の構成

ここでは目使用するフィルタのパラメータとそれに対応する“実際の周波数における LC 値”を計算します。例として次の掲げる 3 次連立チェビシェフ LPF を上げます。

3次連立チェビシェフLPF (数値計算法)

規格化定数（LC 値を図表からコピー、または任意の値を入力する）　　S.Saito

Zx	L1	L2	C2	L3	Rl	0dB 基準
1	0.96898	0.3549	0.8465	0.96898	1	0
		1.824457				

実定数（使用周波数と特性インピーダンスを入力すると自動計算する）

Frec (MHz)	Z0 (Ω)	L1 (nH)	L2 (nH)	C3 (PF)	L3 (nH)	Rl (Ω)
100	50	77.11	28.24	26.94	77.11	50.00
			182.45			

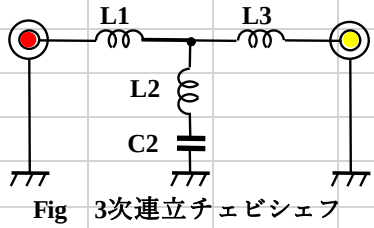


Fig　3次連立チェビシェフ

Fig.1　設定部の構成とその回路（T-Type 連立チェビシェフ LPF）図枠の部分に設計定数の入力をおこないます、するとフィルタ特性が各グラフに描かれます。

LC 値は表または負荷インピーダンスを入力できますが、他のセルはいじれません。下段の枠に使用周波数と回路負荷インピーダンスを入力しますと、実際の回路を組む際のインダクタやキャパシタの値が求められます。　実定数を参考に回路を組めば使用周波数におけるフィルタが簡単に製作できます。

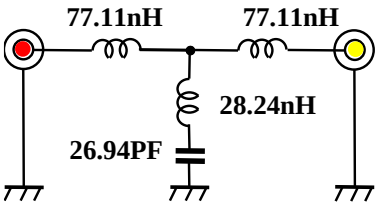


Fig　3次連立チェビシェフ

また、ここでは規格化定数に任意の数値を入力できますので、LC 値や負荷インピーダンスがバラツいた場合の特性変化も解析できます。

2-2. 演算処理部の構成

演算処理部は膨大な量の複素マトリックス計算を行い、最終的にフィルタ特性の基本要素をすべて k 離散します。この部分は敏感なため、外部から触れない様、保護されています。　3 次連立チェビシェフフィルタについて周波数、計算一点部のみの構成は以下の様になっている。減衰量、位相、入力インピーダンス、リターンロスが計算されます。

