

APMC2006 基礎講座

初学者のためのフィルタ設計入門

- 基礎知識と設計の要点 -

2006年 12月 13日

早稲田大学客員教授 上野 伴希(工学博士)

本日のスライドPDF版

<http://www.hi-ho.ne.jp/uwano/download/filter.pdf>

1. フィルタの設計とは

2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

3. 周波数変換とBPF(バンドパスフィルタ)

4. インピーダンスインバータとは

5. BPFの設計

1. フィルタの設計とは

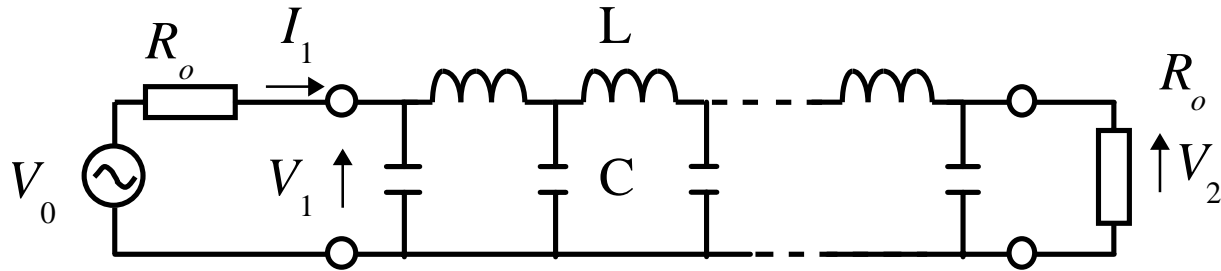
1. フィルタの回路解析

2. フィルタの回路合成

3. フィルタの設計

1. フィルタの設計とは

フィルタの回路解析



典型的LPF回路

形ラダー回路

伝達特性

$$T(\omega) = \frac{V_2}{V_0}$$

入力インピーダンス特性

$$Z(\omega) = \frac{V_1}{I_1}$$

どのように計算？

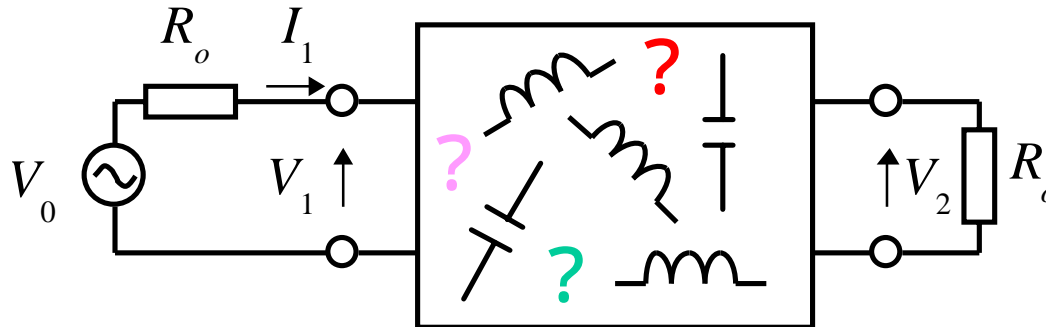
1. フィルタの設計とは

フィルタの回路合成

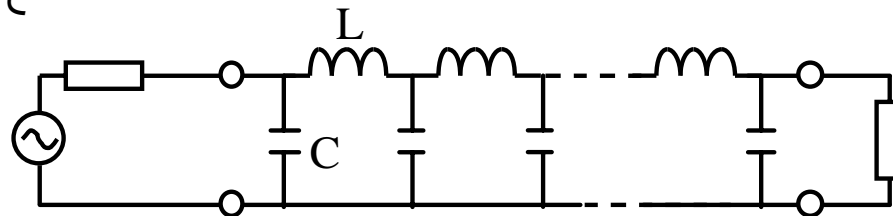
伝達特性 $T(\omega) = \frac{V_2}{V_0}$

<= この特性を与える

特性を達成する回路は？



例として



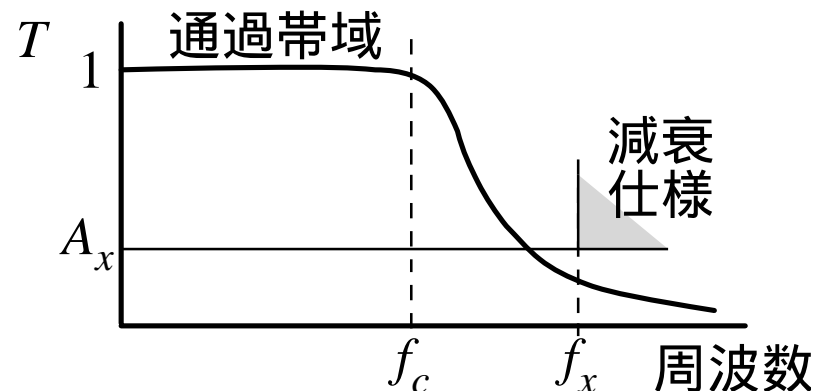
ラダー回路で可能？

1. フィルタの設計とは

フィルタの設計

すでに周波数レスポンスの形が(ある程度)分かった回路を用意

$$\text{伝達特性 } T(\omega) = \frac{V_2}{V_0} (\times 2) \text{ が計算されている}$$



カットオフ周波数 f_c を与える

ある周波数 f_x での減衰仕様 A_x を与える

特性を満足するLCの数と値を求める <= これが設計の作業

2 . LPF(ローパスフィルタ)の設計

1 . 動作関数フィルタ(プロトタイプ)

2 . 誘導_m形フィルタ(イメージパラメータ)

2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

2種類のLPF

1. 定K形フィルタ

設計が簡単, 試行錯誤で優れた特性

解析的に回路合成が不可能

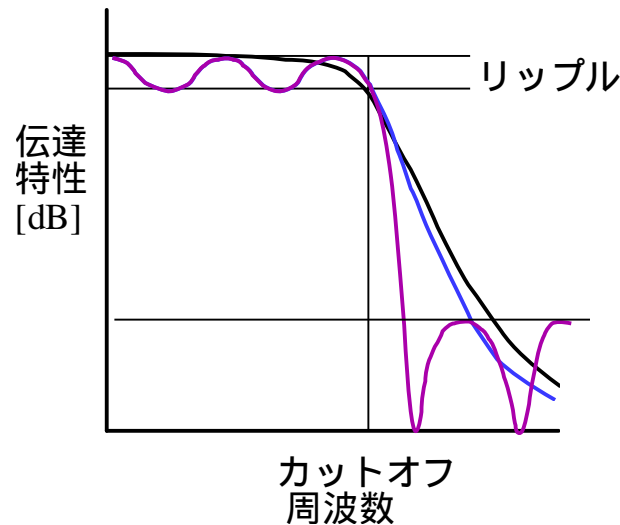
2. 動作関数形フィルタ

バターワース(最平坦)特性

チェビシェフ特性

解析的に回路合成可能

チェビシェフ - チェビシェフ特性(有極フィルタ)



“LPF理論はフィルタ設計の基礎”

2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

動作関数形LPF 動作関数の実際

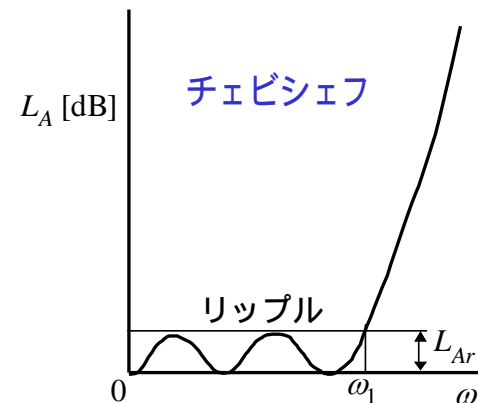
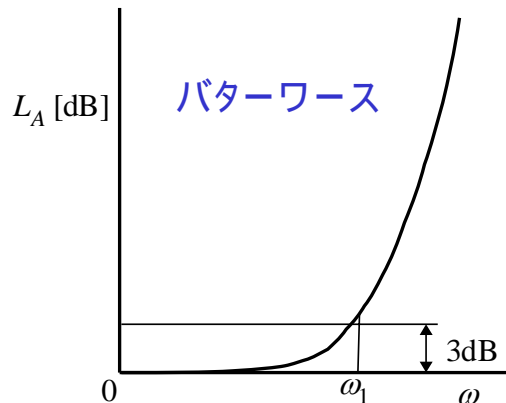
バターワース $L_A = 10 \log(1 + \varepsilon \omega'^{2n})$

チェビシェフ $L_A = 10 \log(1 + \varepsilon \cos^2[n \cos^{-1}(\omega')]) \quad \omega' \leq 1$

$$L_A = 10 \log(1 + \varepsilon \cosh^2[n \cosh^{-1}(\omega')]) \quad \omega' \geq 1$$

$$\varepsilon = 10^{\frac{L_{Ar}}{10}} - 1 \quad \text{リップル } L_A[\text{dB}] \quad \text{フィルタ段数 } n$$

