

DSP – Cyfrowe przetwarzanie sygnałów

Laboratorium 8–10 – Filtry cyfrowe

Jakub Moroń, Paweł Hottowy

Utworzono: Kwiecień 2022

Ostatnia zmiana: 10 maja 2023

Zdania oznaczone (*) zawierają elementy do zamieszczenia w raporcie.

Spis treści

1	Podstawy filtrów FIR	2
1.1	Podstawy filtracji cyfrowej(*)	2
1.2	Funkcja przenoszenia filtru FIR	2
1.3	Odpowiedź czasowa filtru FIR(*)	3
2	Echo - autokorelacja(*)	4
3	Projektowanie filtrów FIR	4
3.1	Podstawy projektowania filtru FIR(*)	4
3.2	Zautomatyzowane projektowanie filtru FIR(*)	5
3.3	Zastosowanie filtru FIR – filtracja audio	7
3.4	Zastosowanie filtru FIR – filtracja obrazu	7
4	Filtry IIR	8
4.1	Podstawy filtrów IIR(*)	8
4.2	Porównanie filtrów FIR i IIR	9
4.3	Rodzaje filtrów IIR	9
4.4	Stabilność filtrów IIR	9
4.5	Porównanie metod projektowania filtrów IIR	10
4.6	Projektowanie filtrów IIR o dowolnej charakterystyce przenoszenia(*)	10
4.7	Usunięcie echa filtrem IIR(*)	11

1 Podstawy filtrów FIR

1.1 Podstawy filtracji cyfrowej(*)

Skrypt Zad1_1_FIR_podstawy.

- Wykonaj skrypt prezentujący podstawy działania filtru FIR (o skończonej odpowiedzi impulsowej) i przedyskutuj wyniki.
- Zmień współczynniki filtru (`FIRcoefs`) na inne, nierówne sobie (np. `[1 2 3 4]`). Wykonaj skrypt. Zwróć uwagę na to, jak ma się odpowiedź impulsowa do współczynników filtru?
- Przywróć współczynniki filtru (`FIRcoefs`) na same jedynki `[1 1 1 1]`, oraz zamień impuls na coraz dłuższy box, ustawiając zmienną `signal` na `[1 1]`, `[1 1 1]`, `ones(1, samplesAfterZero + 1)`. Zaobserwuj zmianę odpowiedzi filtru.
- Dla ostatniego przypadku z punktu 3. (skok jednostkowy) odpowiedz na pytania:
 - jaką filtrację wykonuje taki filtr FIR (górnopass, dolnopass, bandpass, itp.)?
 - ile wynosi wzmocnienie stałoprądowe i jak ma się do wag filtru?

Raport

1. Zamieść wykres odpowiedzi impulsowej dla filtru o dowolnych, nierównych sobie wagach (i NIE równych `[1 2 3 4]`).
2. Skomentuj:
 - a) jak ma się odpowiedź impulsowa do współczynników filtru,
 - b) jaką operację matematyczną użyliśmy aby uzyskać odpowiedź czasową filtru na ciąg próbek? Jakiej operacji odpowiada to w dziedzinie częstotliwości?
3. Zamieść wykres odpowiedzi filtru o wagach `[1 1 1 1]` na skok jednostkowy oraz podaj ile wynosi wzmocnienie stałoprądowe i jak ma się do wag filtru?

1.2 Funkcja przenoszenia filtru FIR

Skrypt Zad1_2_FIR_funkcja_przenoszenia.

- Wykonaj skrypt i przedyskutuj wyniki. Dlaczego wykres widma $D(T)FT$ jest pusty, a wykres fazy nie zgadza się z wynikiem uzyskanym wbudowaną funkcją `freqz`?
- Zwiększaj stopniowo parametr `zeroPadding` (`1, 10, 100, ...`). Przy jakiej wartości wykres widma $D(T)FT$ zaczyna zgadzać się z `freqz`? Odpowiedz na pytanie - dlaczego `T` jest w nawiasie w $D(T)FT$? Czym różni się $DTFT$ od $DTFT$ i kiedy mamy do czynienia z jednym, a kiedy z drugim?
- Odkomentuj wykonanie `figure(4)` (koniec skryptu). Przedyskutuj powstały wykres biegunów i zer filtru. Skąd wzięły się zera i bieguny? Czy ten filtr FIR jest stabilny? Czy każdy filtr FIR będzie stabilny?
- Oblicz funkcję przenoszenia filtru z jego równania różnicowego. Użyj np. Wolfram Alpha aby znaleźć miejsca zerowe licznika – zera funkcji przenoszenia.

