

A2 実験総合レポート

03190449 堀 紡希

6 月 11 日

1 実験目的

現在コンピュータを扱う上ではデジタル回路が重要だが、応用的な難しい回路ではよりシンプルなアナログ回路が活躍する場合もあるので、まずはアナログ回路の基本を学習する。

2 実験原理

発振

増幅器の出力の一部が入力側に戻ることを帰還といい、入力に加算されることを正帰還、減算されることを負帰還という。特に実験テキスト図 A2.7 の負帰還回路では増幅器で反転された v_i が減算されているので結果として正帰還になる。 v_i が $A\beta$ 倍されて加えられる過程がループして増幅されていく。 A, β は周波数により変化するので、増幅率 $A_v = \frac{A}{1+A\beta}$ の分母が 0 になる周波数、すなわち $A\beta = -1$ となる周波数が存在すればその周波数の信号の振幅は雑音のような小さな信号であっても無限大に増幅される。これを発振という。

3 実験方法

National Instruments 社の設計/プロトタイプ環境システム NI ELVIS のプロトタイプボード上に回路を組んで実験を行なった。

- 1 日目
- まず班員で NI ELVIS の操作とブレッドボードの扱いに習熟した。
 - 次に実験テキスト図 A2.24 に示されている回路を用いて、出力電圧がなるべく小さくなるように可変抵抗の値を調整してオペアンプのオフセット調整を行なった。

- オフセット調整を行なった回路を使って実験テキスト図 A2.25 の反転増幅回路を $R_1 = 9.94 \text{ k}\Omega, R_2 = 98.7 \text{ k}\Omega$ を用いてゲインを約 20dB、 $R_1 = 0.997 \text{ k}\Omega, R_2 = 98.7 \text{ k}\Omega$ としてゲインを約 40dB としてそれぞれ構成しボード線図を Bode モードを用いて測定しいくつかの周波数の正弦波を入力した時の波形を FGEN と Scope モードを用いて観測した。
 - また、同じように $R_1 = 9.94 \text{ k}\Omega, R_2 = 98.7 \text{ k}\Omega, R_1 = 0.997 \text{ k}\Omega, R_2 = 98.7 \text{ k}\Omega$ として実験テキスト図 A2.11 の非反転増幅回路をゲインを 20dB, 40dB としてボード線図、出力波形を観測した。
 - 次に実験テキスト図 A2.14 の微分回路を構成した。素子の値は $R_f = 98.5 \text{ k}\Omega, R_r = 0.997 \text{ k}\Omega, C_r = 0.443 \mu\text{F}, C_f = 0.59 \text{ nF}$ とした。これもまたこれまでと同様にボード線図を測定した。ただし、 R_r, C_f ありの回路と C_f なしと R_r なしと R_r, C_f なしの四つの回路で測定した。また R_r, C_f ありの回路について、微分動作、反転増幅、積分動作をするそれぞれの周波数領域の方形波応答を測定した。
- 2 日目
- 実験テキスト図 A2.16 に示されているウィーンブリッジ回路を可変抵抗の $R = 9.89 \text{ k}\Omega$ 、帰還部の $R = 9.93 \text{ k}\Omega, R_r = 0.991 \text{ k}\Omega, R_f = 5.12 \text{ k}\Omega$ 、並列部のキャパシタ $C_1 = 9.94 \text{ nF}$ 、直列部のキャパシタ $C_2 = 9.90 \text{ nF}$ として構成し、可変抵抗を調整して入力を入れなくても発振するように調整した。

- 可変抵抗をそのままにして、オシロスコープで出力波形、スペクトルアナライザで周波数スペクトルの変化を観測した
 - 可変抵抗の値をピークと違うものにしていくつか出力波形と周波数スペクトルを観測した。
 - 実験テキスト図 A2.17 のようにして X 点の電圧を測定し開ループ利得の周波数特性を測定した。これもいくつかの可変抵抗の値で測定した。
- 3 日目
- 遮断周波数 $f = 1\text{kHz}$, $\epsilon = 1.0$ として P3 実験で設計した Butterworth と Chebyshev の低域通過フィルタを図 P3.6 のように構成し周波数特性とステップ応答を測定した。
Butterworth で $L_1 = 3\mu\text{H}$ (内部抵抗 15.5Ω), $L_2 = 1\mu\text{H}$ (内部抵抗 5.4Ω), $C = 50.5\mu\text{F}$, $I = 4.2\Omega$, Chebyshev で $L_1 = 12\mu\text{H}$ (内部抵抗 70.2Ω), $L_2 = 10\mu\text{H}$ (内部抵抗 61.5Ω), $C = 4.02\mu\text{F}$, $I = 52.9\Omega$ とした。
 - 同様に遮断周波数 $f = 1\text{kHz}$ として P3 実験で設計した Butterworth と Chebyshev の高域通過フィルタを図 P3.6 のように構成し周波数特性とステップ応答を測定した。
Butterworth で $C_1 = 11.1\mu\text{F}$, $C_2 = 39.7\mu\text{F}$, $L = 1\mu\text{H}$ (内部抵抗 5.0Ω), $I = 8.3\Omega$, Chebyshev で $C_1 = 11.1\mu\text{F}$, $C_2 = 11.03\mu\text{F}$, $L = 1\mu\text{H}$ (内部抵抗 5.0Ω), $I = 7.3\Omega$ とした。
- 4 日目
- 実験テキスト図 A2.21 に示されている低域通過型アクティブフィルタを構成し、周波数応答と方形波 (1Hz) 応答を観測した。 V_{in} の方の抵抗 $R_1 = 1.125\text{k}\Omega$, $R_2 = 1.123\text{k}\Omega$, $C = 0.1131\mu\text{F}$, $2C = 0.252\mu\text{F}$ とした。
 - 実験テキスト図 A2.22 に示されている高域通過型アクティブフィルタを構成し、周波数応答と方形波 (1Hz) 応答を観測した。

