18 BPF, BEF, APF の設計

馬場 清太郎
Seitaro Baba

はじめに

今回は，バンド・パス・フィルタ(BPF)とバンド・エリミネート・フィルタ(BEF)，そしてオール・パス・フィルタ(APF)の設計法を紹介しましょう．

これらは，LPFやHPFに比べると，特殊で専門的なので，使用する機会は多くないかもしれませんが，ノイズを除去したいときなどにとても有効です．BPFは，取り出したい信号の周波数が一定であれば，ノイズを除去したいときに効果的です．BEFは，商用電源からの誘導ノイズ(ハムと呼ぶ)など，周波数が一定のノイズを除去したいときにとても有効なフィルタです．

フィルタ回路の最後に取り上げるのは，A-D変換回路の入力部に使うアンチエイリアシング・フィルタ用に最適な*LC*シミュレーション・フィルタです．

バンド・パス・フィルタの設計

定数算出の基本手順

正規化LPFの伝達関数を求めて変数変換

BPFの伝達関数を求める場合も，前回説明した正規化LPF(NLPF)の正規化テーブルから，希望の周波数特性タイプの正規化LPF伝達関数を求めます．

図18-1に示すように，$s \rightarrow (s^2+\omega_0{}^2)Q_{BP}/(\omega_0 s)$というふうに変数変換を施せば，必要なBPF特性の伝達関数が求まります．次に，後述の各種のBPF回路から希望のものを選択して，定数を決定します．

高次のBPFは，変数変換による計算がとても面倒なので，正規化BPFのテーブル[(1)]を利用して定数設計するのがよいでしょう．

n次のLPFの伝達関数からは，$2n$次のBPFの伝達関数が求まります．この伝達関数は偶数次です．

多重帰還型…シンプルでf_0調整が容易

回路定数と特性の変化

図18-2に示すのは，多重帰還型BPFです．定数は，利得$G_0=-1$，$Q=5$，$f_0=10\,\mathrm{kHz}$のときの値です．

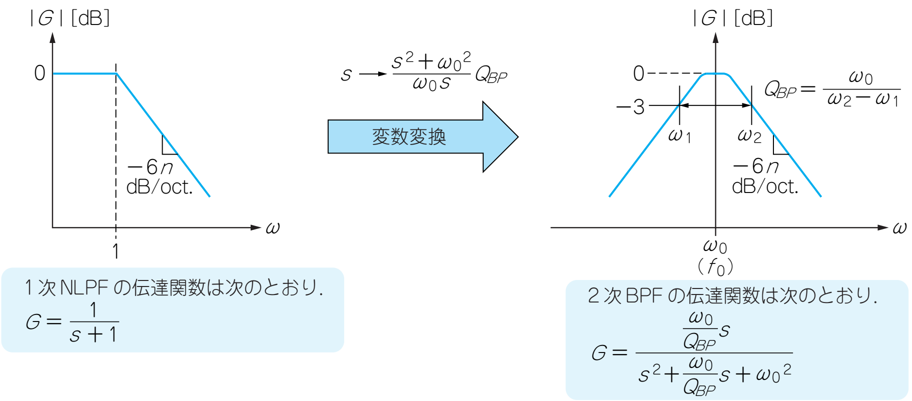
多重帰還型は，Qが10以下ならば安定に動作します．

抵抗R_2を微調整すると，QとG_0にほとんど影響を与えずに，中心周波数f_0を調整できます．抵抗R_2を取り去ると，利得G_0はQ^2になり，設計の自由度が少なくなります．

f_Tの大きなOPアンプを使ってf_0ばらつきを小さくする

OPアンプのオープン・ループ・利得が1になる周

〈図18-1〉正規化LPFからHPFへの変換



(a) n次の正規化LPF　(b) $2n$次の正規化BPF

波数 f_T が利得の周波数特性に与える影響を調べてみましょう．

図18－3 に示すのは，f_T がそれぞれ1 MHz，3.2 MHz，10 MHzのときの利得周波数特性です．f_T が3.2 MHz以下では，f_0 = 10 kHz程度でも誤差が大きいことがわかります．

誤差が大きい理由は，**図18－2** の抵抗 R_2 を取り去ってループ利得を概算するとわかります．

直流利得 G_0 は式(18‐4)から $Q^2 = 25$ です．このときのノイズ利得は26倍になり，利得帯域幅積は26 × 10 kHz = 260 kHzになります．ループ利得は，f_T = 1 MHzのOPアンプの場合3.8倍(11.7 dB)，f_T = 3.2 MHzの場合12.3倍 (21.8 dB)と算出されます．ループ利得がとても小さく，これでは誤差が大きくても当然です．