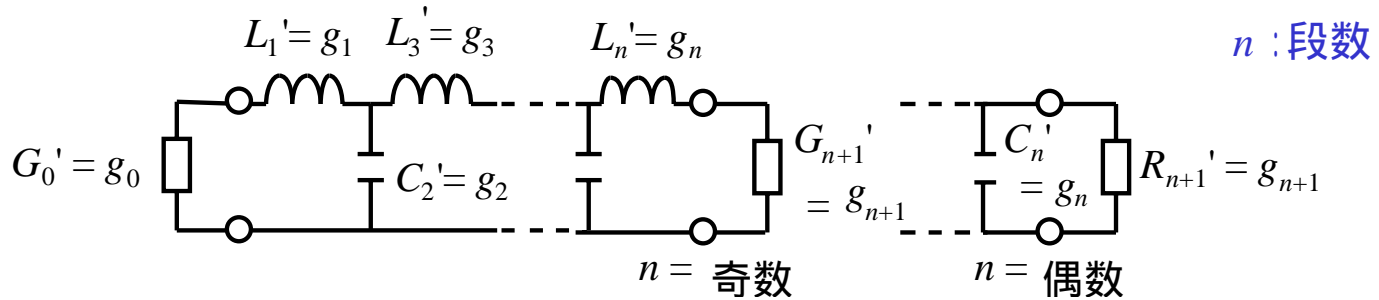
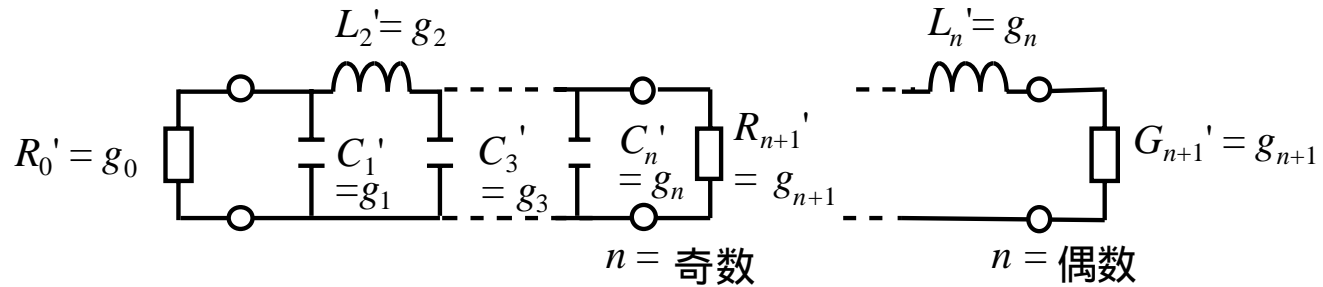
(角)周波数 カットオフ(角)周波数 ω_1



$$\omega' = \frac{\omega}{\omega_1}$$

2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

動作関数形LPFの回路

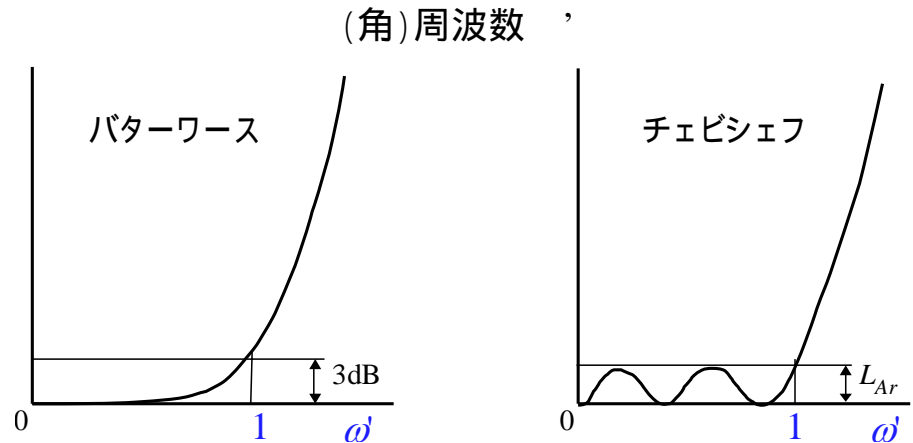


ところでプロトタイプLPFとは？

(動作関数フィルタ)

カットオフ角周波数 1 rad/s

負荷抵抗 1



2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

プロトタイプLPF (動作関数フィルタ) カットオフ角周波数 1 rad/s 負荷抵抗 1

その素子値 g_k は?

チェビシェフ

$$g_0 = 1 \quad g_{n+1} = \begin{cases} 1, & n: \text{odd} \\ \coth^2(\beta/4), & n: \text{even} \end{cases}$$

$$g_1 = 2a_1/\gamma$$

$$g_k = \frac{4a_{k-1}a_k}{b_{k-1}g_{k-1}}, \quad k = 2, 3, \dots, n$$

ただし

$$\beta = \ln[\coth(L_{Ar}/17.37)] \quad \gamma = \sinh(\beta/(2n))$$

$$a_k = \sin\left[\frac{(2k-1)\pi}{2n}\right] \quad b_k = \gamma^2 + \sin^2\left(\frac{k\pi}{n}\right)$$

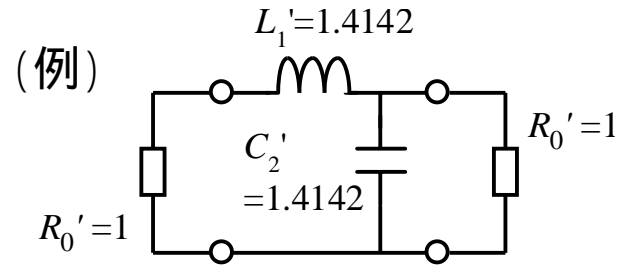
プロトタイプLPFの素子値を, gパラメータとよぶ

プロトタイプのLC素子, 角周波数 は, しばしばプライム(')をつけて示される

2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

スケーリング プロトタイプLPFから実周波数, 実負荷抵抗への変更

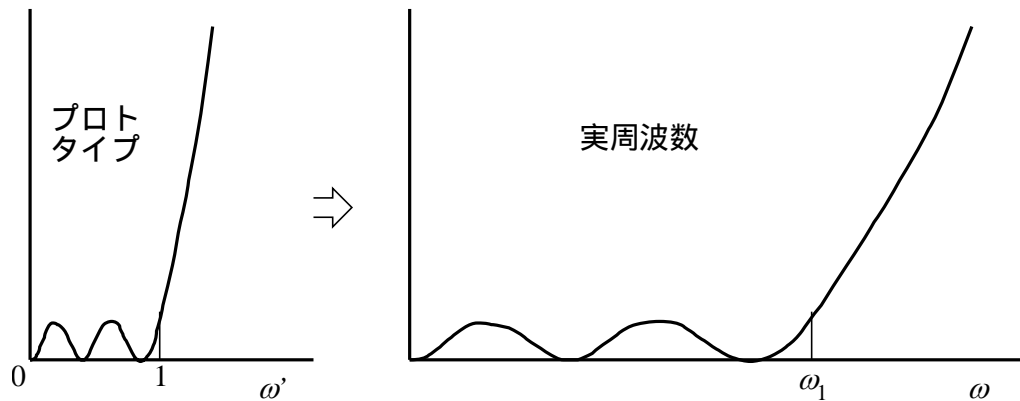
負荷抵抗: R_0



実周波数:

$$\frac{\omega'}{\omega_1'} = \frac{\omega}{\omega_1}$$

$$\omega_1' = 1$$

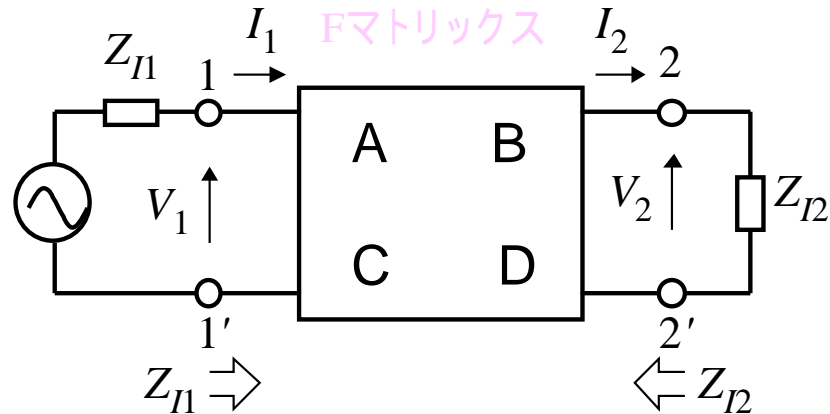


素子値のスケーリング

$$L = \left(\frac{R_0}{R_0'} \right) \left(\frac{\omega_1'}{\omega_1} \right) L' \quad C = \left(\frac{R_0'}{R_0} \right) \left(\frac{\omega_1'}{\omega_1} \right) C' \quad \begin{array}{l} \omega_1' = 1 \\ R_0' = 1 \end{array}$$

