

定インピーダンスアッテネータとフィルタ

Ayumi's Lab.

2007年5月21日

Revised 2007年7月1日

目次

1	Y-Δ変換	1
1.1	Y-Δ変換	1
1.2	Δ-Y変換	3
2	アッテネータ	3
2.1	T型定インピーダンスアッテネータ	3
2.2	橋絡T型定インピーダンスアッテネータ	5
2.3	π型定インピーダンスアッテネータ	5
3	定インピーダンスフィルタ	8
3.1	定インピーダンス RIAA イコライザへの応用	9

1 Y-Δ変換

橋絡T型アッテネータやフィルタの解析に必要となるので、まず、Y-Δ変換の式を導きます。

1.1 Y-Δ変換

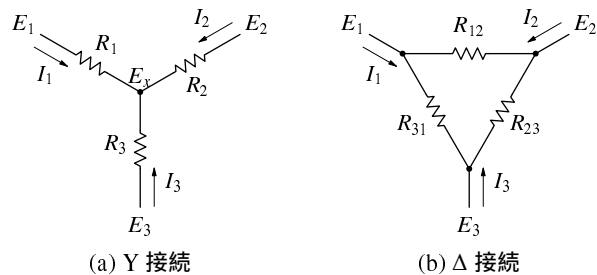


図 1: Y 接続と Δ 接続

図 1 (a) より ,

$$I_1 = \frac{E_1 - E_x}{R_1} \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{E_2 - E_x}{R_2} \quad (2)$$

$$I_3 = \frac{E_3 - E_x}{R_3} \quad (3)$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (4)$$

まず , E_x を求めます。式 (1), (2), (3) を式 (4) に代入して , E_x について解きます .

$$\begin{aligned} \frac{E_1 - E_x}{R_1} + \frac{E_2 - E_x}{R_2} + \frac{E_3 - E_x}{R_3} &= 0 \\ \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3} &= \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) E_x \\ R_2 R_3 E_1 + R_3 R_1 E_2 + R_1 R_2 E_3 &= (R_2 R_3 + R_3 R_1 + R_1 R_2) E_x \\ E_x &= \frac{R_2 R_3 E_1 + R_3 R_1 E_2 + R_1 R_2 E_3}{R_2 R_3 + R_3 R_1 + R_1 R_2} \end{aligned}$$

これを式 (1) に代入して ,

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{R_1} (E_1 - E_x) \\ &= \frac{1}{R_1} \left(E_1 - \frac{R_2 R_3 E_1 + R_3 R_1 E_2 + R_1 R_2 E_3}{R_2 R_3 + R_3 R_1 + R_1 R_2} \right) \\ &= \frac{1}{R_1} \cdot \frac{R_2 R_3 (E_1 - E_1) + R_3 R_1 (E_1 - E_2) + R_1 R_2 (E_1 - E_3)}{R_2 R_3 + R_3 R_1 + R_1 R_2} \\ &= \frac{1}{R_1} \cdot \frac{R_3 R_1 (E_1 - E_2) + R_1 R_2 (E_1 - E_3)}{R_2 R_3 + R_3 R_1 + R_1 R_2} \\ &= \frac{R_3 (E_1 - E_2) + R_2 (E_1 - E_3)}{R_2 R_3 + R_3 R_1 + R_1 R_2} \end{aligned}$$

一方 , 図 1 (b) より ,

$$I_1 = \frac{E_1 - E_2}{R_{12}} + \frac{E_1 - E_3}{R_{31}} \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{E_2 - E_3}{R_{23}} + \frac{E_2 - E_1}{R_{12}} \quad (6)$$

$$I_3 = \frac{E_3 - E_1}{R_{31}} + \frac{E_3 - E_2}{R_{23}} \quad (7)$$

であるから ,

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3} \quad (8)$$

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3 + R_3 R_1 + R_1 R_2}{R_1} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (9)$$

$$R_{31} = \frac{R_3 R_1 + R_1 R_2 + R_2 R_3}{R_2} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 R_1}{R_2} \quad (10)$$

となります .