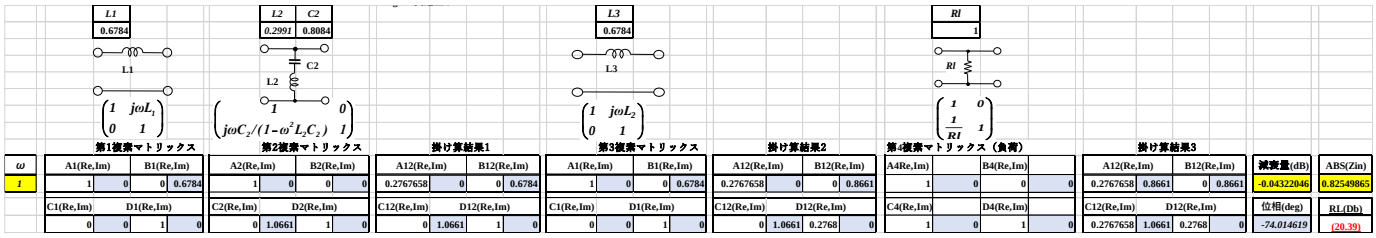


Fig.2　演算処理部、Excel シートの一区分

この操作を数千点行い、各周波数帯の値を算出します。
これを基にフィルタ特性の特性図を得るために集約表を設けています。

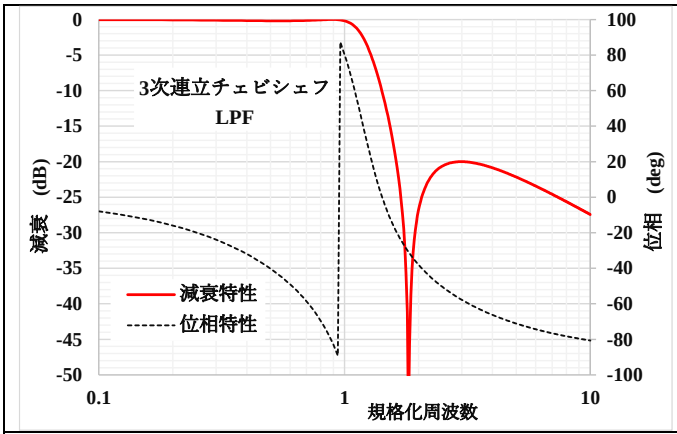
表 1　フィルタ特性の集約表（1 部分のみ掲載）

3次連立チェビシェフ_集約表

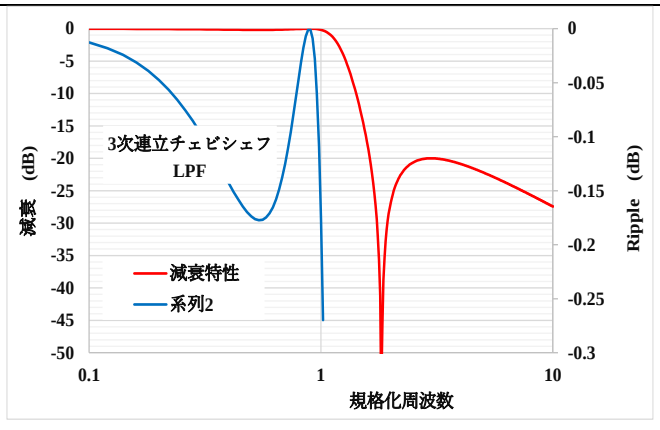
ω	ATT(dB)	ϕ	ATT(dB)	τ1	τ1__Trim	RL(dB)
1E-04	-3E-10	-0.0047				-182.9427
0.1	-0.0003	-4.6797	-0.00032	-46.86637	-0.817972	-63.05556
0.12	-0.00046	-5.617005	-0.00046	-46.90466	-0.818641	-59.93842
0.14	-0.000618	-6.555098	-0.00062	-46.94959	-0.819425	-57.32015
0.16	-0.000795	-7.49409	-0.00079	-47.00131	-0.820328	-55.06974
0.18	-0.000989	-8.434116	-0.00099	-47.05995	-0.821351	-53.10282
0.2	-0.001197	-9.375315	-0.0012	-47.12568	-0.822498	-51.36187
0.22	-0.001417	-10.31783	-0.00142	-47.19867	-0.823772	-49.80601
0.24	-0.001646	-11.2618	-0.00165	-47.27913	-0.825176	-48.40515
0.26	-0.00188	-12.20738	-0.00188	-47.36727	-0.826715	-47.13659
0.28	-0.002117	-13.15473	-0.00212	-47.46332	-0.828391	-45.98286
0.3	-0.002353	-14.104	-0.00235	-47.56756	-0.830211	-44.93022

減衰量（リップル）、位相回転、群遅延時間、リターンロス（反射損失で整合の判定を表す）表は規格化周波数ωが 0.1～0.3 迄ですが、実物は 10 まで 0.02 刻みで処理しています。　正確な数値はこちらから読み取ると良いでしょう。