2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

イメージ法 誘導m形フィルタ



イメージインピーダンス負荷

端子1-1', 2-2'で入出力インピーダンスが上の条件となる時

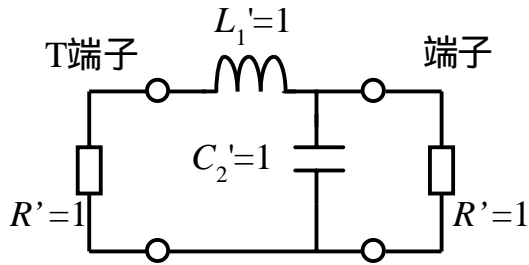
$$Z_{I1} = \sqrt{\frac{AB}{CD}} \quad Z_{I2} = \sqrt{\frac{DB}{CA}} \quad \frac{V_1 I_1}{V_2 I_2} = e^{2\gamma} \quad \gamma = \ln(\sqrt{AD} + \sqrt{BC})$$

$\gamma (= \alpha + j\beta)$: イメージ伝達定数

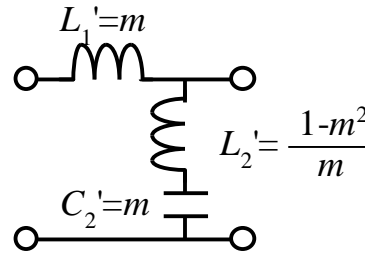
Z_{I1}, Z_{I2} : イメージインピーダンス

2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

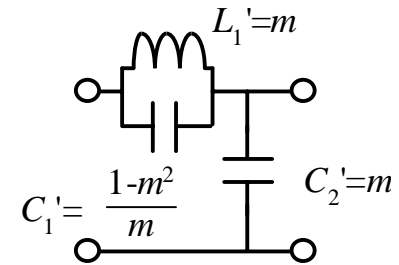
定K形LPF基本L-セクション回路(プロトタイプ)



定K



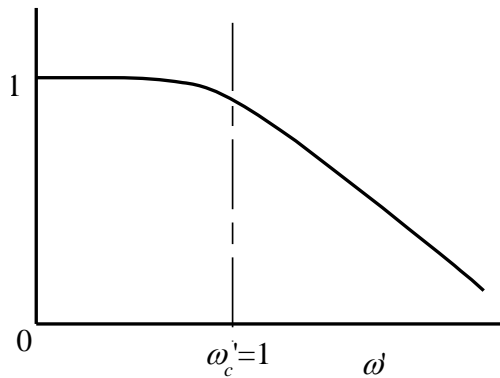
誘導m1



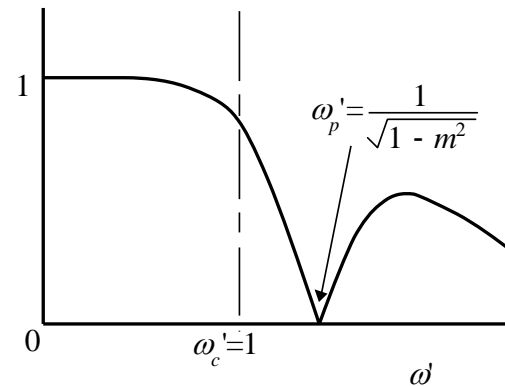
誘導m2

$m \sim 0.6$

L-セクションの特性



定K



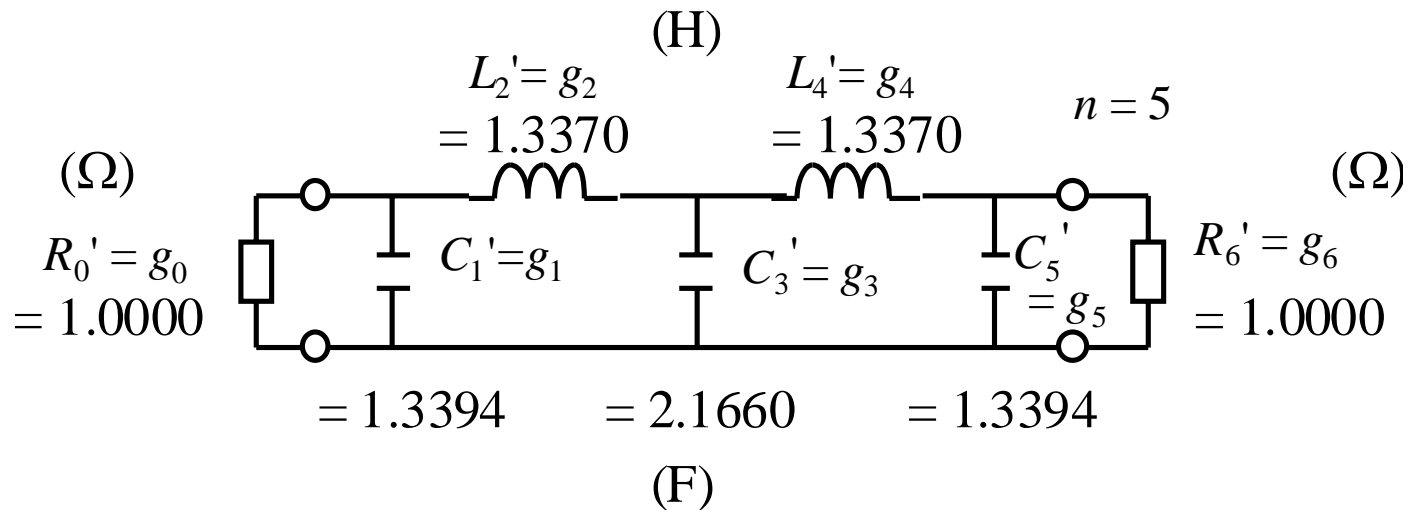
誘導m1,2

2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

動作関数LPF設計例(文献1)

チェビシェフ(入力) $n = 5$
 $f_c = 300\text{MHz}$ $L_{Ar} = 0.2\text{dB}$ $R_0 = 50$

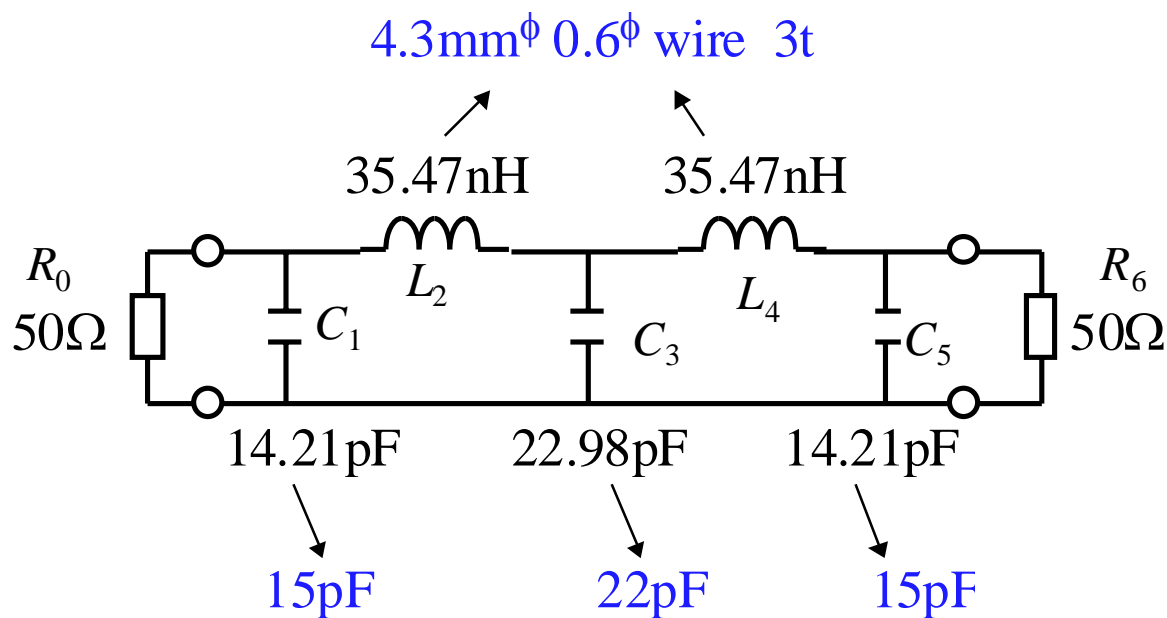
1. gパラメータの算出(=プロトタイプLPFの設計)