$R = 1.125\text{k}\Omega$, 入力側のキャパシタ $C_1 = 0.986\mu\text{F}$, $C_2 = 0.893\mu\text{F}$, $2R = 2.274\text{k}\Omega$ とした。

4 実験結果

1 日目

- オフセット調整
非常に抵抗の変化に対してオフセットの変化が敏感であったため、オフセットを 0V にすることが理想ではあるが難しかったため $+50\text{mV}$ くらいになるまで調整をした。
- 反転増幅回路 20dB の設計の時、周波数特性は図 1, 2 のようになった。増幅率の理論値は 19.93dB で、位相は低周波のみ 180 度のズレになっており確かに反転されている。Bode モードの仕様上周波数が 158kHz までしか取れていないが、高周波の領域におけるグラフの傾きは -16.5dB/dec になっており理論値 -20dB/dec より 17% ほど小さくなっている。

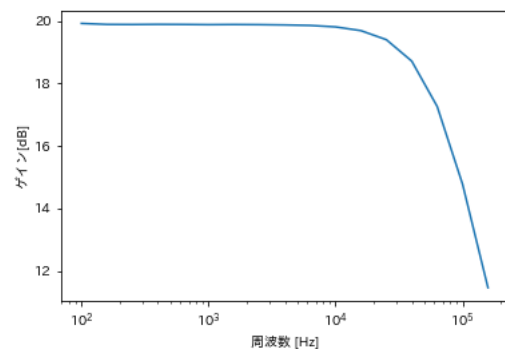


図1 ゲイン 20dB の反転増幅回路の振幅特性

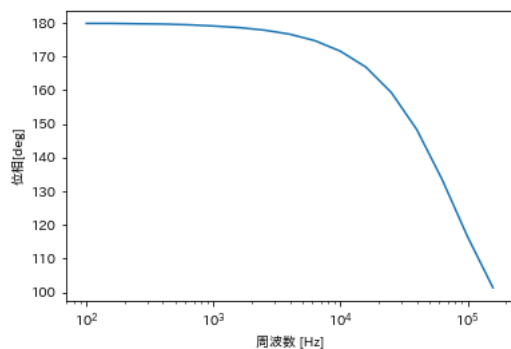


図2 ゲイン 20dB の反転増幅回路の位相特性

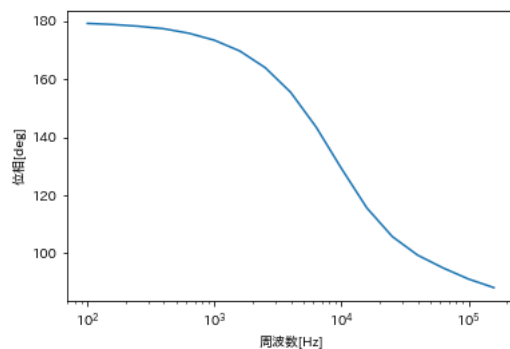


図4 ゲイン 40dB の反転増幅回路の位相特性

次に 40dB の設計の時の測定結果が図 3, 4 である。位相特性は 20dB の時と同じであるが振幅特性は傾きが-19.97 と理論値と 1% 以下の誤差となった。低周波では増幅率が 38.563 と 3% ほどの誤差となっている。

図 5 はオシロスコープで測定した 20dB 反転増幅回路の応答波形である。入力波形は 1kHz の正弦波。確かに位相が逆転し、入力波形のピークが 0.0264V, 出力波形が 0.268V となっているからおよそ 10 倍になっており確かに 20dB 増幅している。

