

Stepped-Impedance LPF

実際に LC などの部品でフィルタを製作する場合、計算やシミュレータで得られた素子値の実現が問題となります。計算で得られた素子値の部品が存在しない場合は、入手可能な値の部品での調整が必要となります。また、インダクタやコンデンサの自己共振周波数の影響から、自己共振周波数に近づくほどフィルタの特性が設計値からずれてしまい、高い周波数帯での設計が困難となります。このように、集中定数でフィルタを製作することが困難となる周波数帯では分布定数によるフィルタが用いられています。また、逆に低い周波数帯では波長が長くなり形状が大きくなってしまったため、集中定数によるフィルタが用いられています。分布定数フィルタは、一般にはマイクロ波帯以上の周波数帯で使われています。

カットオフ周波数 1GHz の LPF を集中定数フィルタと伝送線路フィルタの両方で設計してみます。集中定数フィルタで設計した LPF の解析を高周波回路シミュレータで、伝送線路フィルタで設計した LPF の解析を高周波回路シミュレータと電磁界シミュレータの両方を用いておこないます。

●高周波回路シミュレータによる解析

LC で構成した 5 次のチェビシェフ・LPF を図 1 に示します。インダクタの数を少なくできる π 形で設計しました。解析結果を図 2 に示します。図 2(a) スミスチャート、図 2(b) 通過特性から、設計したとおりにカットオフ周波数 1GHz の LPF になっていることが確認できます。ただし、図 1 の素子値は計算で得られた値のままとなっているため、中途半端な値になっています。そのため、入手可能な素子値の範囲で調整が必要となります。

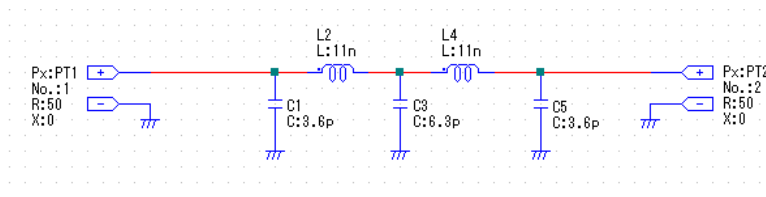


Fig.1

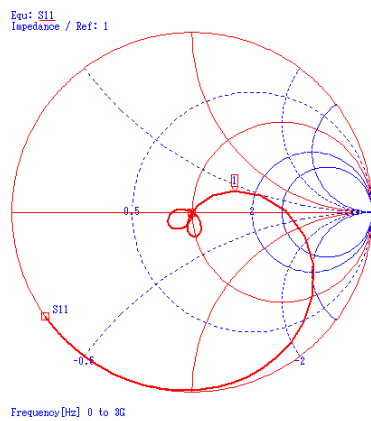


Fig.2 (a)

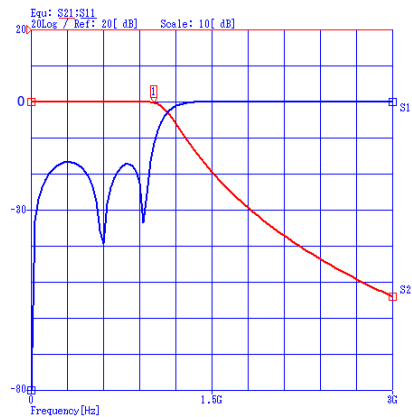


Fig.2 (b)

次に、図 1 で設計したチェビシェフ・フィルタを伝送線路フィルタのひとつである Stepped-Impedance LPF に置き換えて解析を行います。

図 3 に Stepped-Impedance LPF の回路構成を示します。図 3(a) に示す集中定数フィルタのインダクタとコンデンサは、図 3(b) のようにインピーダンスが Z_L と Z_H の伝送線路に置き換えることが可能です。各伝送線路の電気長の値は次式で計算できます。

$$\text{インダクタ} : \beta l = \frac{LZ_o}{Z_H} \dots (1)$$

$$\text{コンデンサ} : \beta l = \frac{CZ_L}{Z_o} \dots (2)$$

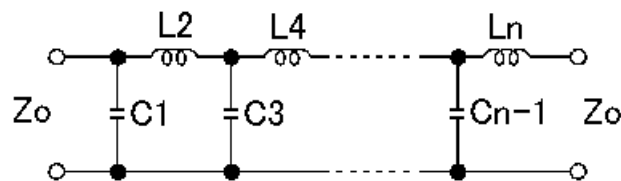


Fig.3 (a)