2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

2. 周波数と負荷抵抗のスケージング

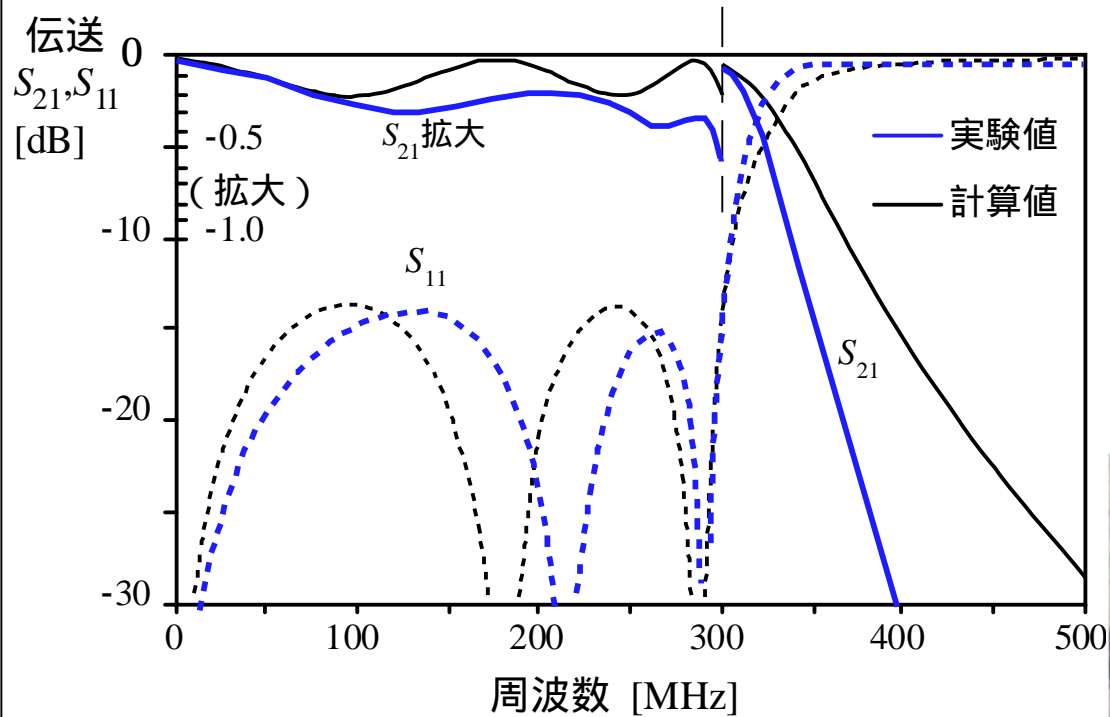
$$L = \frac{R_0}{\omega_1} L' \quad C = \frac{C'}{R_0 \omega_1}$$



(cktd3シミュレーション)

2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

3. 組み立て調整



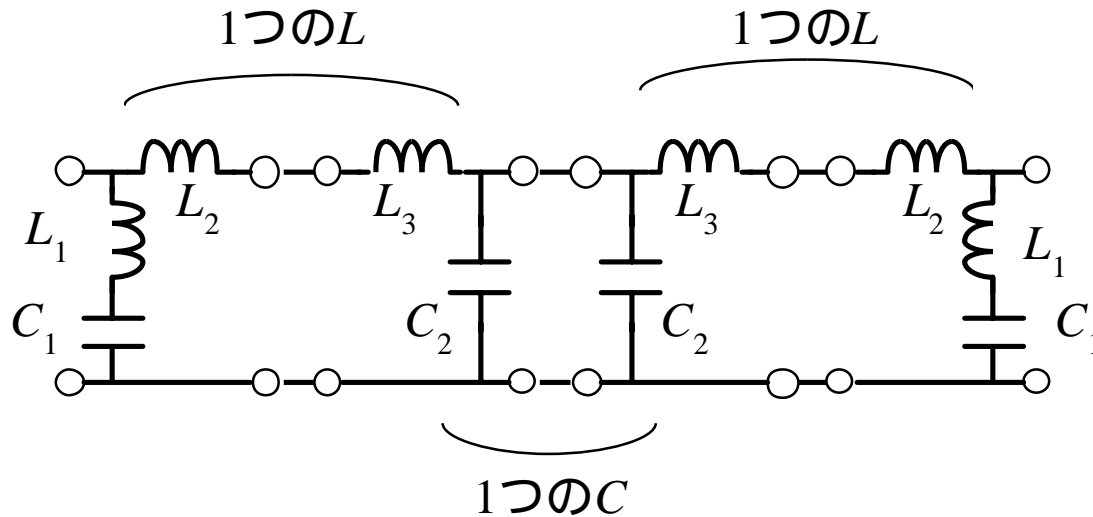
2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

誘導m形LPFの設計例(文献1)

L-セクション数 = 4

$f_c = 70\text{MHz}$ **トラップ周波数 = 97MHz** $R_0 = 50$

1. L-セクションを組み合わせる



2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

2. 素子値を計算する(スケーリングを含む)

トラップ位置

$$m = \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_p}\right)^2}$$

定K形

$$L_3 = \frac{R_0}{2\pi f_c}$$

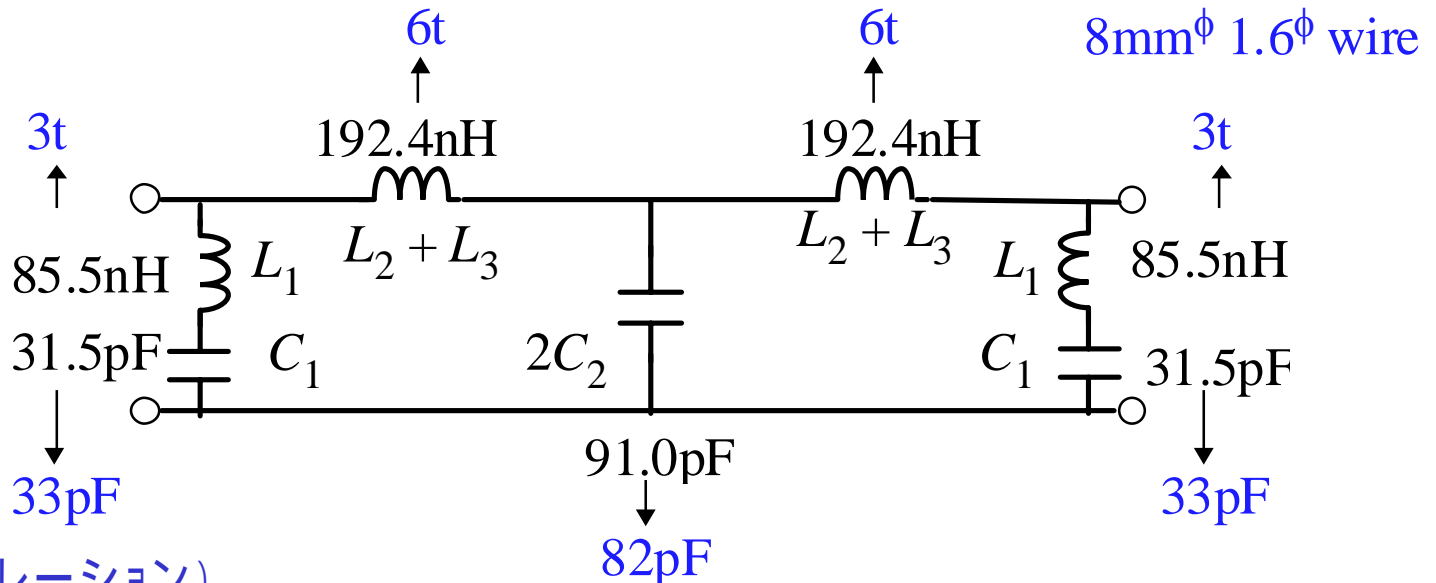
$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_c R_0}$$