1.2 Δ-Y 変換

式 (8), (9), (10) より,

$$R_{12}R_3 = R_{23}R_1 = R_{31}R_2 = R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1 \equiv R_x \quad (11)$$

これより,

$$R_1 = \frac{R_x}{R_{23}} \quad (12)$$

$$R_2 = \frac{R_x}{R_{31}} \quad (13)$$

$$R_3 = \frac{R_x}{R_{12}} \quad (14)$$

これらを用いて, 式 (11) の右側を書き直して, R_x について解きます.

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{R_x^2}{R_{23}R_{31}} + \frac{R_x^2}{R_{31}R_{12}} + \frac{R_x^2}{R_{12}R_{23}} \\ 1 &= \frac{(R_{12} + R_{23} + R_{31})R_x}{R_{12}R_{23}R_{31}} \\ R_x &= \frac{R_{12}R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{aligned}$$

これを, 式 (12), (13), (14) に代入すると,

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{23}R_{31}}{R_{23}(R_{12} + R_{23} + R_{31})} = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (15)$$

$$R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (16)$$

$$R_3 = \frac{R_{31}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (17)$$

2 アtteネータ

2.1 T 型定インピーダンスアtteネータ

T 型定インピーダンスアtteネータの回路を, 図 2 に示します. 信号源抵抗および負荷抵抗を R

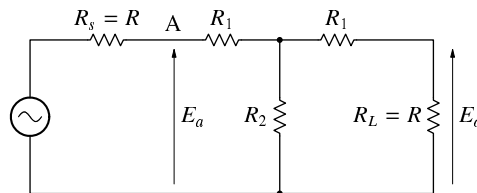


図 2: T 型定インピーダンスアtteネータ

とします.

A 点より右側を見たインピーダンスを Z とすると,

$$\begin{aligned} Z &= R_1 + (R_1 + R) // R_2 = R_1 + \frac{RR_2 + R_1R_2}{R + R_1 + R_2} \\ &= \frac{RR_1 + RR_2 + R_1^2 + 2R_1R_2}{R + R_1 + R_2} \end{aligned}$$

これが R と等しくなるための条件は，

$$\begin{aligned} R &= \frac{RR_1 + RR_2 + R_1^2 + 2R_1R_2}{R + R_1 + R_2} \\ R^2 + RR_1 + RR_2 &= RR_1 + RR_2 + R_1^2 + 2R_1R_2 \\ R^2 &= R_1^2 + 2R_1R_2 \end{aligned} \quad (18)$$

$$R_2 = \frac{R^2 - R_1^2}{2R_1} \quad (19)$$

この状態の時，A 点の電圧は，入力電圧の半分となります．これは，規定の負荷 ($= R$) を接続しても生じる減衰なので，アッテネータの減衰としてはこれを除いて考え、A 点の電圧 E_a に対して出力電圧 E_o がどうなるかを考えます．すなわち，アッテネータの減衰率を $K (\geq 1)$ とすると，

$$E_a = KE_o \quad (20)$$

という関係で表されます．

図 2 より，

$$\begin{aligned} E_o &= \frac{R}{R + R_1} \cdot \frac{(R + R_1) // R_2}{R_1 + (R + R_1) // R_2} E_a \\ &= \frac{R}{R + R_1} \cdot \frac{\frac{(R + R_1)R_2}{R + R_1 + R_2}}{R_1 + \frac{(R + R_1)R_2}{R + R_1 + R_2}} E_a \\ &= \frac{R}{R + R_1} \cdot \frac{(R + R_1)R_2}{RR_1 + R_1^2 + R_1R_2 + RR_2 + R_1R_2} E_a \\ &= \frac{RR_2}{RR_1 + RR_2 + R_1^2 + 2R_1R_2} E_a \end{aligned}$$

