

ローパスフィルタ (LPF) 回路の設計・製作-平成21年度名古屋大学技術職員研修 (計測・制御コース) を受講して

○堀川信一郎^{A)}、川上申之介^{A)}、瀬川朋紀^{A)}、山本優佳^{A)}、福森勉^{B)}

^{A)} 教育・研究技術支援室 計測・制御技術系

^{B)} 工学系技術支援室 装置開発技術系

概要

平成21年度名古屋大学技術職員研修(計測制御コース)が平成21年8月26日から28日に行われた。本研修の目的は、「計測・技術に必要な演算増幅回路の学習およびプリント基板加工機を使った電子回路基板製作法の習得」であった。我々はこの研修に参加し、演算増幅器(オペアンプ)とその典型的な利用例であるアナログフィルタ回路について学習し、プリント基板加工機を使用したローパスフィルタ(LPFP)の製作実習を行った。ここでは、バターワース型、チェビシェフ型、ベッセル型と呼ばれる特性の異なる3種のLPFPの設計・製作、動作検証について報告する。

なお、この研修におけるLPFP回路の設計は、「アナログ回路応用マニュアル(島田公明、日本放送出版協会)」[1]に基づいている。

1 LPFP回路

LPFPとは、遮断周波数 f_c よりも低い周波数は通し、高い周波数成分は通さないフィルタ回路である。減衰傾斜が6dB/octとなる(LPFPの場合、周波数が2倍になると利得が半分に減衰する)フィルタが基本で、これを一次のフィルタという。本研修ではオペアンプを利用した(増幅率=1)2次(12dB/oct)のLPFPの設計・製作をした。

オペアンプ、抵抗 R_1 、 R_2 およびコンデンサ C_1 、 C_2 からなる基本回路を図1(a)に示す。実際の回路中には図1(b)に示したように、電源を安定させるためのバイパスコンデンサ $C_{3,4}$ ($0.22\mu\text{F}$)やオペアンプのオフセット調整用抵抗 R_3 ($1.5\text{ k}\Omega$)および可変抵抗 VR ($100\text{ k}\Omega$)が加わる。

このLPFP回路の周波数特性は角周波数 ω に対して以下に示す伝達関数 $A(j\omega)$ で表現される。

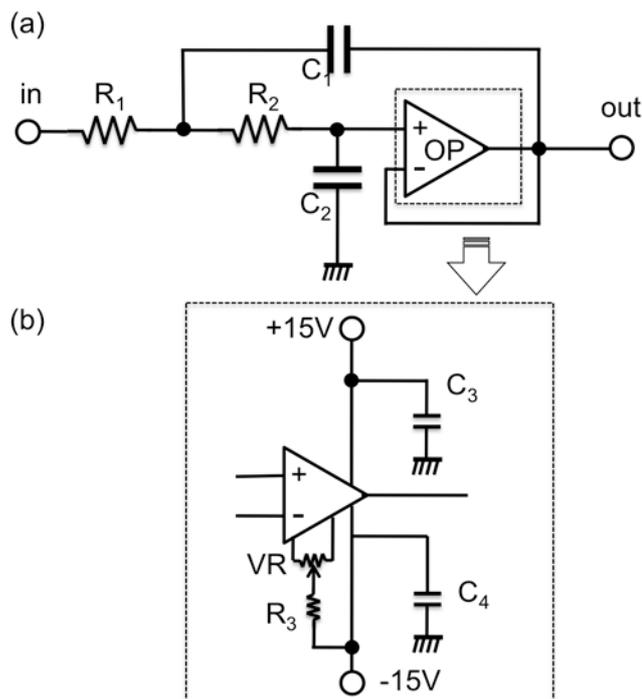


図1. LPFP回路図. (a)LPFP基本回路: オペアンプOP、抵抗 R_1 、 R_2 、コンデンサ C_1 、 C_2 が基本となる. (b)付属的回路: 電源を安定させるためのバイパスコンデンサ C_3 、 C_4 や、オペアンプのオフセット調整用 R_3 、 VR からなる.

$$A(j\omega) = \frac{1}{(j\omega/\omega_c)^2 + 2a(j\omega/\omega_c) + 1} \quad (1-1)$$