誘導m1形

$$L_2 = \frac{R_0}{2\pi f_c} m$$

$$L_1 = \frac{R_0}{2\pi f_c} \frac{1-m^2}{m}$$

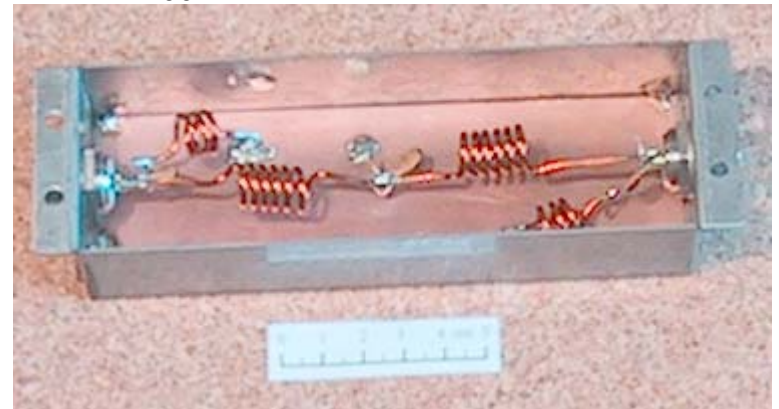
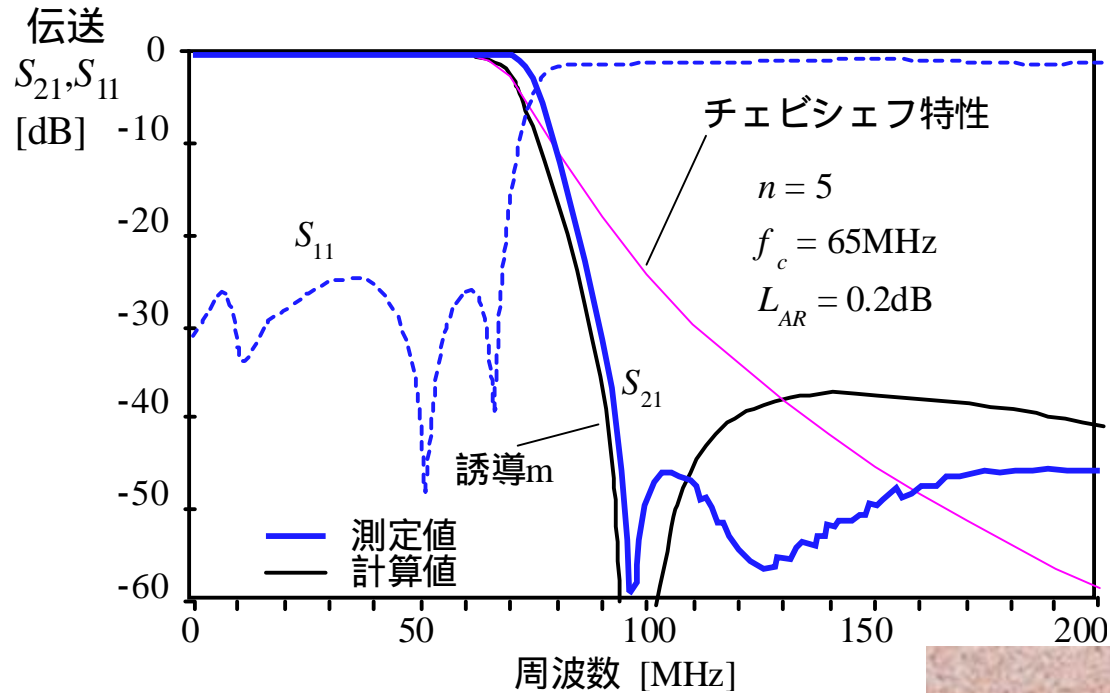
$$C_1 = \frac{m}{2\pi f_c R_0}$$



(cktd3シミュレーション)

2. LPF(ローパスフィルタ)の設計

3. 組み立て調整



3. 周波数変換とBPF(バンドパスフィルタ)

周波数変換(マッピング)とは

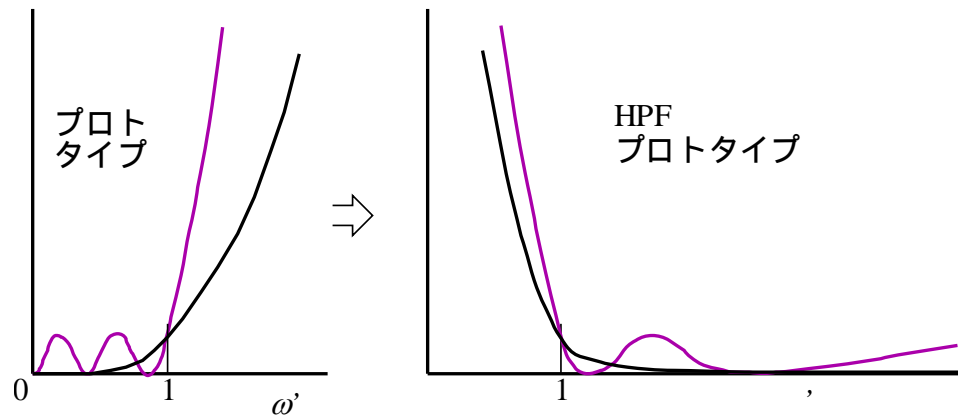
数学的处理によるLPF HPFの変換

周波数変換式 $\frac{\omega'}{\omega_1'} = -\frac{\Omega_1'}{\Omega'}$

ここで Ω' は新しい角周波数
($\omega_1' = \Omega_1' = 1$)

$$L_A = 10\log(1 + \omega'^{2n})$$

$$L_A = 10\log(1 + (\frac{1}{\Omega'})^{2n})$$



3. 周波数変換とBPF(バンドパスフィルタ)

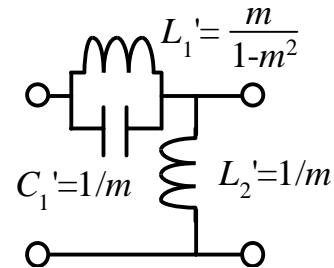
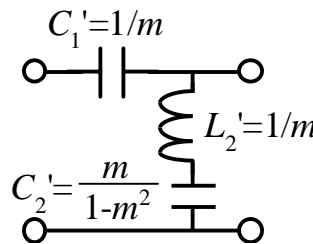
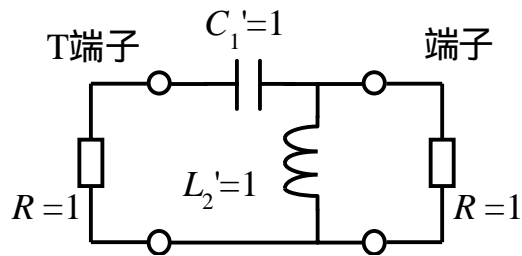
LPF HPFの周波数変換

周波数変換式 $\frac{\omega'}{\omega_1'} = -\frac{\Omega_1'}{\Omega'}$

LCの素子変換

$$j\omega' L' = -j \frac{1}{\Omega'} L' = \frac{1}{j\Omega' (1/L')}$$

$$j\omega' C' = -j \frac{1}{\Omega'} C' = \frac{1}{j\Omega' (1/C')}$$



定K形LPF 定K形HPF

$$\Omega_p' = \sqrt{1-m^2}$$

3. 周波数変換とBPF(バンドパスフィルタ)

LPF BPFの周波数変換

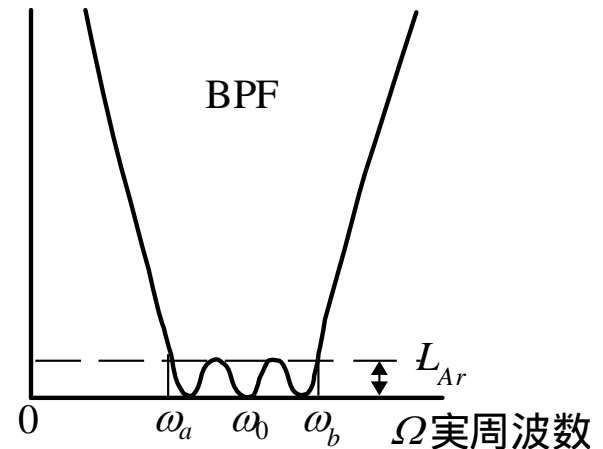
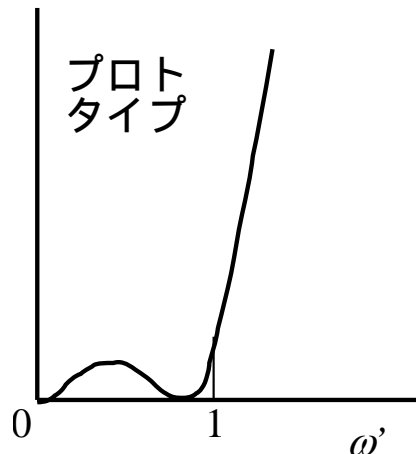
周波数変換式

$$\omega' = \frac{\omega_1'}{w} \left(\frac{\Omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\Omega} \right)$$

$$w = \frac{\omega_b - \omega_a}{\omega_0} \quad \omega_0 = \sqrt{\omega_b \omega_a} \quad \omega_1' = 1$$

$$L_A = 10 \log(1 + \varepsilon \cos^2[n \cos^{-1}(\omega')]) \quad \omega' \leq 1$$

$$L_A = 10 \log(1 + \varepsilon \cosh^2[n \cosh^{-1}(\omega')]) \quad \omega' > 1$$



3. 周波数変換とBPF(バンドパスフィルタ)

LPF BPFの周波数変換

周波数変換式
$$\omega' = \frac{\omega_1'}{w} \left(\frac{\Omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\Omega} \right)$$

LCの素子変換

$$j\omega' L' = j\omega L_s' + \frac{1}{j\omega C_s'}$$
$$L_s' = \frac{\omega_1'}{\omega_b - \omega_a} L' \quad C_s' = \frac{1}{\omega_a \omega_b L_s'} \quad L_s' C_s' = \frac{1}{\omega_0^2}$$
$$j\omega' C' = j\omega C_p' + \frac{1}{j\omega L_p'}$$
$$C_p' = \frac{\omega_1'}{\omega_b - \omega_a} C' \quad L_p' = \frac{1}{\omega_a \omega_b C_p'} \quad L_p' C_p' = \frac{1}{\omega_0^2}$$

3. 周波数変換とBPF(バンドパスフィルタ)