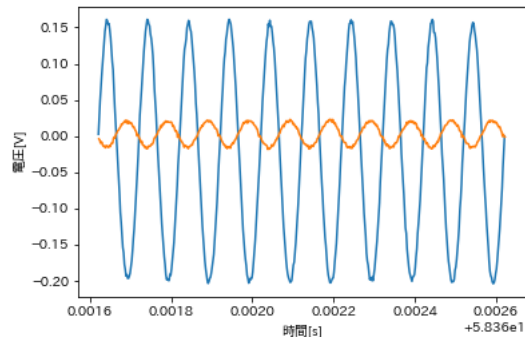


図5 ゲイン 20dB の反転増幅回路の応答波形

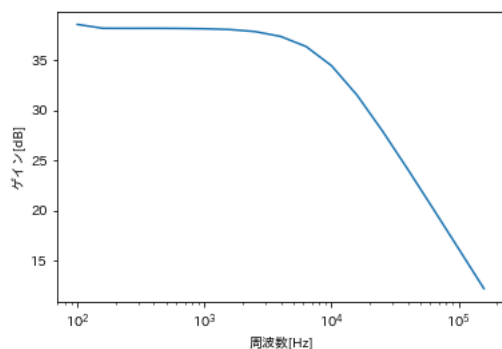


図3 ゲイン 40dB の反転増幅回路の振幅特性

● 非反転増幅回路

20dB の設計の時、周波数特性は図 6, 7 のようになった。40dB の場合は図 8, 9 に示した。増幅率の理論値は 20.8dB。位相は低周波のみ 0 度のズレになっており確かに反転されていない。振幅特性の傾きは-1.3 ほどと、とても小さかった。これはこの測定範囲の周波数が低かったためで、落ちきる前であったためと考えられる。確かに位相も図 8 に比べると落ち方が小さくなって

いる。

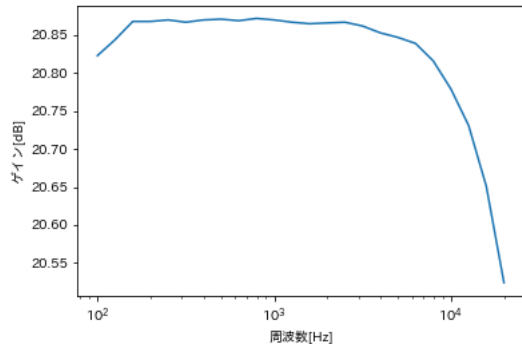


図 6 ゲイン 20dB の非反転増幅回路の振幅特性

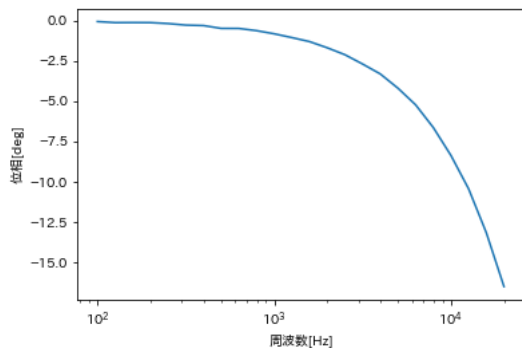


図 7 ゲイン 20dB の非反転増幅回路の位相特性

40dB の場合ゲインの理論値は 40.0 で 3.5% ほどの誤差がある。

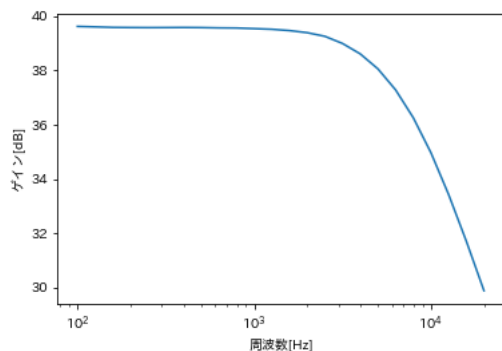


図 8 ゲイン 40dB の非反転増幅回路の振幅特性

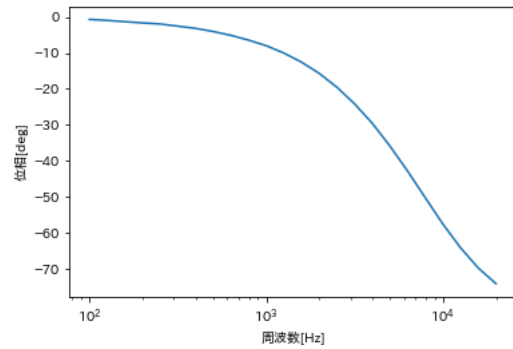


図 9 ゲイン 40dB の非反転増幅回路の位相特性

図 10 はオシロスコープで測定した 20dB 非反転増幅回路の応答波形である。こちらにも入力波形は 1kHz の正弦波である。図 5 と見比べるとよくわかるが確かに位相を反転させずに増幅している。

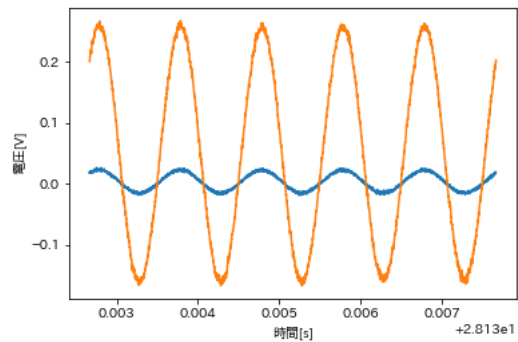


図 10 ゲイン 20dB の非反転増幅回路の応答波形

- 微分回路

図 11, 12 は微分回路のボーデ線図である。200Hz くらいまでは位相が 90 度遅れる微分回路としてはたつき、5kHz くらいまでは位相が 180 度遅れで増幅率が 15dB ほどの反転増幅回路、それより上では 270 度遅れ (90 度進み) の積分回路としてはたっている。