得られたシミュレーシン描画の一部を紹介します。



保証減衰量は規格化周波数 1.64 で 20.5dB、位相は 68deg



通過帯域内でリップルは最大で 0.18dB 以下

2-3. E 系列丸め処理

実際の電子回路を組む場合、回路部品の規格は E 系列で規格化されているため、正確に一致するものは手に入りません。 厳密な特性を要求するのではなく、手軽に回路を組む場合は E 系列で丸めた値で組みます。この時、どの程度の偏差が生じるかを確認することができます。丸め処理のシートを開くと、E 系列変換評価の図が現れます。 上部 2 段の欄は設定部のものと同じです。4 段目の E 系列で丸めた場合の欄に 2 段目の実定数に近い値を E 系列表から選択し入力します。E 系列で丸めた場合の欄に新たなフィルタ規格化定数が表示されます。

E系列変換評価

規格化定数（LC 値を図表からコピー、または任意の値を入力する）

Zx	L1	L2	C2	L3	Rl	0dB 基準
1	0.96898	0.3549	0.8465	0.96898	1	0

実定数（使用周波数と特性インピーダンスを入力すると自動計算する）

Frec (MHz)	Z0 (Ω)	L1 (nH)	L2 (nH)	C3 (PF)	L3 (nH)	Rl (Ω)
100	50	77.11	28.24	37.60	77.11	50.00

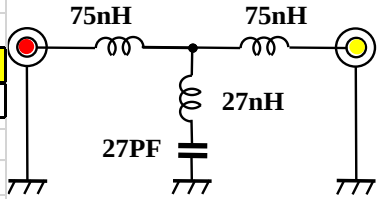


Fig 3次連立チェビシェフ LPF最終回路

E系列変換

E 系列に丸めた場合の規格化定数（自動的に計算される）

この値を設定部のLC値に挿入、誤差の解析を行う

zidoukeisa	Zx	L1	L2	C2	L3	Rl	0dB 基準
	1	0.703717	0.27646	0.816179	0.703717	1	0

E 系列に丸めた場合の実定数

E系列の中から近

Frec (MHz)	Z0 (Ω)	L1 (nH)	L2 (nH)	C3 (PF)	L3 (nH)	Rl (Ω)
100	50	56.00	22.00	39.00	56.00	50.00

E12系列

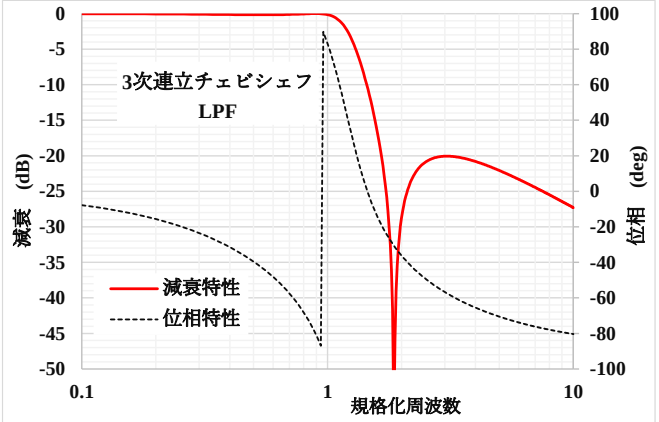
1	1.2	1.5	1.8	2.2	2.7	3.3	3.9	4.7	5.6	6.8	8.2

E24系列

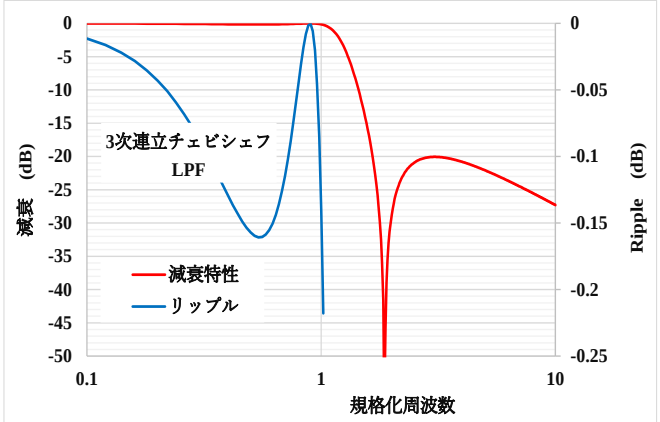
1	1.1	1.3	1.5	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.7	3	8.2
3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1