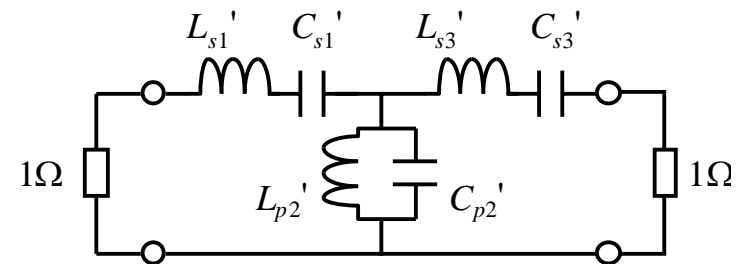
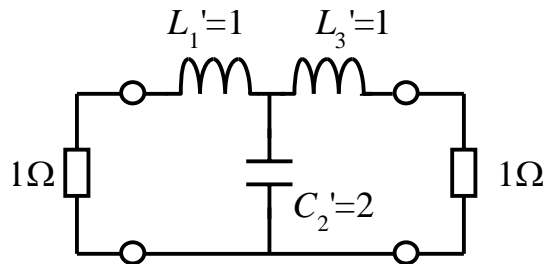
LPF BPF回路

素子変換

$$j\omega' L' = j\omega L_s' + \frac{1}{j\omega C_s'}$$

$$j\omega' C' = j\omega C_p' + \frac{1}{j\omega L_p'}$$

回路変換

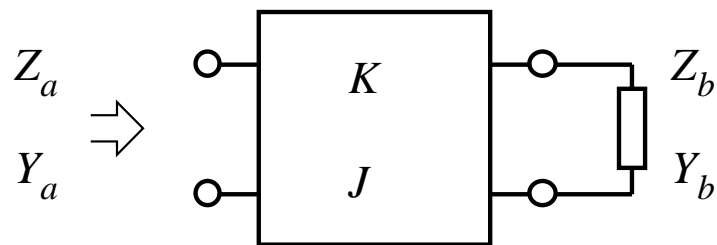


負荷抵抗スケールング

$$L_{s,p} = \frac{R_0}{R_0'} L_{s,p}' \quad C_{s,p} = \frac{R_0'}{R_0} C_{s,p}' \quad R_0' = 1$$

4. インピーダンスインバータとは

インピーダンスインバータ動作



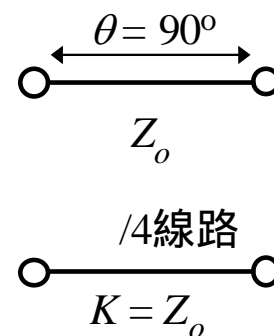
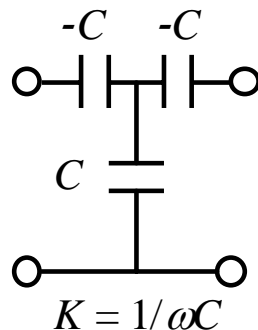
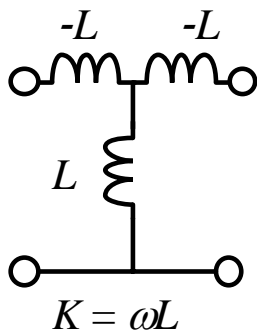
$$Z_a = \frac{K^2}{Z_b}$$

$$Y_a = \frac{J^2}{Y_b}$$

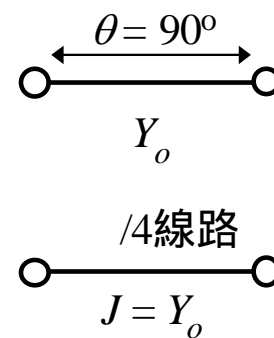
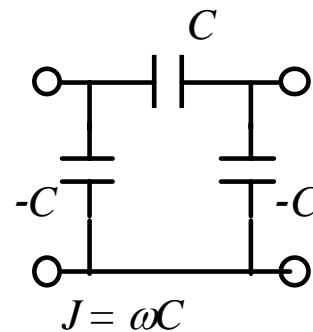
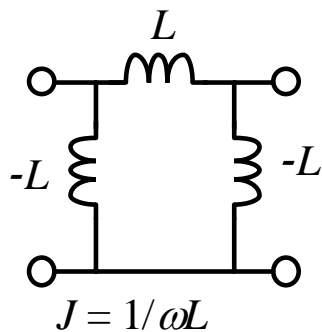
4. インピーダンスインバータとは

インバータ回路

インピーダンスインバータ(K-インバータ)回路の例



アドミタンスインバータ(J-インバータ)回路の例



4. インピーダンスインバータとは

なぜインバータ？

BPFは直列共振回路と並列共振回路が必要

マイクロ波では2種類を用意するのは容易でない
(同じ共振器は用意可能)

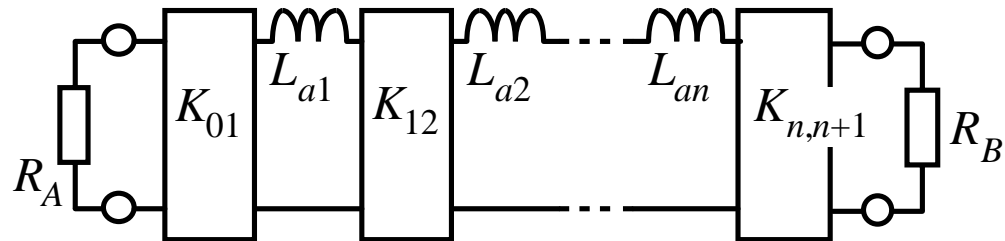
インバータは(直列回路 \longleftrightarrow 並列回路)の変換ができる

1種類の共振器とインバータでBPFが設計できる

4. インピーダンスインバータとは

コイルのインバータ変換

LPFをLだけでつくる



このときインバータ K は

$$K_{01} = \sqrt{\frac{R_A L_{a1}}{g_0 g_1}} \qquad K_{n,n+1} = \sqrt{\frac{R_B L_{an}}{g_n g_{n+1}}}$$

$$K_{k,k+1} \mid_{k=1 \text{ to } n-1} = \sqrt{\frac{L_{ak} L_{a(k+1)}}{g_k g_{k+1}}}$$

L_{ak} および R は任意に選ぶことができる！

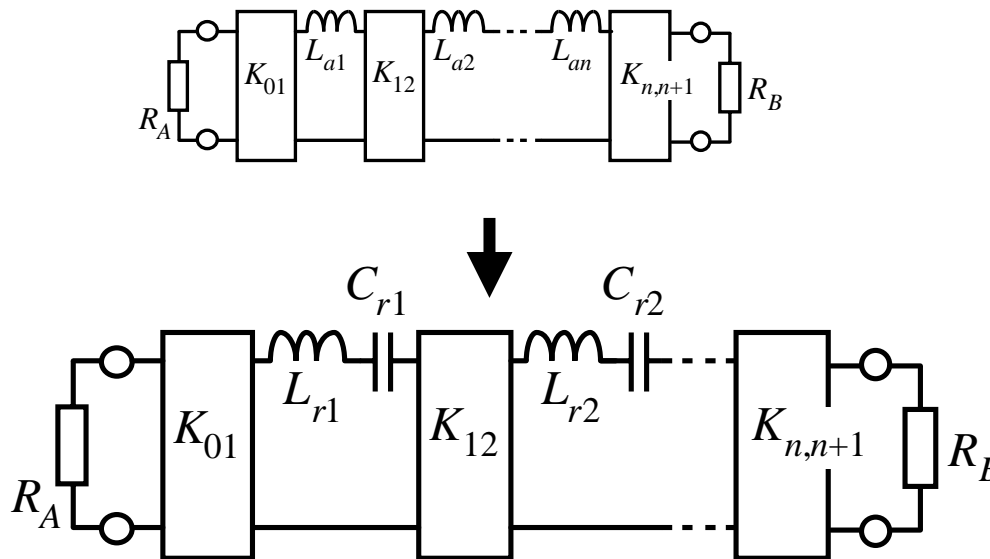
5 . BPFの設計

インバータ変換コイルLPFで周波数マッピング

周波数変換式

$$\omega' = \frac{\omega_1'}{w} \left(\frac{\Omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\Omega} \right)$$

LだけのLPFで周波数マッピング



このとき X_j の代わりに x_{sj} を導入する

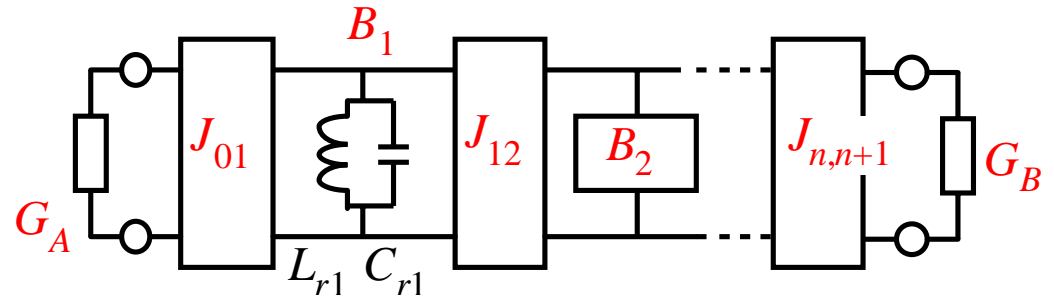
$$X_j = \omega L_{rj} - \frac{1}{\omega C_{rj}} \rightarrow x_{sj} = \frac{\omega_0}{2} \frac{dX_j}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_0} \left(= \omega_0 L_{rj} = \frac{1}{\omega_0 C_{rj}} \right) \quad L_{aj} = \frac{x_{sj} w}{\omega_1'}$$