ここで ω_c は f_c に対応する角周波数、 a はフィルタの利得特性、位相特性を決めるパラメーターであり、次式で表される。

$$\omega_c = 2\pi h f_c = \frac{1}{\sqrt{C_1 R_1 C_2 R_2}} \quad (1-2)$$

$$2a = C_2 (R_1 + R_2) \omega_c$$

h は伝達関数を各フィルタ型に対する遮断周波数の定義 (3.1 に記述) に合わせるための係数である。

角周波数 ω の正弦波に対する利得と位相角は、この伝達関数の絶対値および偏角で表され、以下のようになる。

$$\text{利得(dB)} \quad G(\omega) = 20 \log_{10} |A(j\omega)|, \quad |A(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(\omega/\omega_c)^4 + 2(2a^2 - 1)(\omega/\omega_c)^2 + 1}} \quad (2)$$

$$\text{位相角(degree)} \quad \arg A(j\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{-2a(\omega/\omega_c)}{1 - (\omega/\omega_c)^2} \right) \quad (3)$$

主なフィルタ型としては、バターワース型、チェビシェフ型、ベッセル型の3種のフィルタがよく知られている。各フィルタの特徴については表1にまとめた。

表1. 主なフィルタ型とその特徴

フィルタ型	特徴
バターワース型 (Butterworth)	最大平坦型とも呼ばれる。通過帯域の利得特性が平坦で入力に対して素直な出力が得られる。
チェビシェフ型 (Chebyshev)	通過帯域にリップル(波状の利得特性の変化)が出るが、遮断帯域ですばやく設計された減衰傾斜に近づく、減衰特性重視のフィルタ。
ベッセル型 (Bessel)	通過帯域における利得特性の平坦性はバターワース型に劣るが、遅延時間が一定となる位相特性を持つため波形伝送ひずみを受けない。パルス信号のフィルタリングに適している。

2 設計

本研修では、バターワース型、チェビシェフ型(リップル幅 2dB、1dB、0.5dB)、ベッセル型の合計5つのLPFの設計と製作を行った。

目的のLPF回路に使用する抵抗 R_1 、 R_2 、コンデンサ C_1 、 C_2 の組み合わせは無数に存在するが、抵抗の標準値はコンデンサに比べてピッチが細かいため、手持ちのコンデンサから適当な物を選定した方が設計しや

すい。さらに、 $R_1=R_2=R$ とすれば、(1-2) 式は簡単になり $a = \sqrt{C_2/C_1}$ を得る。コンデンサの比率を変えるだけで目的にあった特性を持つフィルタを作成できることがわかる。また抵抗 R は、 $R = 1/2\pi h f_c \sqrt{C_1 C_2}$ より求まる。従ってフィルタの設計は、1) 選んだフィルタ型から使用する C_1 と C_2 を決定し、2) 遮断周波数（今回は 1.00 kHz）に対して、抵抗 R を決定すればよい。

各フィルタ回路の設計に使用した a 、 h と選定したコンデンサ C_1 、 C_2 、抵抗 R 及び実際の回路に対して計算された遮断周波数 f_c^* と a^* を表 2 にまとめた。使用する抵抗やコンデンサは計算から得られる値に近いものを選ぶため、実際の LPF 回路の周波数特性を表す f_c^* と a^* は設計値とは正確には一致していないが、その差は数%未満となっている。今回使用した抵抗（金属皮膜抵抗）とコンデンサ（フィルムコンデンサ）の誤差がそれぞれ 1%、2-5%であることを考量すれば全く問題にならない。

オペアンプには FET（電界効果トランジスタ）入力の汎用オペアンプである TL081 を使用している。

プリント基板加工機を使用した基板作成法については本研修会報告集、福森の報告を参照して頂きたい [2]。

表 2. フィルタ設計表. 各フィルタ設計 ($f_c=1.00$ kHz) に使用した a 、 h と、選定した抵抗 R 、コンデンサ C_1 、 C_2 、及び実際の回路に対して計算された遮断周波数 f_c^* と a^*

LPF 型		a	h	C_1 (pF)	C_2 (pF)	R (k Ω)	f_c^* (kHz)	a^*
バターワース(Butterworth)型		0.707	1	10000	5000	22	1.02	0.707
チェビシェフ(Chebyshev)型	0.5dB	0.579	1.233	3000	1000	74	1.01	0.577
	1dB	0.523	1.05	1000	270	288	1.01	0.520
	2dB	0.443	0.907	5000	1000	78	1.01	0.447
ベッセル(Bessel)型		0.866	1.272	1000	750	144	1.00	0.866