- Wykonaj dodatkowy wykres prezentujący funkcję przenoszenia filtru (widmo DTFT) w skali liniowej (podowiedź - użyj zmodyfikowanej funkcji tworzącej wykres figure(2)) i odpowiedz na pytania:
 - Charakterystykę jakiego filtru otrzymaliśmy?
 - Gdzie, w stosunku do częstotliwości próbkowania, leży pierwsze miejsce zerowe (dla tak prostego filtru możemy je utożsamić z częstotliwością graniczną, ale uwaga - to NIE jest dokładna definicja!)
 - Zmień rząd filtru - zwiększ ilość współczynników na 8 jedynek. Jak wpłynęło to na położenie pierwszego miejsca zerowego? Czy potrafisz podać ogólną formułę na to położenie w funkcji rzędu filtru?
Podpowiedź: Ustaw zeroPadding tak, aby łącznie ze współczynnikami filtru DTFT było liczone z 1000 próbek. Znajdź położenia miejsc zerowych i spróbuj znaleźć korelację z informacjami z poprzednich zajęć...

1.3 Odpowiedź czasowa filtru FIR(*)

Skrypt Zad1_3_FIR_odpowiedź_czasowa.

- Wykonaj skrypt i przedyskutuj wykresy.
- Zmień filterOrder na 10. Przedyskutuj wynik.
- Dla filterOrder = 20 ustaw Fsig = 0.15. Jak się ma ta częstotliwość sygnału do "częstotliwości granicznej" filtru? Jaką amplitudę sygnału obserwujemy, a jaką byśmy widzieli w filtrze analogowym o identycznej częstotliwości granicznej? Dlaczego?
- Używając pętli for i (opcjonalnie) funkcji subplot, stwórz sześć wykresów. Na każdym umieść odpowiedź czasową filtru (identycznie jak figure 3) dla różnych wartości częstotliwości sygnału Fsig = od 0.1 do 0.2 z krokiem 0.02 (łącznie 6 wartości). Zaobserwuj zniekształcenie początku sygnału i odpowiedz na pytanie dlaczego to zniekształcenie wygląda na większe dla wyższych częstotliwości sygnału?
- Analogicznie jak poprzednio wykonaj cztery wykresy, na każdym umieszczając przebieg dla Fsig = 0.1 oraz filterOrder = 5, 10, 15, 20. Co dzieje się z amplitudą sygnału (pomijamy zniekształcenie)? Dlaczego? Co stało się w przypadku filterOrder = 20 i dlaczego?

Raport

1. Umieść wykres dla wartości częstotliwości sygnału Fsig = od 0.1 do 0.2 z krokiem 0.02.
2. Skomentuj:
 - a) powód powstawania zniekształcenia na początku,
 - b) zachowanie amplitudy wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału (i uzasadnij teoretycznie).
3. Podaj zachowanie amplitudy wraz ze wzrostem rzędu filtru dla stałej częstotliwości sygnału i uzasadnij teoretycznie.

2 Echo - autokorelacja(*)

Skrypt Zad2_echo_autokorelacja.