式 (18) を使うと，

$$E_o = \frac{RR_2}{RR_1 + RR_2 + R^2} E_a = \frac{R_2}{R + R_1 + R_2} E_a$$

したがって，

$$K = \frac{R + R_1 + R_2}{R_2}$$

式 (19) を代入して，

$$\begin{aligned} K &= \frac{R + R_1 + \frac{R^2 - R_1^2}{2R_1}}{\frac{R^2 - R_1^2}{2R_1}} = \frac{2R_1(R + R_1) + R^2 - R_1^2}{R^2 - R_1^2} \\ &= \frac{R^2 + 2RR_1 + R_1^2}{R^2 - R_1^2} = \frac{(R + R_1)^2}{(R + R_1)(R - R_1)} = \frac{R + R_1}{R - R_1} \\ KR - KR_1 &= R + R_1 \\ (K + 1)R_1 &= (K - 1)R \\ R_1 &= \frac{K - 1}{K + 1} R \end{aligned} \quad (21)$$

これを式 (19) に代入して，

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{R^2 - \frac{(K-1)^2}{(K+1)^2} R^2}{2 \frac{K-1}{K+1} R} = \frac{(K+1)^2 R^2 - (K-1)^2 R^2}{2(K^2 - 1)R} = \frac{4K}{2(K^2 - 1)} R \\ &= \frac{2K}{K^2 - 1} R \end{aligned} \quad (22)$$

2.2 橋絡 T 型定インピーダンスアッテネータ

ロータリー SW を使用して定インピーダンス型のアッテネータを構成すると、T 型では減衰量毎に 3 個の抵抗を使用しなければなりません。抵抗の数を減らすには、図 3 (a) の橋絡 T 型の回路を使います。この回路では、 R_1, R_2 の抵抗を切り替えるだけで、任意の減衰量を得ることができます。

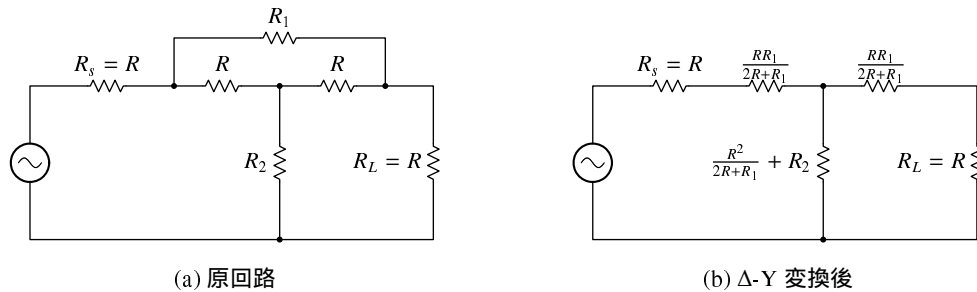


図 3: 橋絡 T 型定インピーダンスアッテネータ

R_1 の部分を Δ -Y 変換すると、図 3 (b) の回路となります。この値について、式 (21), (22) の関係が成立すればよいので、

$$\frac{RR_1}{2R+R_1} = \frac{K-1}{K+1}R \quad (23)$$

$$\frac{R^2}{2R+R_1} + R_2 = \frac{2K}{K^2-1}R \quad (24)$$

という関係が得られます。式 (23) より、

$$\begin{aligned} \frac{R_1}{2R+R_1} &= \frac{K-1}{K+1} \\ (K+1)R_1 &= 2(K-1)R + (K-1)R_1 \\ 2R_1 &= 2(K-1)R \\ R_1 &= (K-1)R \end{aligned} \quad (25)$$

が得られ、これを式 (24) に代入して R_2 について解くと、

$$\begin{aligned} \frac{R^2}{2R+(K-1)R} + R_2 &= \frac{2K}{K^2-1}R \\ \frac{R}{K+1} + R_2 &= \frac{2K}{K^2-1}R \\ R_2 &= \frac{2KR}{(K+1)(K-1)} - \frac{R}{K+1} = \frac{2K-K+1}{(K+1)(K-1)}R \\ &= \frac{1}{K-1}R \end{aligned} \quad (26)$$