3 検証実験

作成した各フィルタの周波数-利得特性・位相特性、入出力のリニアリティについて検証実験と比較を行った。実験の前にオフセット調整が必要である。LPF の入力端子を短絡することで入力電圧を 0V とし、100 k Ω の VR を変化させ、出力電圧が 0V となるように調整した。

3.1 周波数-利得特性の測定

入力電圧を 1 Vpp で一定とし、入力周波数を 10Hz から 10 kHz まで変化させ出力電圧を測定し利得を求めた。測定値と設計回路について計算した利得特性を図 2 に示す。

チェビシェフ型はおおよそ設計通りのリップル幅がでており、リップル幅に対応して、より低い周波数で最終的な減衰傾斜(12dB/oct)に近づいていることが確認できる。ベッセル型はバターワース型に

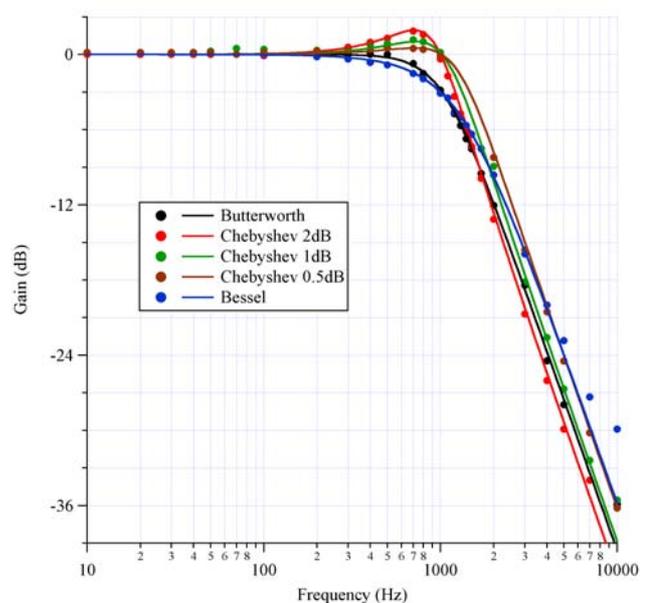


図 2. 周波数-利得特性. 各色●が測定値、実線が計算値を示す。

比べて低い周波数から平坦性を失い、緩やかに最終的な減衰傾斜に近づく。

バタワース型とベッセル型の遮断周波数は利得が-3dBとなる周波数、チェビシェフ型は減衰帯域に入る(<0dB)周波数と定義されている。遮断周波数についても測定値は計算値によく一致しており、各フィルタともに設計通りの周波数特性が出ている。

3.2 周波数-位相特性の測定

入力電圧を1 Vppで一定とし、入力周波数を10 Hzから10 kHzまで変化させたときの位相角を測定した。測定値と計算値を図3に示す。各フィルタともに計算値にほぼ一致する結果が得られている。

位相特性の違いは、矩形波にのった高周波ノイズの除去処理をオシロスコープで実際に観察すると分かりやすい。300 Hzの矩形波にノイズとして2 MHzの正弦波を重ねた入力信号を各フィルタに処理させ、そ