- Wykonaj skrypt. Odsłuchaj wynik. Możesz posterować opóźnieniem echa – parametr delay i jego wzmocnieniem – parametr gain.
- Przeanalizuj funkcję autokorelacji - widzisz jak znaleźć wartość opóźnienia echa (wykorzystamy to potem do usunięcia echa – wymaga filtru IIR).
- Zmień plik na dźwięk pianina albo fragment utworu. Czy teraz z funkcji autokorelacji da się wydostać opóźnienie echa?
- Ustaw gain na zero aby usunąć efekt echa. Zobacz jak wygląda funkcja autokorelacji pianina bez echa. Dlaczego tak jest?
- **ZAKOMENTUJ ODTWARZANIE** i ustaw gain na duży (np. 5, 10) - czy wydobędzie to szukane opóźnienie z funkcji autokorelacji? Dlaczego?
- Sprawdź jak wygląda funkcja autokorelacji dla dużego opóźnienia (np. 1s)
- Zaprojektuj filtr FIR realizujący echo (może być dla stałej wartości opóźnienia i wzmocnienia, nie parametrycznej).

Raport

1. Przedstaw projekt filtru FIR realizującego echo, np. w postaci jego równania różnicowego albo funkcji przenoszenia

3 Projektowanie filtrów FIR

3.1 Podstawy projektowania filtru FIR(*)

Skrypt Zad3_1_FIR_projektowanie.

- Wykonaj skrypt, przedyskutuj wyniki.
- Sprawdź co się stanie jeśli ustalisz parzyste N (np. 32) lub parzyste K (np. 8)
- Zbadaj stromość pasma w funkcji rzędu filtru - ustaw N i K na 2, 4, oraz 8 razy większe (pamiętaj by były nieparzyste; np. $2 \cdot 31 = 62 \rightarrow$ ustawiamy $+1 = 63$, $2 \cdot 7 = 14$, ustawiamy $+1 = 15$)
- Wykonaj wykres na którym przestawisz charakterystyki przenoszenia dla czterech przypadków. Wykres wyskaluj w częstotliwości i zaprezentuj w zakresie $[0 - f_N)$ (częstotliwość Nyquista).
- Zaobserwuj zjawisko Gibbsa, czyli zafalowania charakterystyki – porównaj ich amplitudę między różnymi rzędami filtru. Z czego to wynika?
- Ustaw $N=31$, $K=7$.
 - Wygeneruj okno Hamming-a lub Blackmann-a funkcjami:
`window = hamming(N)';`
`window = blackman(N)';`

- Przemnóż współczynniki filtru przez okna tworząc nowy filtr.
- Przedstaw uzyskane współczynniki filtru na wykresie.
- Umieść na jednym wykresie charakterystykę przenoszenia filtru "bez" okna oraz filtr z oknem, w skali logarytmicznej ($20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(\text{realH}))$). Porównaj i przedyskutuj różnice.
- Zaprojektuj filtry: górno-przepustowy oraz pasmowo-przepustowy stosując technikę spectral inversion.
Przedstaw uzyskane współczynniki filtrów i ich charakterystyki częstotliwościowe.
- Zaprojektuj filtry: górno-przepustowy oraz pasmowo-przepustowy stosując technikę spectral reversal.
UWAGA - zastanów się jak uzyskać sinusa o częstotliwości $f_s/4$ albo $f_s/2$ tak, aby:
 - był symetryczny (wokół środkowego prążka o indeksie 15 dla $N=31$)
 - był równy 1 dla środkowego prążka
 Przedstaw uzyskane współczynniki filtrów i ich charakterystyki częstotliwościowe.

Raport

1. Przedstaw projekt filtru górno-przepustowego z użyciem techniki spectral inversion, a dokładnie:
 - a) przedstaw charakterystyki częstotliwościowe obu filtrów źródłowych
 - b) opisz dalszą procedurę postępowania, czyli technikę spectral inversion
 - c) przedstaw wynikową charakterystykę częstotliwościową i skomentuj jej zgodność z oczekiwaniami (inaczej mówiąc napisz skąd się wzięła?)
2. Przedstaw projekt filtru pasmowo-przepustowego z użyciem techniki spectral reversal, a dokładnie:
 - a) przedstaw charakterystykę częstotliwościową filtru źródłowego
 - b) opisz dalszą procedurę postępowania, czyli technikę spectral reversal
 - c) przedstaw wynikową charakterystykę częstotliwościową i skomentuj jej zgodność z oczekiwaniami (inaczej mówiąc napisz skąd się wzięła?)