この値を設定部の規格化定数に再入力しますと、丸め処理後のフィルタ特性が得られます。これから丸めた後のフィルタ特性が問題ないかを確認 します。これを E 系列で丸めた時のフィルタ特性は次のようになります。

E 系列で丸めた時のフィルタ特性



減衰は規格化周波数 1.64 で 17.7dB、位相は 83deg
保証減衰量は 1.66 で 20dB。通過周波数が若干変化しただけで問題なし。



通過帯域内でリップルは最大で 0.16dB 以下

Fig.　E 系列で丸めた時のフィルタ特性

この他リターンロス（反射損失）および郡遅延特性も準備しています。今回は 3 次と 5 次までの LPF を提供します、
作業にお役立てください。
（3 次から 9 次までの HPF と LPF のプログラムが出来ています。必要に応じてご相談ください）

3.　計算法の手順

回路素子または分布線路の一部の 4 端子マトリックス(ABCD)を決定する
必要な段数のマトリックスを縦続接続する。
負荷インピーダンスを含んだ 4 端子マトリックスを計算する。
最終 4 端子マトリックスを S マトリックスに変換する
各マトリックス演算を Excel に落とし込む図で表すと以下の様になっています。
　まず LC 組み合わせの小ブロックを縦続接続して、縦続接続するごとにマトリックス掛け算を行います。掛け算を繰り返すと、各マトリックスにおける計算結果が得られ、負荷における最終結果が全体の電気特性が求められる。最終マトリックスから
　掛け算を繰り返すと、各マトリックスにおける計算結果が得られ、負荷における最終結果が全体の電気特性が求められる。最終マトリックスから

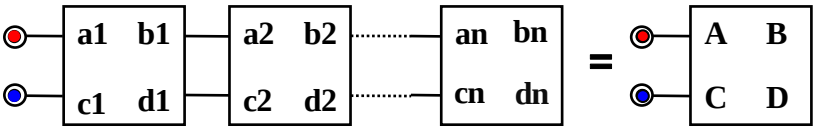


Fig　伝達（ABCD）パラメータ変換

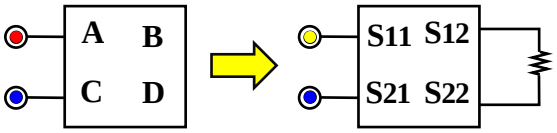


Fig.　ABCDパラメータ　Sパラメータ変換

が求められる。

最終伝達マトリックス (ABCD) を使って S パラメータを計算すると

伝達（減衰）特性は $S_{21}=\dfrac{2Z_l}{\Delta}$ …… (1)

反射特性は $S11=\dfrac{A\cdot Z_l+B-C\cdot Z_{in}\cdot Z_l-D\cdot Z_{in}}{\Delta}$ …… (2)

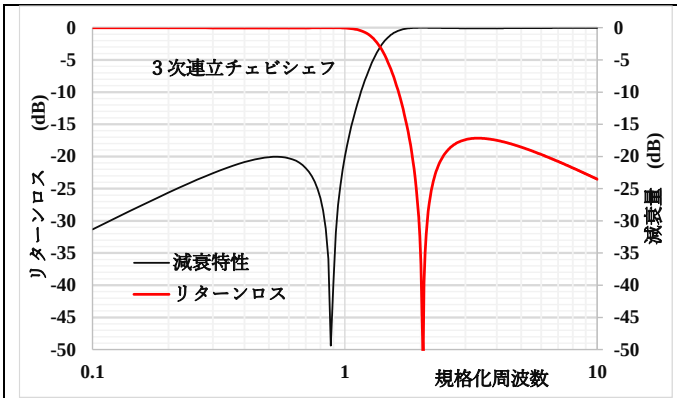
ただし $\Delta=A\cdot Z_l+B+C\cdot Z_{in}\cdot Z_l+D\cdot Z_{in}$ …… (3)