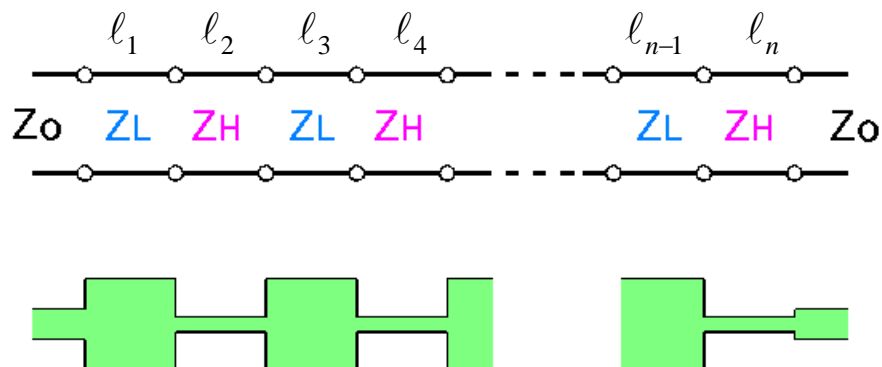
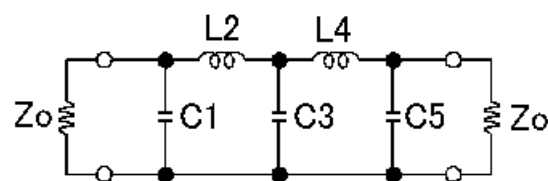


Fig.3 (b)

式中の L と C の値は、図 4 に示す LPF プロトタイプ の値を 用い ます。また、マイクロストリップ線路で製作した場合、実現可能な線路のインピーダンスは $Z_{max}=120\Omega$ 、 $Z_{min}=20\Omega$ 程度となります。そこで、 $Z_H=120\Omega$ 、 $Z_L=20\Omega$ として計算します。



$$\begin{aligned} g_1 &= 1.1468 = C1 \\ g_2 &= 1.3712 = L2 \\ g_3 &= 1.9750 = C3 \\ g_4 &= 1.3712 = L4 \\ g_5 &= 1.1468 = C5 \end{aligned}$$

Fig.4

$$\beta l_1 = \beta l_5 = \frac{C_1 Z_L}{Z_o} = \frac{1.1468 \times 20}{50} = 0.45872[\text{rad}] = 26.28^\circ \quad (C1, C5) \dots (3)$$

$$\beta l_2 = \beta l_4 = \frac{L_2 Z_o}{Z_H} = \frac{1.3712 \times 50}{120} = 0.5713[\text{rad}] = 32.74^\circ \quad (L2, L5) \dots (4)$$

$$\beta l_3 = \frac{C_3 Z_L}{Z_o} = \frac{1.9750 \times 20}{50} = 0.79[\text{rad}] = 45.26^\circ \quad (C3) \dots (5)$$

式(3)(4)(5)で得られた値をもとに、高周波回路シミュレータの電気長線路（位相角）を用いて製作した Stepped-Impedance LPF の回路構成を図 5 に示します。解析結果を図 6 に示します。解析結果から、図 2 に示しました集中定数で設計した LPF の特性とほぼ同じ結果が得られていることがわかります。

図 6(b)通過特性 (S21) の 3GHz 付近を見ると、少し持ち上がっているのが確認できます。そこで、もう少し高い周波数まで解析を行いました。その解析結果を図 6 (c) に示します。伝送線路でフィルタを製作した場合、このように特性の繰り返しが起きることが特徴です。

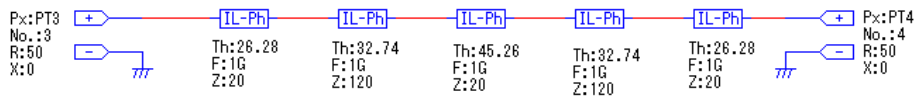


Fig.5

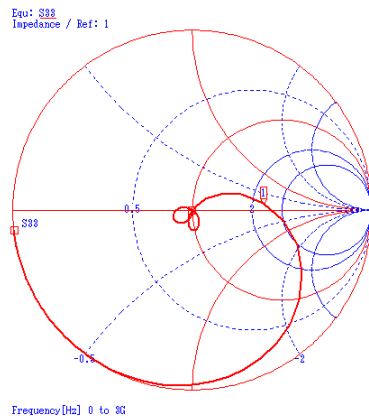


Fig.6 (a)