3.2 Zautomatyzowane projektowanie filtru FIR(*)

Skrypt Zad3_2_FIR_okna.

- Wykonaj skrypt dla różnych funkcji okien (rectwin, blackman, hamming, hanning) i przedyskutuj wyniki (teoria - wykład W9, tabela na slajdzie 27).
 - Wyraź widmo w skali częstotliwości
 - Jak dla takiego filtru definiowana jest częstotliwość graniczna?
Podpowiedź: $-3\text{dB} \rightarrow 0.707$ w skali liniowej, $-6\text{dB} \rightarrow 0.5$ w skali liniowej
- Dla okna prostokątnego i jednego, wybranego z pozostałych, wykonaj skrypt dla rzędu filtru 100, 200 oraz 400. Przedyskutuj wyniki.
- Uruchom narzędzie windowDesigner i przedyskutuj jego działanie.
- Z użyciem narzędzia windowDesigner wyszukaj i zaaplikuj okno o możliwie najlepszym tłumieniu w paśmie zaporowym.

- Zaprojektuj filtry innych typów, do realizacji filtrów użyj dowolnego z okien:
 - Filtr górno-przepustowy - ustaw typ filtru 'high' jako argument funkcji fir1
 - Filtr pasmowo-przepustowy - ustaw typ filtru 'bandpass' oraz zamień cutoffFreq na wektor dwóch częstotliwości granicznych
 - Filtr pasmowo-zaporowy - ustaw typ filtru 'stop' oraz zamień cutoffFreq na wektor dwóch częstotliwości granicznych
- Sprawdzenie technik projektowania filtrów:
 - Wykonaj filtr górno- i dolno-przepustowy o tej samej częstotliwości granicznej (oraz tym samym rzędzie i oknie). Zapisz współczynniki filtrów (impulseResponse) do plików mat.
 - Wykonaj wykresy:
 - * na jednym umieszczone funkcjami stem współczynniki obu filtrów
 - * na drugim stosunek współczynników filtru górno- do współczynników dolno-przepustowego. Porównaj ten wykres z teorią i skomentuj różnice.
 - Wykonaj filtry: dolno- i górno-przepustowy i pasmowo-zaporowy. Dobierz częstotliwości graniczne filtrów tak, aby dolna częstotliwość graniczna filtru pasmowo-zaporowego odpowiadała dolno-przepustowemu, a górna – górno-przepustowemu.
Umieść na jednym wykresie (stem) współczynniki filtru pasmowo-zaporowego oraz sumę współczynników filtrów dolno- i górno-przepustowego. Skomentuj wynik
- Narzędzie filterDesigner – automatyczne projektowanie filtrów
 - Uruchom narzędzie filterDesigner i przedyskutuj jego działanie.
 - Zaprojektuj "porządny" filtr dolno-przepustowy: ustaw przykładowo:
 - * wpass na 0.2 (zadbaj by jednostki były "Normalized")
 - * wstop na 0.25
 - * Apass na 1 dB (zadbaj by rząd filtru był ustawiony na "Minimum order")
 - * Astop na 80 dB
 Wygeneruj filtr i porównaj jego charakterystykę przenoszenia z najlepszym z filtrów zaprojektowanych dotychczas.
 - Zwróć uwagę na rząd filtru, jaki wyszedł dla powyższych ustawień. Dokonaj porównania z najlepszym z filtrów zaprojektowanych dotychczas, ale o takim samym rzędzie.
 - Zbadaj jak zależy rząd filtru od:
 - * szerokości pasma przejściowego (zmień przykładowo wstop na 0.21 oraz 0.3),
 - * od wartości grubości pasma przepustowego (Apass) i tłumienia pasma zaporowego (Astop), przykładowo ustawiając grubości pasma przepustowego na np. 2, 0.5 i 0.25 dB, a tłumienia pasma zaporowego na 60, 100, 120 dB.