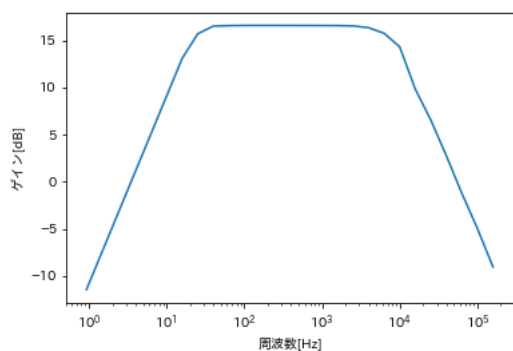


図 11 微分回路の振幅特性

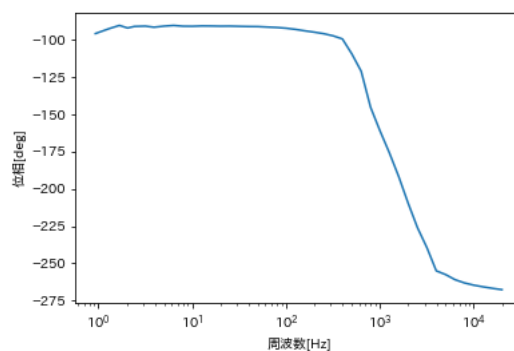


図 14 微分回路 (R_f なし) の位相特性

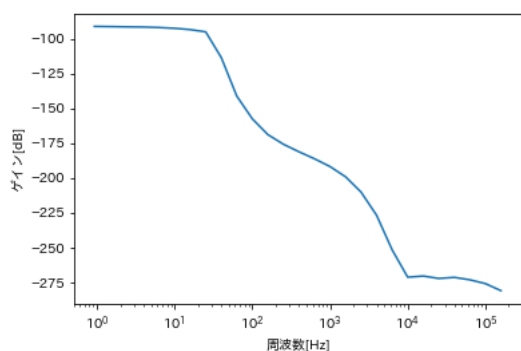


図 12 微分回路の位相特性

図 13,14 は R_f を取り去った微分回路のボデ線図である。図 11,12 に比べて微分回路としてはたらく周波数が広がっている。また、ピークの増幅率は 40dB ほどと大きくなっている。

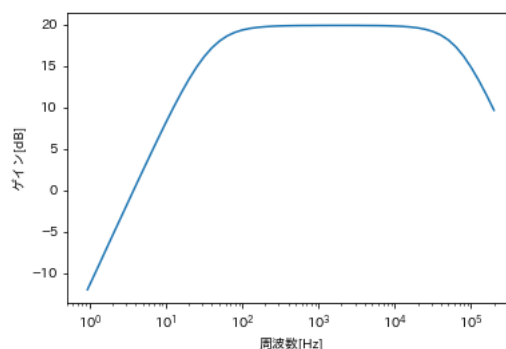


図 15 微分回路 (C_f なし) の振幅特性

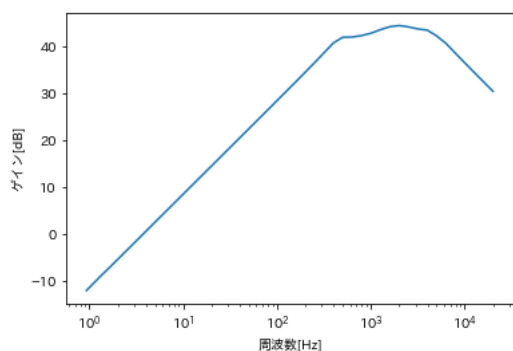


図 13 微分回路 (R_f なし) の振幅特性

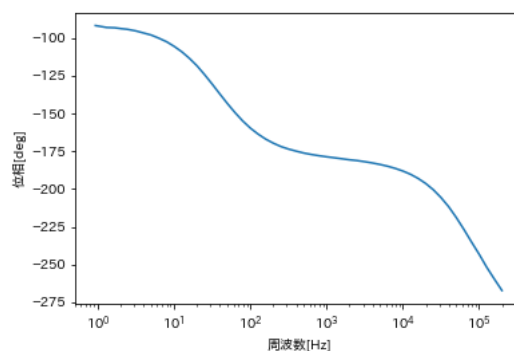


図 16 微分回路 (C_f なし) の位相特性

図 17,18 は R_r, C_f を取り去った微分回路のボード線図である。増幅率が 0dB になっており他のグラフと全く形が違っているので回路を組み間違えるなどして妥当な結果が得られなかったと考えられる。