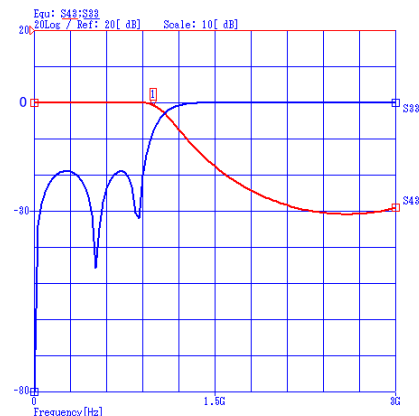


Fig.6 (b)

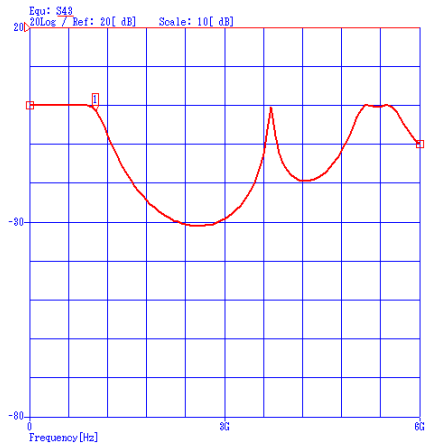


Fig.6 (c)

●電磁界シミュレータによる解析

マイクロストリップ線路で構成したLPFを図7に示します。誘電体は、比誘電率3.25、厚さ $787\mu\text{m}$ 、 $\tan\delta$ 0.0025と設定しました。マイクロストリップ線路の幅(W)と長さ(L)は、C1、C5が $W=6.5\text{mm}$ 、 $L=13\text{mm}$ 、L2、L4が $W=0.25\text{mm}$ 、 $L=18\text{mm}$ 、C3が $W=6.5\text{mm}$ 、 $L=22.5\text{mm}$ となります。図8に解析結果を示します。図8(a)スミスチャート、図8(b)通過特性から、高周波回路シミュレータで電機長線路(位相角)によって設計したLPFと同様の結果が得られていることがわかります。

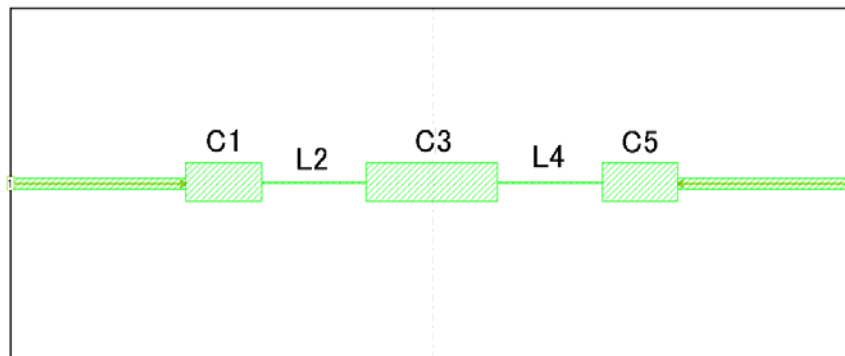


Fig.7

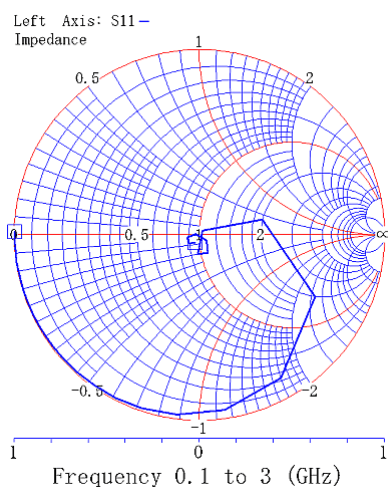


Fig.8 (a)

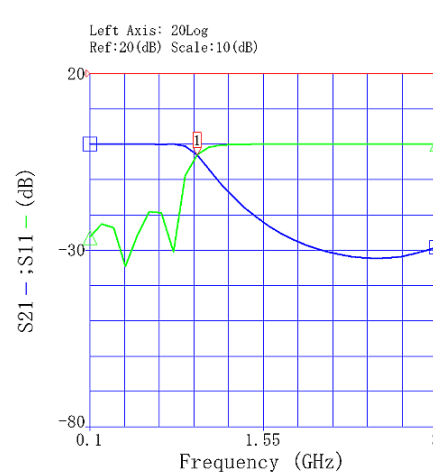


Fig.8(b)