Raport

1. Wykonaj wykres charakterystyki przenoszenia w skali liniowej dla trzech rzędów filtru: `filterOrder = 50, 100` oraz `400` dla jednego, wybranego okna.
2. Skomentuj jaki jest wpływ rzędu filtru na stromość charakterystyki (przejście z pasma przenoszenia do zaporowego)?
3. Przedstaw wykres (jak figure 1) dla wygenerowanego z użyciem narzędzia `windowDesigner` okna. Podaj nazwę okna i oszacuj uzyskane wzmocnienie w paśmie zaporowym.
4. Przedstaw wykresy:
 - a) umieszczone na jednym wykresie (funkcjami `stem`) współczynniki filtrów górno- i dolno-przepustowego oraz, na drugim wykresie, ich stosunek (górno- do dolno-). Skomentuj wynik, w szczególności zgodność drugiego z wykresów z teorią (i powód rozbieżności, jeśli występują)
 - b) umieszczone na jednym wykresie współczynniki filtru pasmowo-zaporowego oraz sumę współczynników filtrów dolno- i górno-przepustowego. Skomentuj wynik i jego zgodność z teorią.
5. Przedstaw wnioski jak zależy rząd filtru (rośnie, maleje i jak silnie) od szerokości pasma przejściowego, tłumienia pasma zaporowego oraz grubości pasma przepustowego.

3.3 Zastosowanie filtru FIR – filtracja audio

Skrypt `Zad3_3_FIR_muzyka`.

- Wykonaj skrypt. Sprawdź czy słyszysz różnicę między oryginalnym a przefiltrowanym dźwiękiem. Porównaj wykresy 1 oraz 2 i przedyskutuj wyniki.
- Wykonaj wykres funkcji przenoszenia filtru (freqz)
- Ustaw częstotliwość graniczną `cutoffFreq` na taką, która daje wyraźny efekt (podpowiedź – zajrzyj do skryptu `Zad7_2_muzyka_filtracja` z poprzedniego tematu (DFT) i zobacz ile wynosiła częstotliwość graniczna).
- Zmień funkcję okna tak, aby uzyskać możliwie maksymalne i płaskie tłumienie w paśmie zaporowym (`windowDesigner`, `filterDesigner`...)
- Zaimplementuj filtry górno-przepustowy o częstotliwości granicznej `500 Hz` i pasmowo-zaporowy o paśmie zaporowym od `160` do `1000 Hz` i zastosuj je.

3.4 Zastosowanie filtru FIR – filtracja obrazu

Skrypt `Zad3_4_FIR_obraz`.

- Wykonaj skrypt i przedyskutuj wyniki.
- Zmień rząd filtru na dużo wyższy. Jaki, znany już efekt możemy zaobserwować na rzeczywistej funkcji przenoszenia oraz przefiltrowanym obrazie?
- Zmień funkcję okna na inną (np. `blackmann`). Jak wpłynęło to na funkcję przenoszenia, a jak na przefiltrowany obraz?

- Wykonaj porównanie okna prostokątnego i innego (np. Blackman'a) dla filtru niskiego rzędu (np. 21).
- Porównaj wyniki z wynikami skryptu z zadania 9.1 z poprzedniego laboratorium z DFT.
- Zamień filtr na górnoprzepusotwy.

4 Filtry IIR

4.1 Podstawy filtrów IIR(*)

Skrypt Zad4_1_IIR_podstawy.

- Wykonaj skrypt i omów wyniki.
- Zbadaj zależność od rzędu filtru (`filterOrder = 2, 4, 8, 16, 32`):
 - zgodności charakterystyki filtru IIR oraz jego odpowiednika analogowego,
 - długości odpowiedzi impulsowej
- Zbadaj zależność od częstotliwości granicznej (dla `cutoffFreq = 100, 200, 300, 400, 490` Hz):
 - zgodności charakterystyki filtru IIR oraz jego odpowiednika analogowego,
 - długości odpowiedzi impulsowej
 - położenia biegunów filtru. Spróbuj powiązać położenie biegunów z długością odpowiedzi impulsowej.
- Zbadaj zgodność charakterystyki filtru IIR oraz jego odpowiednika analogowego, długości odpowiedzi impulsowej oraz położenia biegunów od stosunku częstotliwości granicznej do częstotliwości próbkowania:
 - dla $F_{\text{smp}} = 1000$ Hz ustaw `cutoffFreq = 10` Hz. Zakomentuj linię 57 - ylim.
 - zwiększ F_{smp} do 10 kHz, 100 kHz zachowując stały stosunek częstotliwości granicznej do częstotliwości próbkowania, zakomentuj linię 54 - xlim.