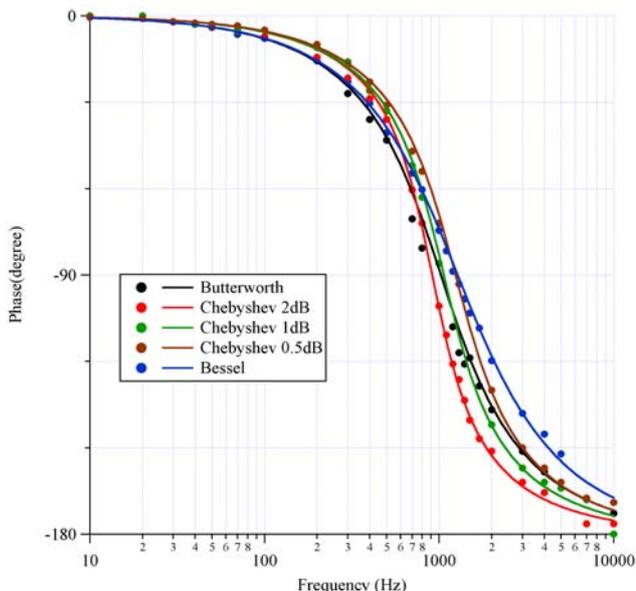


図3. 周波数-位相特性. 各色●が測定値、実線が計算値を示す。

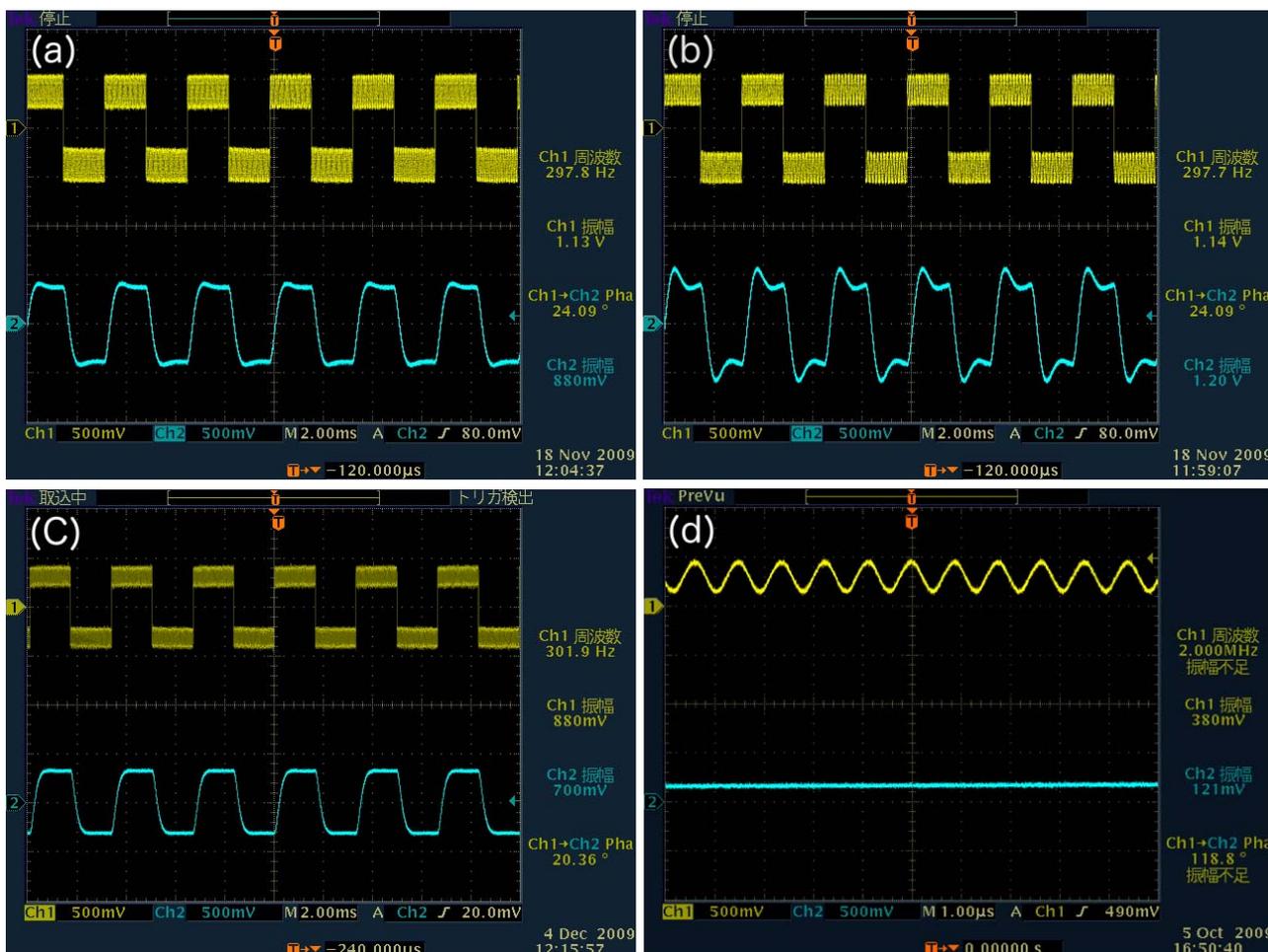


図4. 各フィルタの矩形波処理. 高周波ノイズ(2MHz 正弦波)を含む300Hzの矩形波(黄色)を入力した際の出力波形(水色). (a)バタワース型 LPF、(b)チェビシェフ型(2dB)、(c)ベッセル型、(d)チェビシェフ型、時間(横)軸の拡大. 高周波分は十分に除去されている。