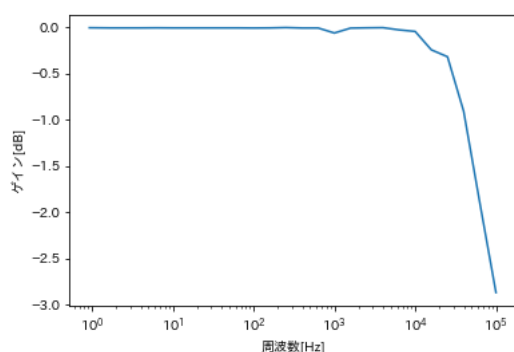


図 17 微分回路 (R_r, C_f なし) の振幅特性

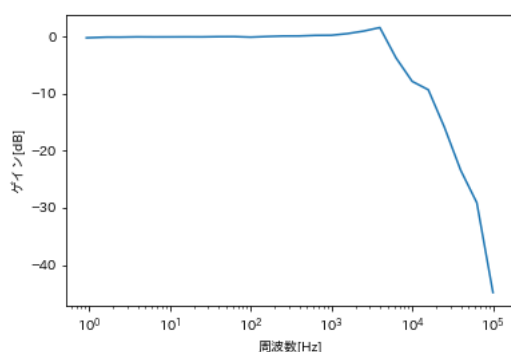


図 18 微分回路 (R_r, C_f なし) の位相特性

図 19 は微分回路の方形波 (10Hz) に対するステップ応答である。低周波であるため微分回路としてはたらしき、確かにデルタ関数の列のようなものが得られている。

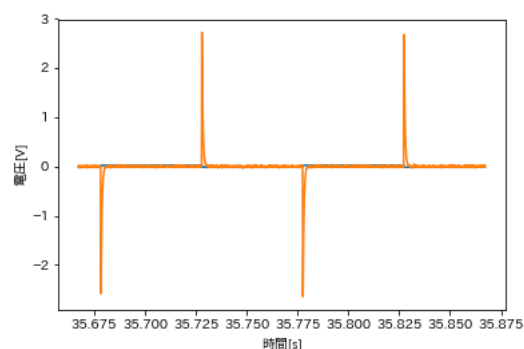


図 19 微分回路のステップ応答 (10Hz)

図 20 は微分回路の方形波 (2kHz) に対するステップ応答である。やや歪んでいるが反転増幅回路としてはたらいっていることが見て取れる。

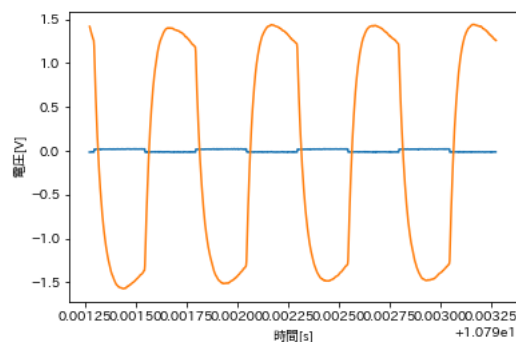


図 20 微分回路のステップ応答 (2kHz)

図 21 は微分回路の方形波 (20kHz) に対するステップ応答である。一次関数 (=定数関数の積分) が並んでいるような形になっており位相が反転しているが高周波では積分としての動作をしていることがわかる。

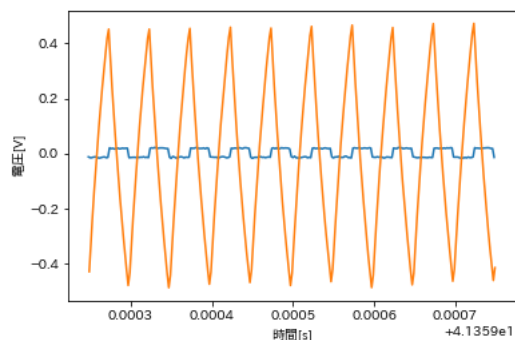


図 21 微分回路のステップ応答 (20kHz)

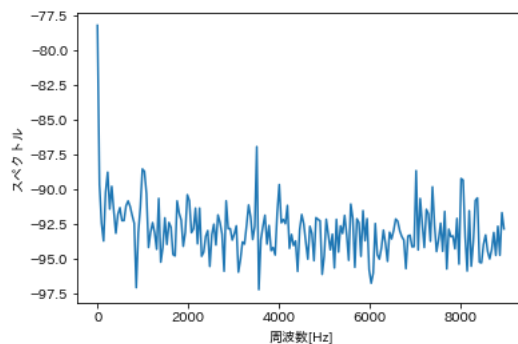


図 23 ウィーン発振回路の周波数スペクトル (非発振時)

2 日目 ● ウィーンブリッジ回路

可変抵抗を調整したところ、 $k = 0.517$ となるところで発振が起こった。

図 22,23 は発振した時とそうでない時のスペクトルの違いである。発振している時はスペクトルが最大 20dB であるのに対して発振していない時は約 -77dB という大変小さな値になっていた。

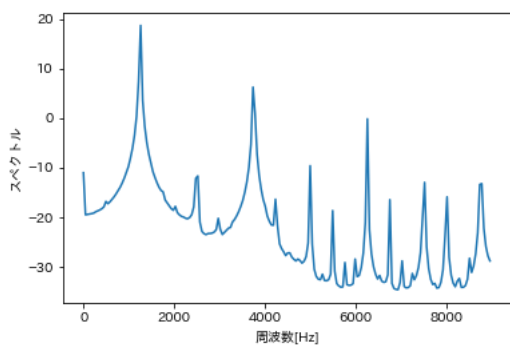


図 22 ウィーン発振回路の周波数スペクトル (発振時)

3 日目 ● LPF

以下が設計した LPF のボーデ線図である。Butterworth ではややゲインが落ち込むのが早いがあとは Chebyshev にリプルも現れており、概ね予想通りの結果が得られた。