2.3 π 型定インピーダンスアッテネータ

π 型定インピーダンスアッテネータの回路を、図 4 に示します。

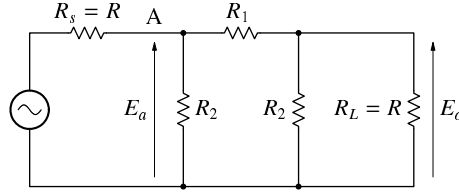


図 4: π 型定インピーダンスアッテネータ

A 点より右側を見たインピーダンスを Z とすると,

$$\begin{aligned} Z &= R_2 // (R_1 + R_2 // R) = R_2 // \left(R_1 + \frac{RR_2}{R + R_2} \right) \\ &= \frac{R_2 \left(R_1 + \frac{RR_2}{R + R_2} \right)}{R_1 + R_2 + \frac{RR_2}{R + R_2}} = \frac{R_2 (RR_1 + RR_2 + R_1 R_2)}{RR_1 + 2RR_2 + R_1 R_2 + R_2^2} \end{aligned}$$

これが R と等しくなるための条件は,

$$\begin{aligned} R &= \frac{R_2 (RR_1 + RR_2 + R_1 R_2)}{RR_1 + 2RR_2 + R_1 R_2 + R_2^2} \\ R^2 R_1 + 2R^2 R_2 + RR_1 R_2 + RR_2^2 &= RR_1 R_2 + RR_2^2 + R_1 R_2^2 \\ R^2 R_1 + 2R^2 R_2 &= R_1 R_2^2 \\ (R_2^2 - R^2) R_1 &= 2R^2 R_2 \\ R_1 &= \frac{2R^2 R_2}{R_2^2 - R^2} \end{aligned} \quad (27)$$

図 4 より,

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} &= \frac{R // R_2}{R_1 + R // R_2} \\ K &= \frac{R_1 + R // R_2}{R // R_2} = \frac{R_1}{R // R_2} + 1 = \frac{R + R_2}{RR_2} R_1 + 1 \end{aligned}$$

式 (27) を代入して,

$$\begin{aligned} K &= \frac{R + R_2}{RR_2} \cdot \frac{2R^2 R_2}{R_2^2 - R^2} + 1 = \frac{R + R_2}{RR_2} \cdot \frac{2R^2 R_2}{(R_2 + R)(R_2 - R)} + 1 \\ &= \frac{2R}{R_2 - R} + 1 = \frac{2R + R_2 - R}{R_2 - R} = \frac{R_2 + R}{R_2 - R} \\ KR_2 - KR &= R_2 + R \\ (K - 1)R_2 &= (K + 1)R \\ R_2 &= \frac{K + 1}{K - 1} R \end{aligned} \quad (28)$$

これを式 (27) に代入して,

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{2R^2 \frac{K+1}{K-1} R}{\frac{(K+1)^2}{(K-1)^2} R^2 - R^2} = \frac{2 \frac{K+1}{K-1} R}{\frac{(K+1)^2}{(K-1)^2} - 1} R \\ &= \frac{2(K^2 - 1)}{(K + 1)^2 - (K - 1)^2} R = \frac{2(K^2 - 1)}{4K} R \\ &= \frac{K^2 - 1}{2K} R \end{aligned} \quad (29)$$