Raport

1. Przedstaw charakterystyki filtru rzędu 2, 8 oraz 16
2. Skomentuj zgodność charakterystyk z prototypem analogowym w zależności od rzędu filtru
3. Przedstaw charakterystykę filtru rzędu 32 i długość odpowiedzi impulsowej w tym przypadku. Skomentuj wynik (czy filtr nadal zachowuje się tak jak byśmy zakładali)?
4. Przedstaw charakterystyki filtru rzędu 4 dla częstotliwości granicznej 10, 100, i 490 Hz
5. Podaj długości odpowiedzi impulsowej dla częstotliwości granicznych: 10, 100, 200, 300, 400 i 490 Hz.
6. Skomentuj:
 - a) jak zależy zgodność charakterystyk z prototypem analogowym od częstotliwości granicznej?

- b) jaka powinna być częstotliwość graniczna (w stosunku do próbkowania) aby charakterystyka była dobrze zgodna z prototypem analogowym?
- c) jak zmienia się długość odpowiedzi impulsowej w zależności od częstotliwości granicznej (w stosunku do próbkowania) i dlaczego (zaprezentuj położenie biegunów dla 100 Hz i 490 Hz i uzasadnij związek ich położenia z długością odpowiedzi)

4.2 Porównanie filtrów FIR i IIR

Skrypt Zad4_2_IIR_a_FIR.

- Wykonaj skrypt i omów wyniki.
- Zmień rząd filtru FIR (FIRfilterOrder) aby uzyskać charakterystykę możliwie zbliżoną do IIR:
 - Czy da się w ogóle uzyskać taką charakterystykę jak IIR?
 - Jaki rząd filtru FIR (w stosunku do IIR) jest potrzebny aby zbliżyć się do charakterystyki IIR?
 - Jak mają się do siebie długości odpowiedzi impulsowych IIR i FIR?
- Zastosuj okno (np. blackman) do filtru FIR. Czy pomaga to uzyskać charakterystykę zbliżoną do IIR?
- Zwiększ rząd filtru IIR do 10. Powtórz punkt 2 (może być z oknem, jeśli ono pomaga)

4.3 Rodzaje filtrów IIR

Skrypt Zad4_3_IIR_rodzaje.

- Wykonaj skrypt. Omów zaobserwowane różnice między filtrami.
- Zwiększ tłumienie w paśmie zaporowym dla filtrów Chebyshev'a typu II i filtru eliptycznego (50, 70, 90 dB). Jak wpływa to na charakterystykę filtrów (co dzieje się z częstotliwością graniczną filtru Chebyshev'a?)
- Sprawdź jak zmieniają się charakterystyki dla zwiększonego rzędu filtru.

4.4 Stabilność filtrów IIR

Skrypt Zad4_4_IIR_stabilnosc.

- Na podstawie wykresu biegunów i zer spróbuj określić funkcję przenoszenia filtru - czy da się ją zapisać w postaci prostszej niż w liniach 7 i 8? Czy filtr jest stabilny?
- "Delikatnie" zaokrągl ostatni współczynnik w zmiennej a: $0.6561 \rightarrow 0.656$. Co się stało z odpowiedzią impulsową? Czy potrafisz to uzasadnić na podstawie położenia biegunów i zer?
- Zmień ("zaokrągl") przedostatni współczynnik w zmiennej a: $2.916 \rightarrow 2.92$. Zaobserwuj odpowiedź impulsową i uzasadnij ją położeniem biegunów.

4.5 Porównanie metod projektowania filtrów IIR

Skrypt Zad4_5_IIR_porownanie_metod.