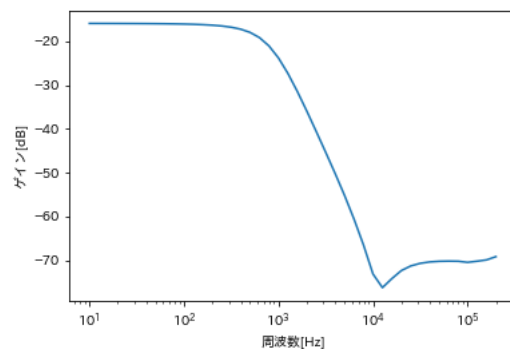


図 24 Butterworth 型 LPF の振幅特性

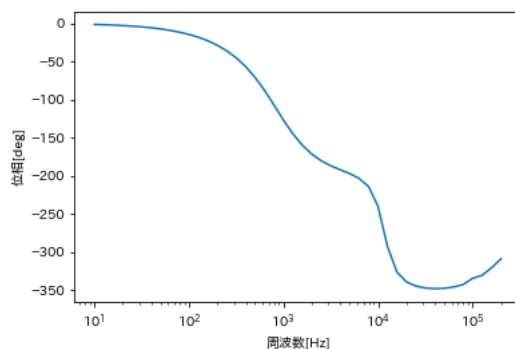


図 25 Butterworth 型 LPF の位相特性

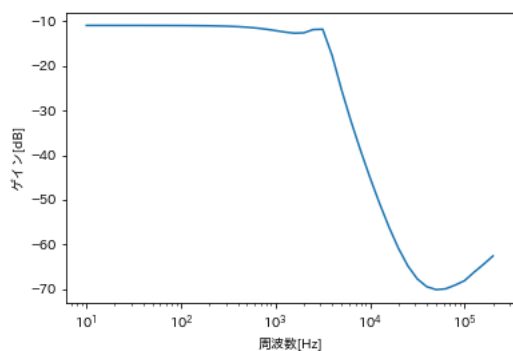


図 26 Chebyshev 型 LPF の振幅特性

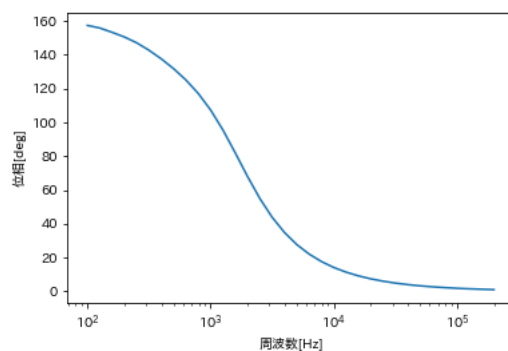


図 29 Butterworth 型 HPF の位相特性

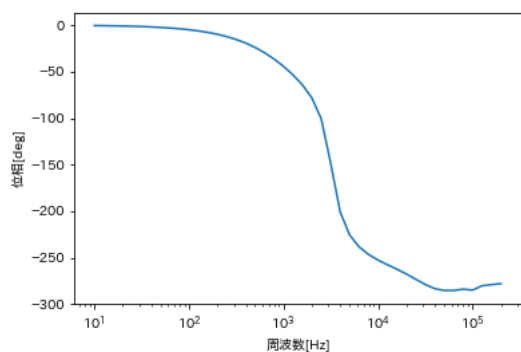


図 27 Chebyshev 型 LPF の位相特性

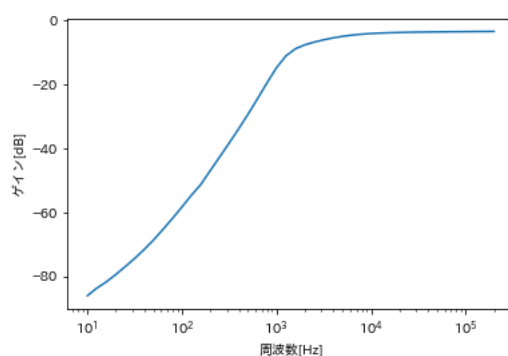


図 30 Chebyshev 型 HPF の振幅特性

● HPF

以下が設計した HPF のボーデ線図である。Chebyshev の方が低周波の方で 180 度に近い位相差が現れるはずであったが大きくずれてしまっている。

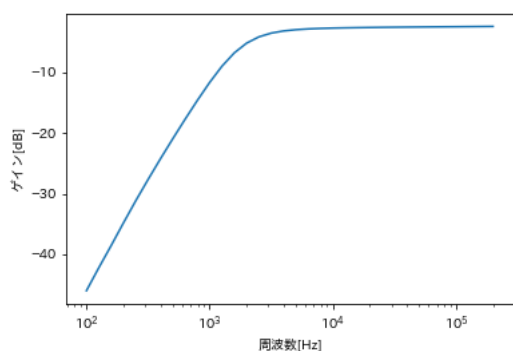


図 28 Butterworth 型 HPF の振幅特性

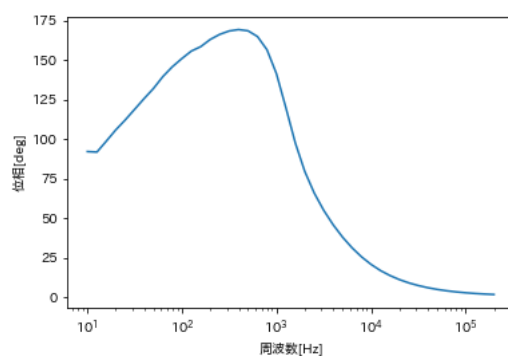


図 31 Chebyshev 型 HPF の位相特性

以下の図がパッシブフィルタのステップ応答である。この波形がインパルス応答の積分、つまり、伝達関数の積分になると考えられる。

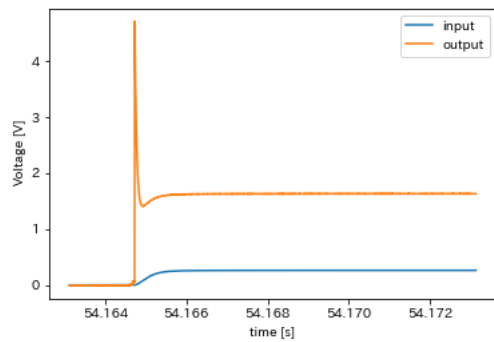


図 32 Butterworth 型 LPF のステップ応答

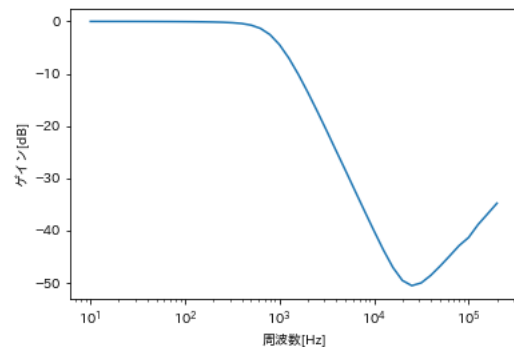


図 35 アクティブ LPF の振幅特性

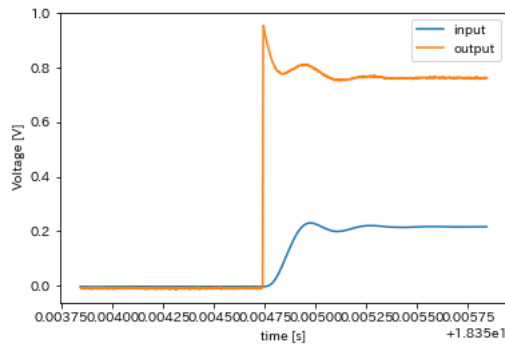


図 33 Chebyshev 型 LPF のステップ応答

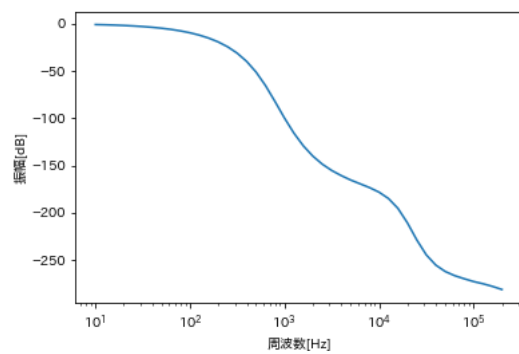


図 36 アクティブ LPF の位相特性