5 . BPFの設計

並列共振のDual (双対) 回路

直列共振器 並列共振器

K-インバータ J-インバータ



B_j の代わりに b_{sj} を導入する

$$B_j = \omega C_{rj} - \frac{1}{\omega L_{rj}} \rightarrow b_{sj} = \frac{\omega_0}{2} \frac{dB_j}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_0} \left(= \omega_0 C_{rj} = \frac{1}{\omega_0 L_{rj}} \right)$$

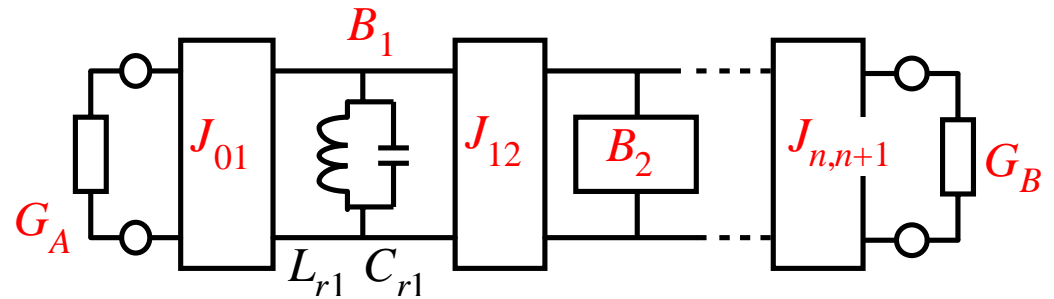
J-インバータの設計式は

$$J_{01} = \sqrt{\frac{G_A b_{s1} W}{g_0 g_1 \omega_1'}} \quad J_{n,n+1} = \sqrt{\frac{G_B b_{sn} W}{g_n g_{n+1} \omega_1'}}$$

$$J_{k,k+1} \Big|_{k=1 \text{ to } n-1} = \frac{W}{\omega_1'} \sqrt{\frac{b_{sk} b_{s(k+1)}}{g_k g_{k+1}}}$$

5 . BPFの設計

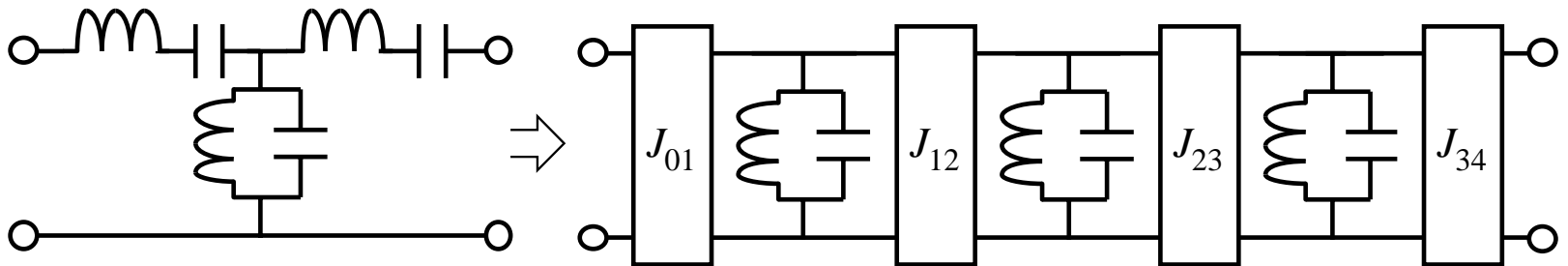
C結合BPF回路1



Jの設計公式は示された

集中常数BPFで定性的理解

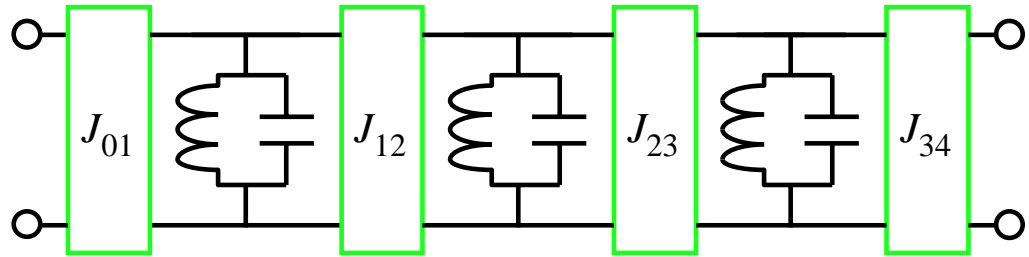
J-インバータにより直列共振器を並列共振器に変換



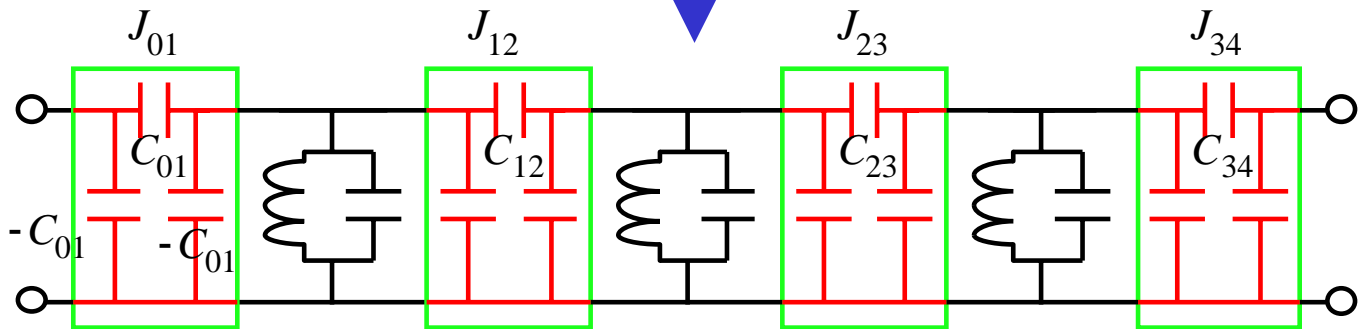
5 . BPFの設計

C結合BPF回路2

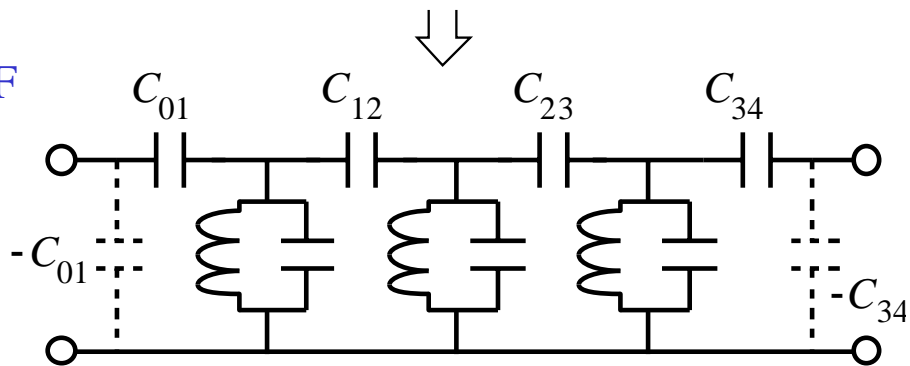
実際の回路構成



形Cのインバータ



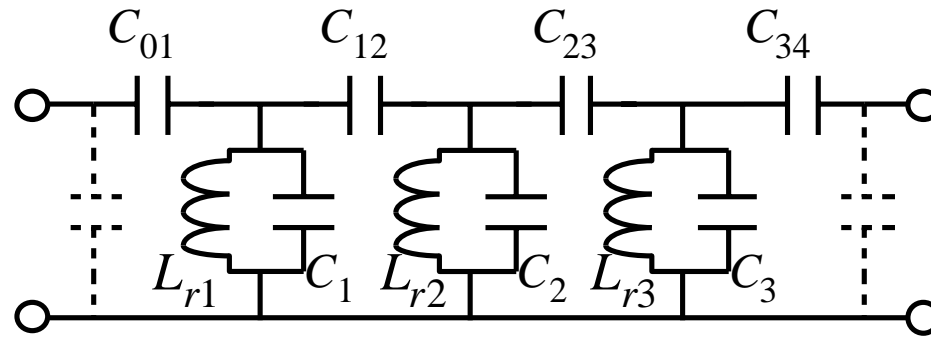
C結合BPF



5 . BPFの設計

C結合BPF回路3

各素子は設計式（代数式）から求められる



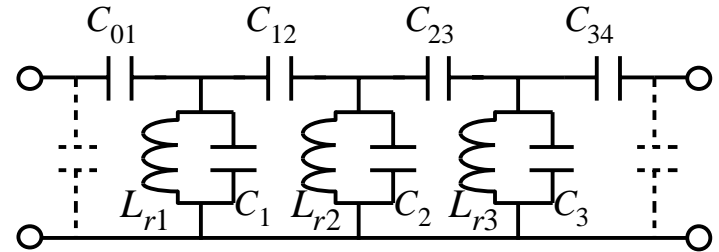
$$J_{01} = \sqrt{\frac{G_A \omega_0 C_{r1} W}{g_0 g_1 \omega_1'}} \quad J_{k,k+1} \big|_{k=1 \text{ to } n-1} = \frac{W \omega_0}{\omega_1'} \sqrt{\frac{C_{rk} C_{r(k+1)}}{g_k g_{k+1}}} \quad J_{n,n+1} = \sqrt{\frac{G_B \omega_0 C_{rn} W}{g_n g_{n+1} \omega_1'}} \quad L_{rk} C_{rk} = \frac{1}{\omega_0^2}$$