仕上がり利得は見かけ上，R_2 で分圧されて－1ですが，内部ではノイズ利得が $Q^2 + 1$ であることを忘れないでください．多重帰還型BPFは，OPアンプに広帯域なものが必要なのです．

DABP型… f_T の影響が小さく $Q = 100$ でも安定動作

回路の説明

図18－4 に示すのはDABP(Dual‐Amplifier Band Pass)型と呼ぶBPFです．2段増幅器型とも言います．通過帯域の利得 G_0 は2(6 dB)固定ですが，Q が100以下ならば，安定に動作します．定数は，利得 $G_0 = 2$，$Q = 50$，f_0 = 10 kHzのときの値です．

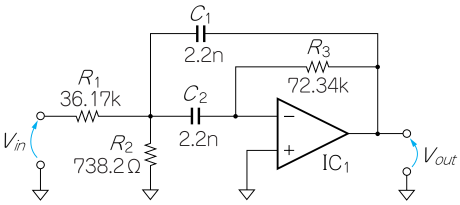
利得 G_0 を2倍以下にするには，多重帰還型BPFと同様に R_1 を分圧します．

この回路はOPアンプが2個必要ですが，NJM4580などの2個入りOPアンプを使用すれば簡単に構成できます．Q が100以上まで安定に動作するBPFには，バイカッド回路，状態変数(ステート・バリアブル)回路などもありますが，誌面の都合でDABP型BPFだけ紹介します．ほかの回路については文献(1)をご覧ください．

OPアンプの f_T に影響されにくい

図18－4 の回路の利得周波数特性を調べてみました．**図18－5** に示すのは，f_T が1になる周波数が，1 MHz，3.2 MHz，10 MHzのOPアンプでシミュレーションした利得周波数特性です．$Q = 5$ の多重帰還型BPFに比べて，Q をその10倍の50にしても，中心周波数 f_0 の誤差が小さいことがわかります．

〈図18－2〉多重帰還型BPFの回路と伝達関数



定数は f_0＝10kHz，Q＝5のときの値

$$G = -G_0 \frac{\frac{\omega_0}{Q}s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (18\text{-}1)$$

ω_0，G_0 (>0)，Q を与えると，$\omega_0 = 2\pi f_0$ から，

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{R_1 + R_2}{C_1 C_2 R_1 R_2 R_3}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (18\text{-}2)$$

$C_1 = C_2 = C$ とすると，

$$R_3 = \frac{Q}{\pi f_0 C}$$

$$R_1 = \frac{R_3}{2G_0}$$

$$R_2 = \frac{R_3}{2(2Q^2 - G_0)}$$

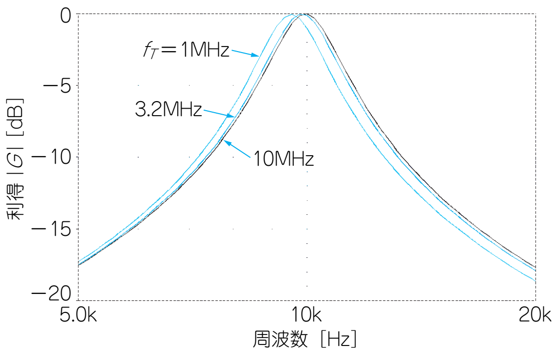
なお，$R_2 \to \infty$ (オープン)とすると，

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C}\sqrt{\frac{1}{R_1 R_3}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (18\text{-}3)$$

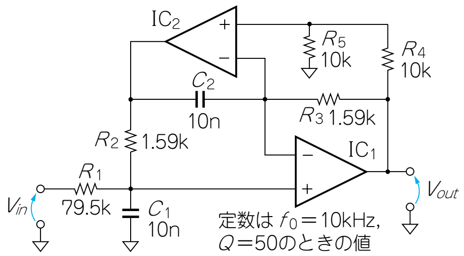
$$G_0 = 2Q^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (18\text{-}4)$$

R_1 と R_3 は上記と同じである．

〈図18－3〉多重帰還型BPFの利得周波数特性(シミュレーション)



〈図18－4〉DABP型BPFの回路と伝達関数



$C_1 = C_2 = C$，$R_2 = R_3 = R$，$R_4 = R_5$ とすると，

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = G_0 \frac{\frac{\omega_0}{Q}s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

ただし，

$$\omega_0 = \frac{1}{CR}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi CR} \cdots\cdots (18\text{-}5)$$

$$Q = \frac{R_1}{R} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (18\text{-}6)$$

$$G_0 = 2 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (18\text{-}7)$$