位相は (1) より $\varphi=tan^{-1}\left(-\dfrac{Im(S_{21})}{Re(S_{21})}\right)$ …… (4)

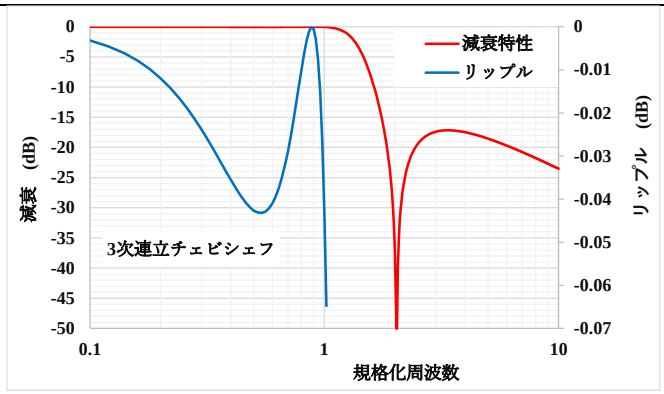
群遅延は(4) より $\tau=\dfrac{d\varphi}{d\omega}$ …… (5)

シミュレーションの例を示します。

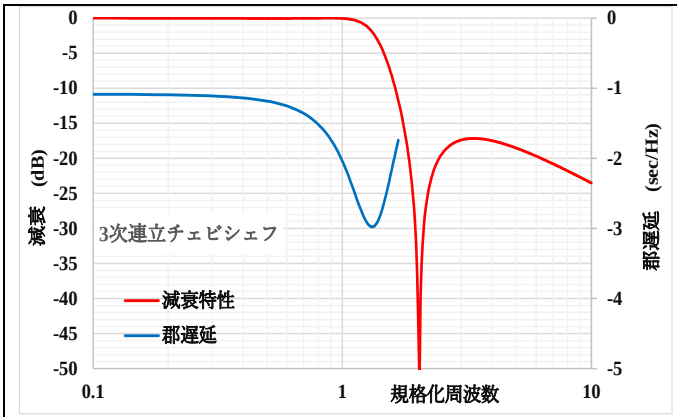
設計条件は減衰は規格化周波数 1.8 で 17.2dB 以上、リターンロスは 20dB 以下ね計算値をシミュレーションする。



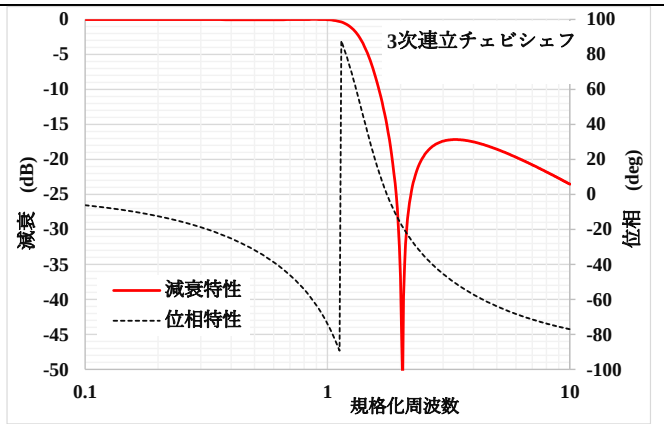
減衰は規格化周波数 1.8 で 17.2dB、リターンロスは 20dB



通過帯域内でリップルは最大で 0.0436dB 以下



群遅延時間は 1 から 2sec/Hz 程度



位相は社団周波数での回転が大きい

以上