もちろん，T 型を Y-Δ 変換しても同じ結果が得られます．

表 1 に，各種アッテネータの抵抗の係数を示します．抵抗値は，アッテネータのインピーダンス R にこの表の係数を掛けた値になります．

3 定インピーダンスフィルタ

定インピーダンスアッテネータの入出力間に L を，共通端子とグラウンドの間に C を入れると，ローパスフィルタになります (図 5)．

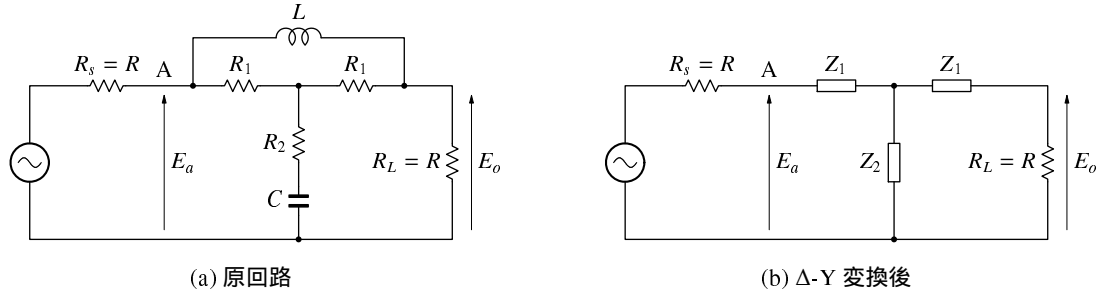


図 5: 定インピーダンス LPF

L と R_1 の部分を Δ -Y 変換すると，変換後の Z_1 および Z_2 は，

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{sLR_1}{sL + 2R_1} \\ &= \frac{\omega^2 L^2 R_1 + 2j\omega LR_1^2}{\omega^2 L^2 + 4R_1^2} \\ Z_2 &= \frac{R_1^2}{sL + 2R_1} + R_2 + \frac{1}{sC} \\ &= \frac{R_1(R_1 + 2R_2) + sLR_2 + 2R_1/sC + L/C}{sL + 2R_1} \\ &= \frac{2R_1^2(R_1 + 2R_2) + \omega^2 L^2 R_2 - j\{\omega LR_1^2 + (4R_1^2 + \omega^2 L^2)/\omega C\}}{\omega^2 L^2 + 4R_1^2} \end{aligned}$$

A 点から右を見たインピーダンス Z が R で一定となる条件は，式 (18) より，

$$\begin{aligned} R^2 &= Z_1(Z_1 + 2Z_2) \\ &= \frac{\omega^2 L^2 R_1(R_1 + 2R_2) + 4LR_1^2/C}{\omega^2 L^2 + 4R_1^2} + j \frac{2\omega LR_1\{R_1(R_1 + 2R_2) - L/C\}}{\omega^2 L^2 + 4R_1^2} \end{aligned} \quad (30)$$

この式は，以下の条件のときに，すべての周波数について成り立ちます．

$$R^2 = R_1(R_1 + 2R_2) = \frac{L}{C} \quad (31)$$

このときの伝達関数 A は，

$$\begin{aligned} Z_2 &= \frac{R^2 + sLR_2 + 2R_1/sC + R^2}{2R_1 + sL} \\ A &= \frac{Z_2}{R + Z_1 + Z_2} \end{aligned}$$