(b_{sj} に代わり C_{rk} が変数)

$$C_{k,k+1} = \frac{J_{k,k+1}}{\omega_0} \quad C_k = C_{rk} - C_{k-1,k} - C_{k,k+1}$$

5 . BPFの設計

C結合BPF回路4



設計例

通過帯域49.5-52.5MHz ($f_0 = 51\text{MHz}$, $w = 5.882\%$)

チェビシェフ $n = 3$, $L_{Ar} = 0.2\text{dB}$

設計手順

$L_r = 0.3 \mu\text{H}$ (任意, リアクタンス約100 が目安)

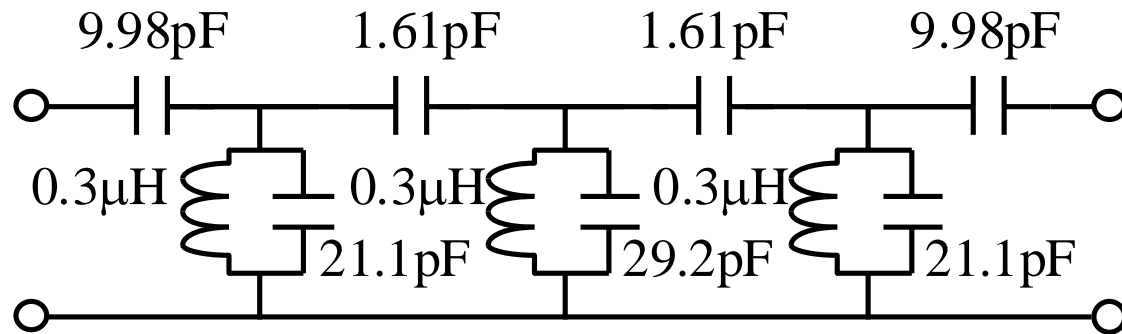
これより $C_r = 32.46\text{pF}$

後はインハウスプログラムbpf0を使って素子値を求める

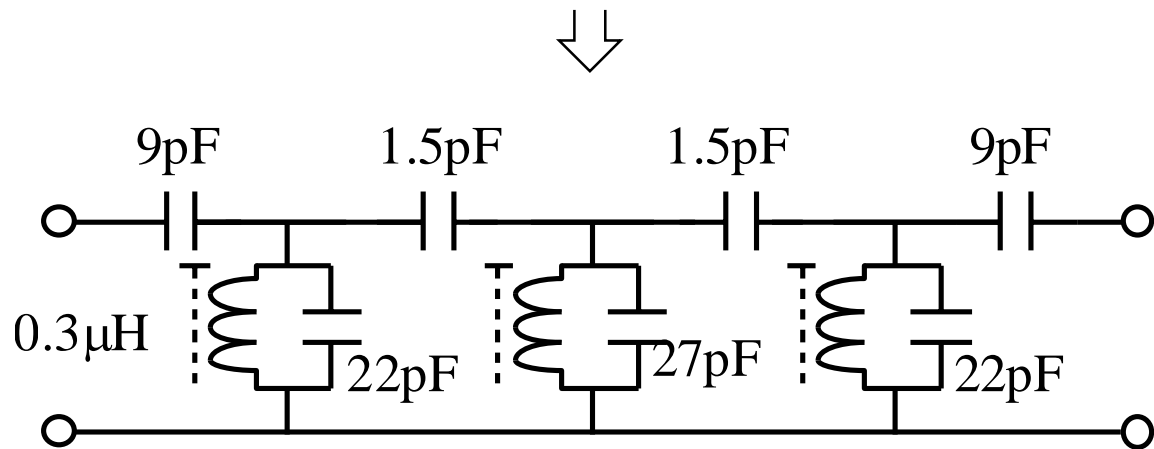
5 . BPFの設計

C結合BPF回路5

設計結果



試作回路



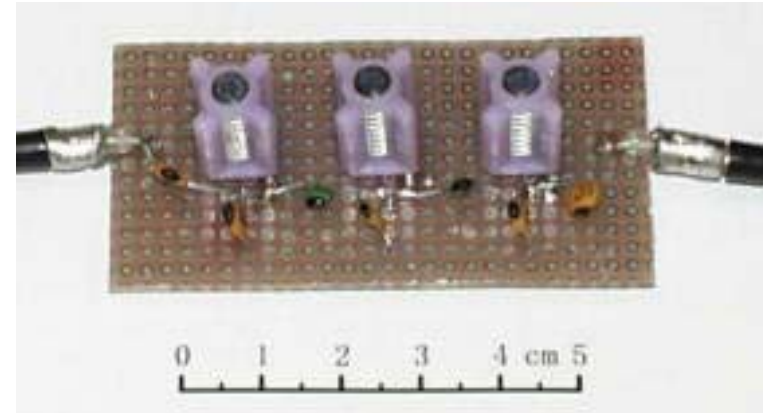
汎用部品の回路

(cktd3シミュレーション)

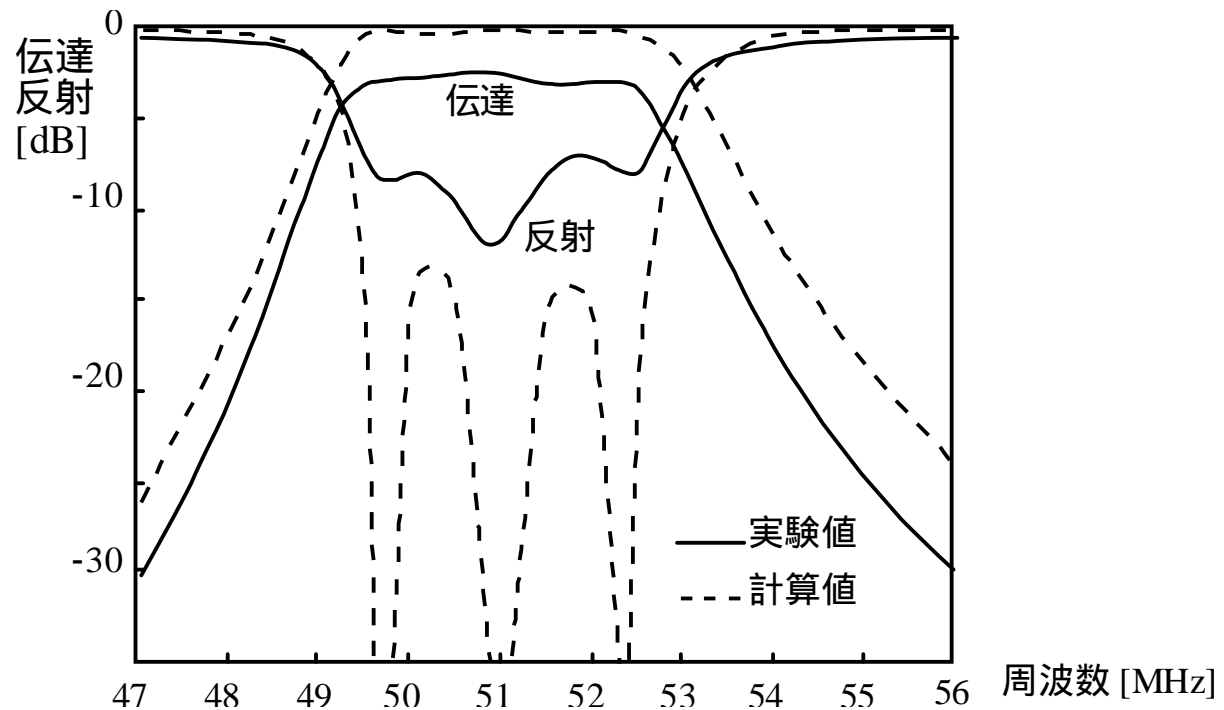
5 . BPFの設計

C結合BPFの特性

BPFの外観



特性



試作で学ぶ高周波フィルタの設計法

¥ 3 , 1 5 0 , 総合電子出版社 , 2 0 0 2 年

2 0 0 6 年末出版社廃業

著者斡旋

¥ 2 , 7 0 0 送料込み

Eメールにて注文 , 銀行 , 郵便局より振り込み

<http://www.hi-ho.ne.jp/uwano/book1.htm>