●試作評価

高周波回路シミュレータと電磁界シミュレータの両方で特性の確認ができたので、写真 1 のように実際の基板でカットオフ周波数 1GHz の Stepped-Impedance LPF を試作しました。誘電体は、比誘電率 3.25、厚さ $787\mu\text{m}$ 、 $\tan\delta$ 0.0025 のテフロン基板を用いました。測定結果を図 9 に示します。測定結果から、シミュレーションで予測した特性とほぼ同じ通過特性が得られていることが確認できました。

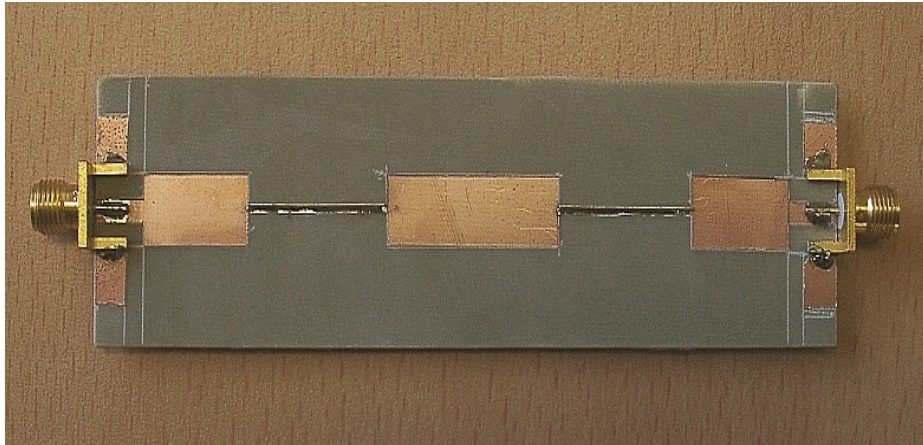


photo.1

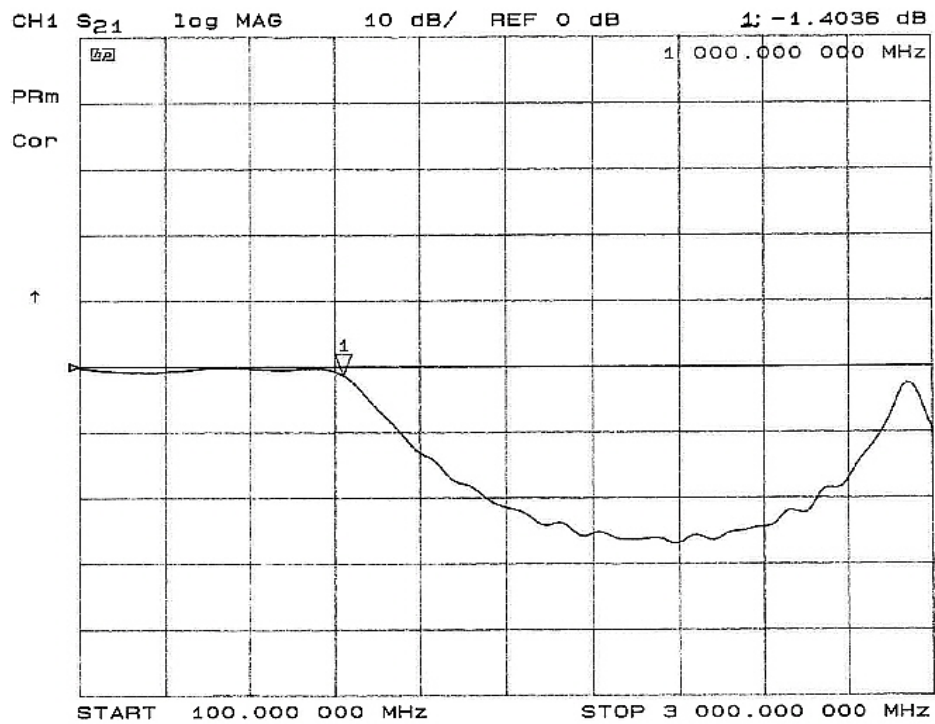


Fig.9