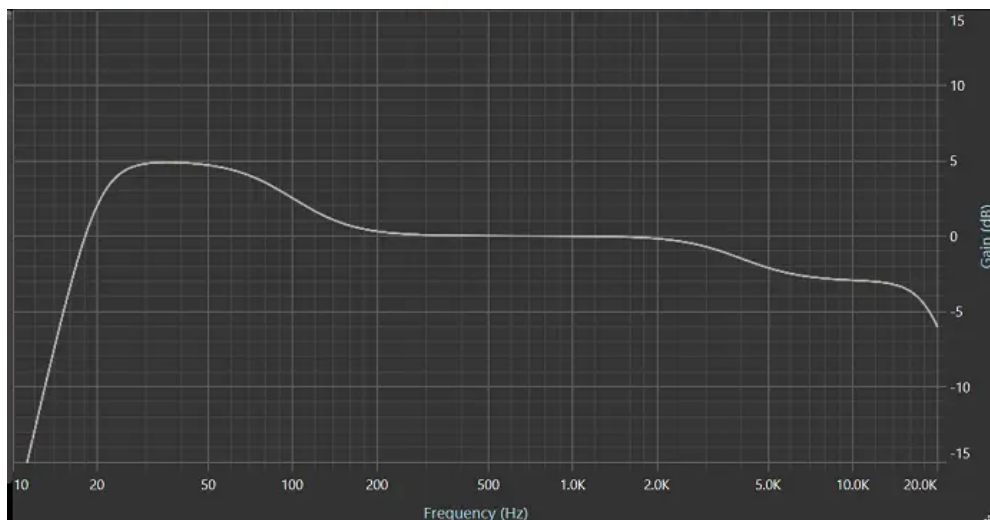
- Wykonaj skrypt i omów wyniki.
- Zakomentuj linię 58 - ylim i wykonaj skrypt raz jeszcze aby obejrzeć całą charakterystykę amplitudową.
- Zbadaj zgodność charakterystyk filtru IIR otrzymanych różnymi metodami oraz położenia ich biegunów w zależności od rzędu filtru (filterOrder = 2, 4, 8, 16)

4.6 Projektowanie filtrów IIR o dowolnej charakterystyce przenoszenia(*)

Skrypt Zad4_6_IIR_dowolna_funkcja_przenoszenia.

- Wykonaj skrypt. Omów wyniki i zgodność funkcji przenoszenia filtru z zadaną.
- Zwiększ rząd filtru – jak zachowuje się zgodność funkcji przenoszenia.
- Sprawdź czy możemy zwiększać rząd w nieskończoność aby podnieść precyzję (co stanie się dla rzędu np. 100)?
- Zaprojektuj własny filtr.

Jeżeli nie masz pomysłu, spróbuj zrobić equalizer audio: podzielić pasmo na kilka części i ustalić dla każdego z nich inne wzmocnienie jak, przykładowo, na rysunku poniżej



Raport

1. Przedstaw projekt własnego filtru:

- a) Przedstaw założenia co do charakterystyki częstotliwościowej i ewentualnie zastosowanie takiego filtru
- b) Przedstaw projekt – tabelkę **freq** i **gains**, czyli częstotliwości i odpowiadających im wzmocnień
- c) Zaprezentuj charakterystykę częstotliwościową, położenie zer i biegunów i odpowiedź impulsową zaprojektowanego filtru
- d) Napisz czy projekt się udał, czyli czy filtr jest stabilny i sensownie realizowalny (oszacuj rząd filtru)

4.7 Usunięcie echa filtrem IIR(*)

Skrypt Zad4_7_IIR_usuniecie_echa.

- Zdefiniuj filtr IIR na podstawie filtru FIR który uprzednio wygenerował echo.
- Popraw filtr tak, aby usuwał echo w pełni poprawnie.

Raport

1. Przedstaw projekt filtru usuwającego echo, czyli:
 - a) przedstaw ideę projektowania tego filtru (czyli skąd "się wziął")
 - b) przedstaw finalna funkcję przenoszenia. Uzasadnij wybrane wzmocnienie.