LPF では入力した方形波の大きさが違ったが、HPF では同じだったので同じグラフにまとめた。

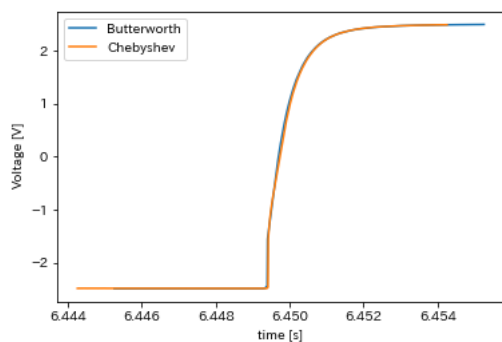


図 34 HPF のステップ応答

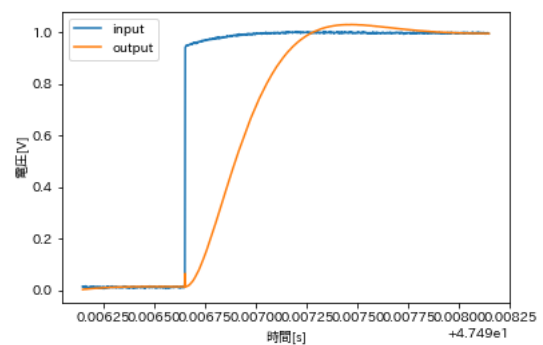


図 37 アクティブ LPF のステップ応答

4 日目 ● 低域通過型アクティブフィルタ

● 高域通過型アクティブフィルタ

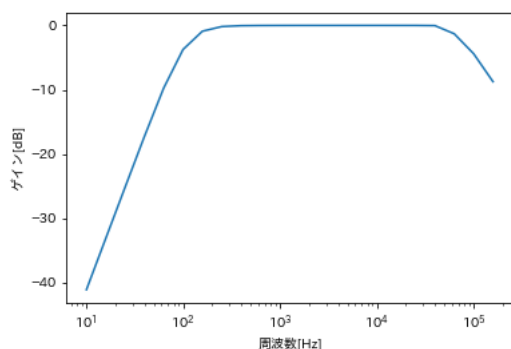


図 38 アクティブ HPF の振幅特性

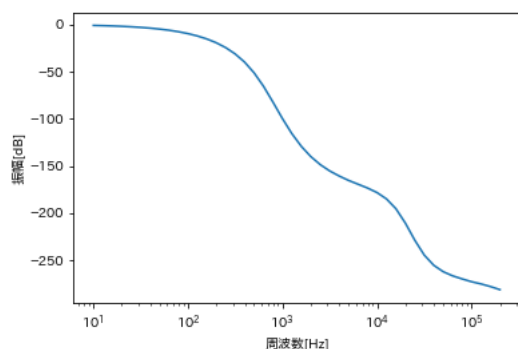


図 39 アクティブ HPF の位相特性

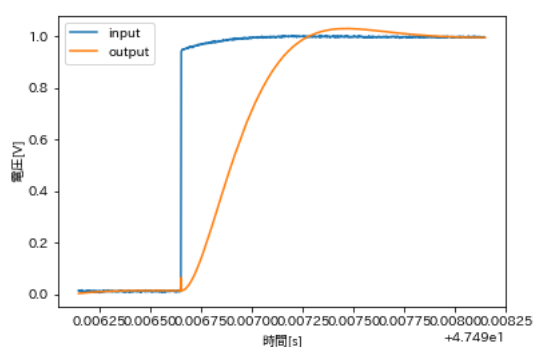


図 40 アクティブ HPF のステップ応答

5 考察課題

- 7.1(1) 反転増幅回路、非反転増幅回路の遮断周波数
遮断周波数は反転増幅回路では 20dB の回路で

70kHz、40dB の回路で 7kHz、非反転増幅回路では 20dB の回路では読み取れず、40dB の回路では 8kHz ほどであった。

また遮断周波数を越えた領域での傾きは反転増幅回路で -16.5dB/dec(20dB), -20.0dB/dec(40dB), 非反転増幅回路で -18.3dB/dec(40dB) であった。

実験テキストの式 A2.15 より増幅率はおおよそ A に比例する。そして図 A2.5 より A は -20dB/dec で小さくなっていくので上で述べた反転増幅回路、非反転増幅回路の増幅率も同じように -20dB/dec 程度の傾きで小さくなる。

7.1(2) R_r, C_f を付した微分回路の定性的性質

図 11, 12 にその回路のボーデ線図が示しているが、 $f < f_r = 360\text{Hz}$ で位相が 90 度遅れる、微分回路として働く。これは低周波においてキャパシタが高インピーダンスとなり C_r の働きが大きくなるからである。