表 1: 各種アッテネータの係数表

減衰率 (dB)	減衰率 K	T 型		橋絡 T 型		π 型	
		R_1	R_2	R_1	R_2	R_1	R_2
0.1	1.0116	0.0057564	86.857	0.011579	86.360	0.011513	173.72
0.2	1.0233	0.011512	43.426	0.023293	42.931	0.023028	86.863
0.3	1.0351	0.017268	28.947	0.035142	28.456	0.034546	57.912
0.4	1.0471	0.023022	21.707	0.047129	21.219	0.046068	43.437
0.5	1.0593	0.028774	17.362	0.059254	16.877	0.057596	34.753
0.6	1.0715	0.034525	14.465	0.071519	13.982	0.069133	28.964
0.7	1.0839	0.040273	12.395	0.083927	11.915	0.080678	24.830
0.8	1.0965	0.046019	10.842	0.096478	10.365	0.092234	21.730
0.9	1.1092	0.051762	9.6337	0.10917	9.1596	0.10380	19.319
1	1.1220	0.057501	8.6667	0.12202	8.1955	0.11538	17.391
2	1.2589	0.11462	4.3048	0.25893	3.8621	0.23230	8.7242
3	1.4125	0.17100	2.8385	0.41254	2.4240	0.35230	5.8480
4	1.5849	0.22627	2.0966	0.58489	1.7097	0.47697	4.4194
5	1.7783	0.28013	1.6448	0.77828	1.2849	0.60797	3.5698
6	1.9953	0.33228	1.3386	0.99526	1.0048	0.74704	3.0095
7	2.2387	0.38247	1.1160	1.2387	0.80728	0.89602	2.6146
8	2.5119	0.43051	0.94617	1.5119	0.66143	1.0569	2.3229
9	2.8184	0.47622	0.81183	1.8184	0.54994	1.2318	2.0999
10	3.1623	0.51949	0.70273	2.1623	0.46248	1.4230	1.9250
11	3.5481	0.56026	0.61231	2.5481	0.39244	1.6331	1.7849
12	3.9811	0.59848	0.53621	2.9811	0.33545	1.8649	1.6709
13	4.4668	0.63416	0.47137	3.4668	0.28845	2.1215	1.5769
14	5.0119	0.66732	0.41560	4.0119	0.24926	2.4062	1.4985
15	5.6234	0.69804	0.36727	4.6234	0.21629	2.7228	1.4326
16	6.3096	0.72639	0.32515	5.3096	0.18834	3.0755	1.3767
17	7.0795	0.75246	0.28826	6.0795	0.16449	3.4691	1.3290
18	7.9433	0.77637	0.25584	6.9433	0.14402	3.9087	1.2880
19	8.9125	0.79823	0.22726	7.9125	0.12638	4.4002	1.2528
20	10.000	0.81818	0.20202	9.0000	0.11111	4.9500	1.2222
22	12.589	0.85282	0.15987	11.589	0.086287	6.2549	1.1726
24	15.849	0.88130	0.12670	14.849	0.067345	7.8929	1.1347
26	19.953	0.90455	0.10049	18.953	0.052763	9.9513	1.1055
28	25.119	0.92343	0.079748	24.119	0.041461	12.540	1.0829
30	31.623	0.93869	0.063309	30.623	0.032655	15.796	1.0653
32	39.811	0.95099	0.050269	38.811	0.025766	19.893	1.0515
34	50.119	0.96088	0.039921	49.119	0.020359	25.049	1.0407
36	63.096	0.96880	0.031706	62.096	0.016104	31.540	1.0322
38	79.433	0.97513	0.025182	78.433	0.012750	39.710	1.0255
40	100.00	0.98020	0.020002	99.000	0.010101	49.995	1.0202
42	125.89	0.98424	0.015888	124.89	0.0080069	62.942	1.0160
44	158.49	0.98746	0.012620	157.49	0.0063496	79.242	1.0127
46	199.53	0.99003	0.010024	198.53	0.0050371	99.761	1.0101
48	251.19	0.99207	0.0079623	250.19	0.0039970	125.59	1.0080
50	316.23	0.99370	0.0063246	315.23	0.0031723	158.11	1.0063
52	398.11	0.99499	0.0050238	397.11	0.0025182	199.05	1.0050
54	501.19	0.99602	0.0039905	500.19	0.0019993	250.59	1.0040
56	630.96	0.99684	0.0031698	629.96	0.0015874	315.48	1.0032
58	794.33	0.99749	0.0025179	793.33	0.0012605	397.16	1.0025
60	1000.0	0.99800	0.0020000	999.00	0.0010010	500.00	1.0020

$$\begin{aligned}
&= \frac{sLR_2 + 2R^2 + 2R_1/sC}{sLR + 2RR_1 + sLR_1 + sLR_2 + 2R^2 + 2R_1/sC} \\
&= \frac{sLR_2 + 2R^2 + 2R_1/sC}{sL(R + R_1 + R_2) + 2R(R + R_1) + 2R_1/sC} \\
&= \frac{s^2LCR_2 + 2sCR^2 + 2R_1}{s^2LC(R + R_1 + R_2) + 2sCR(R + R_1) + 2R_1}
\end{aligned}$$

$L = CR^2$ より ,

$$\begin{aligned}
A &= \frac{\frac{1}{2}s^2C^2R^2R_2 + sCR^2 + R_1}{\frac{1}{2}s^2C^2R^2(R + R_1 + R_2) + sCR(R + R_1) + R_1} \\
&= \frac{\frac{1}{2}s^2C^2R^2R_2/R_1 + sCR^2/R_1 + 1}{\frac{1}{2}s^2C^2R^2(1 + R/R_1 + R_2/R_1) + sCR(1 + R/R_1) + 1}
\end{aligned}$$