の出力を比較する。図4はバターワース型、チェビシェフ型(2dB)、ベッセル型LPFの入出力波形である。図4(d)に例示したように、どのフィルタも2MHzのノイズ分はよく遮断しているが、バターワース型(a)では出力の矩形波にひずみが出ているのに対して、ベッセル型(c)の出力波形のひずみは小さい。チェビシェフ型(b)ではさらに波形のひずみが大きくなる。ベッセル型がパルス信号の処理に適していることが良くわかる。

3.3 入出力のリニアリティ(直線性)の測定

入出力電圧のリニアリティは通常オペアンプの電源電圧付近まで保たれるはずである。これを確認するための以下の実験を行った。各LPFの遮断周波数は1kHzなので、設計上、入力周波数が約500Hz以下であれば出力信号はほぼ無損失となる。そこで、周波数300Hz、入力電圧0-30Vppの正弦波を各LPFへ入力し、その出力電圧を測定した。例としてチェビシェフ型(1dB)の結果を図5に示す。実線は25Vまでのデータから得た回帰直線である。入力電圧が25V付近までは測定値と非常に良く一致し、入力・出力電圧との間のリニアリティは保たれている事が確認できる。入力電圧が25Vを過ぎるとリニアリティは失われ、30V付近で出力電圧が飽和する。しかし一般にフィルタを利用する際、その入力電圧は10V以下であることから多くの場合、実用上問題になることはない。

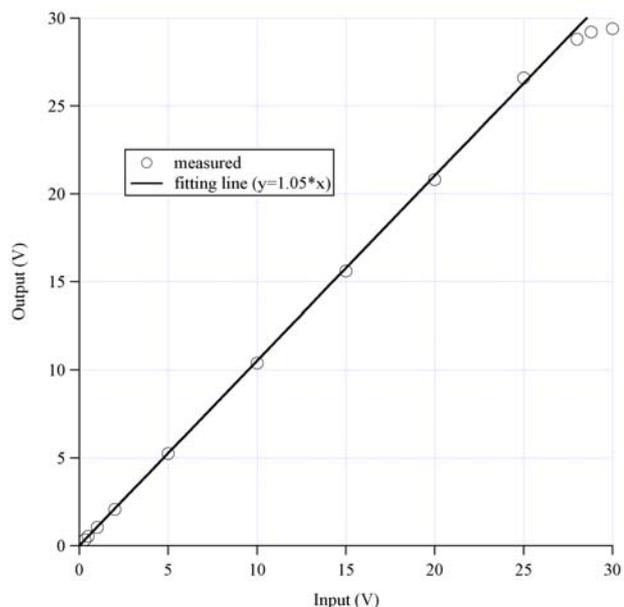


図5. チェビシェフ型(1dB)LPFのリニアリティ. 白丸が測定値、実線は25Vまでのデータを利用して得た回帰直線($y=1.05*x$)

4 まとめ

特性の異なる3つの型、バターワース型、チェビシェフ型、ベッセル型のLPFについて学習し、設計資料に基づいた設計と製作を行った。作製したLPF回路について、周波数-利得特性・位相特性、入出力リニアリティの検証実験を行い、設計通りの動作をしていることを確認した。

今後もこの回路設計・製作研修を足がかりとしてスキルアップを図っていきたい。

特に本文中に引用等はしていないが、研修中、あるいは研修後に参照した文献を参考文献にまとめた。[3-8]

謝辞

今回、特に児島康介技師には研修後の検証実験において非常に細やかなご指導を頂いた。名古屋大学技術職員研修を企画・運営、講師をして頂いた皆様に、この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 島田公明, “アナログ回路応用マニュアル (電子回路ノウハウ) “, 日本放送出版協会, 1986
- [2] 福森勉, “平成 21 年度名古屋大学技術職員研修 (計測・制御コース) 受講報告 プリント基板加工法の比較検証(エッチング法と基板加工機使用)“, 21 年度第 5 回名古屋大学技術研修会報告集(PKEN-4), 2010
- [3] 平川光則, “これでわかった OP アンプ回路“, オーム社, 1995
- [4] 高橋久・菊池清明, “図解・使えるセンサ回路設計法“, 総合電子出版社, 2003
- [5] 上野太平, “確実に動作する電子回路設計“, CQ 出版, 1982
- [6] 岡村迪夫, “定本 OP アンプ回路の設計“, CQ 出版, 1990
- [7] 見城尚志・高橋久, “実用電子回路設計ガイド (メカトロニクス回路シリーズ) “, 総合電子出版社, 1981
- [8] OKAWA Electric Design フィルタ計算ツール, <http://sim.okawa-denshi.jp/Fkeisan.htm>