$f_r < f < f_f \simeq 2700\text{Hz}$ の時は位相が 180 度ずれており反転増幅回路として働いている。これは中域の周波数においてキャパシタが低インピーダンスとなり R_r, R_f の働きが大きくなるからである。

$f_f < f$ の時は位相が 270 度遅れ (90 度進み) しており積分回路として働いている。これは高い周波数においてキャパシタがさらに低インピーダンスとなり R_r, C_f の働きが大きくなるからである。

方形波応答は微分回路として働く領域ではステップ波が微分されデルタ関数列となっている (図 19)。反転増幅回路として働く領域ではステップ波が位相を反転し増幅されている (図 20)。高周波では定数関数が積分され、傾きが -1 倍された一次関数の列になっており確かにそれぞれの性質を反映している (図 21)。

独自考察 ゲインの定量的考察

反転増幅回路は 20dB, 40dB で設計したが、実際には素子の値が理想通りではないので少しずれている。20dB の時は $R_1 = 9.94\text{k}\Omega$, $R_2 = 98.7\text{k}\Omega$ としたのでゲインの理論値は

19.94dB となり、実験値 19.92dB に 0.2% ほど近づいた。

同様に 40dB の時、理論値は 39.912dB となりこれも理論値に 0.2% ほど近づいた。しかし、素子の値を考慮してもまだ 3% ほどずれているが、これはブレッドボード等の測定系の内部抵抗、オペアンプの性能の問題が原因として考えられる。

7.2(3) 発振を開始する k

実験テキストの式 A2.46

$$A_v(s) = A \frac{(sCR)^2 + 3sCR + 1}{(sCR)^2 + (3 - kA)sCR + 1}$$

より、 $k = 3/A$ 、 $\omega CR = 1$ のとき分母が 0 になり発振する。

k の理論値は A から求めると 0.49 であるが実験値は 0.52 であった。これは誤差約 6% であり、可変抵抗の調整が手動であったことや理論通りの値の素子が用意できなかったことによるずれであると考えられる。

6 参考文献

- [1] 東京大学工学部：「電気電子情報第一 (前期) 実験テキスト」, 2019.
- [2] 廣瀬明：「電気電子計測」, 数理工学社, 2003.