アッテネータの場合と同様に、

$$R_1 = \frac{K-1}{K+1}R \quad (32)$$

$$R_2 = \frac{2K}{K^2-1}R \quad (33)$$

とすれば ,

$$\begin{aligned}
A &= \frac{\frac{1}{2}s^2C^2R^2\frac{2K}{K^2-1}\frac{K+1}{K-1} + sCR\frac{K+1}{K-1} + 1}{\frac{1}{2}s^2C^2R^2\left(1 + \frac{K+1}{K-1} + \frac{2K}{K^2-1}\frac{K+1}{K-1}\right) + sCR\left(1 + \frac{K+1}{K-1}\right) + 1} \\
&= \frac{s^2C^2R^2\frac{K}{(K-1)^2} + sCR\frac{K+1}{K-1} + 1}{s^2C^2R^2\frac{K^2}{(K-1)^2} + sCR\frac{2K}{K-1} + 1} = \frac{\left(s\frac{K}{K-1}CR + 1\right)\left(s\frac{1}{K-1}CR + 1\right)}{\left(s\frac{K}{K-1}CR + 1\right)^2} \\
&= \frac{s\frac{1}{K-1}CR + 1}{s\frac{K}{K-1}CR + 1} \quad (34)
\end{aligned}$$

となり、ゲインは $T_1 = KCR/(K-1)$ より下がり始め、 $T_2 = CR/(K-1)$ で $1/K$ になり、それ以降は平坦になります。

$K \rightarrow \infty$ のときは、

$$A = \frac{1}{sCR + 1} \quad (35)$$

となり、ゲインは $T = CR$ より下がり始めます。

3.1 定インピーダンス RIAA イコライザへの応用

RIAA イコライザの時定数は、

$$T_1 = 3180\mu s \quad (36)$$

$$T_2 = 318\mu s \quad (37)$$

$$T_3 = 75\mu s \quad (38)$$

です。

T_1, T_2 は 10 倍離れているので、 $K = 10$ であり、 $R = 600\Omega$ とすれば、

$$R_1 = \frac{K-1}{K+1}R = \frac{9}{11}600 = 490.91[\Omega]$$

$$R_2 = \frac{2K}{K^2 - 1}R = \frac{20}{99}600 = 121.21 [\Omega]$$

$$T_1 = \frac{K}{K - 1}CR$$

$$C = \frac{T_1}{\frac{K}{K-1}R} = \frac{3180 \times 10^{-6}}{\frac{10}{9} \cdot 600} = 4.77 [\mu\text{F}]$$

$$L = CR^2 = \frac{T_1}{\frac{K}{K-1}}R = \frac{3180 \times 10^{-6}}{\frac{10}{9}}600 = 1.7172 [\text{H}]$$

高域のロールオフは、 $K = \infty$ として、

$$R_1 = R = 600 [\Omega]$$

$$R_2 = 0 [\Omega]$$

$$T_3 = CR$$

$$C = \frac{T_3}{R} = \frac{75 \times 10^{-6}}{600} = 0.125 [\mu\text{F}]$$

$$L = T_3R = 75 \times 10^{-6} \cdot 600 = 45 [\text{mH}]$$

最終的な回路は、図 6 のようになります。

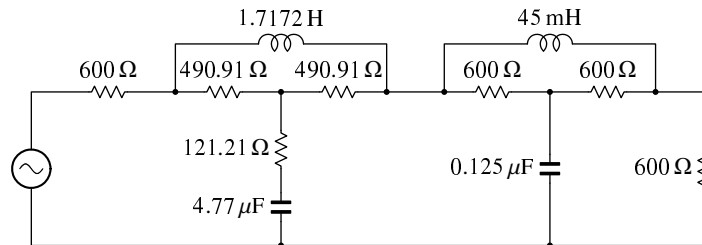


図 6: 定インピーダンス RIAA イコライザ