

Spłot sygnałów, a symulacje kolumn gitarowych.

Damian Hamowski

Spis treści

Część główna

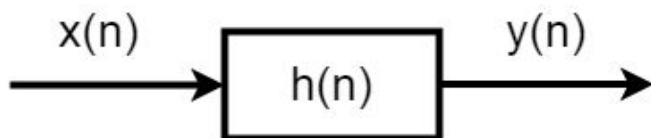
Wstęp i zagadnienia teoretyczne	2
Opis doświadczenia	2
Przebieg doświadczenia	2 - 4
Wyniki	4 - 6

Dodatkowe zagadnienia

Wpływ długości IR na brzmienie	7
Próba odzyskania sygnału bezpośredniego (DI)	8 - 9
Próba uzyskania przesteru gitarowego	10 - 13
Wykorzystanie otrzymanych symulacji w praktyce	13
Podsumowanie i wnioski	13

Wstęp i zagadnienia teoretyczne

Wynikiem filtracji sygnału wejściowego $x(n)$ przez filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej $h(n)$ jest przefiltrowany sygnał $y(n)$, co przedstawia poniższy schemat.



Splot dyskretny

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{m=0}^M h_m x(n - m)$$

Jednym ze sposobów uzyskania charakterystyki filtru jest pobudzenie go impulsem Diraca. W ten sposób na wyjściu systemu uzyskujemy sygnał $h(n)$.

Cel doświadczenia

Celem głównej części doświadczenia jest wygenerowanie odpowiedzi impulsowej kolumny gitarowej, dokonanie jej splotu z czystym sygnałem gitary elektrycznej (tym samym uzyskując symulację brzmienia wzmacniacza) i porównanie wyników tego zabiegu z nagraniem bezpośrednio z kolumny. Wzmacniacz, razem ze wpływem pomieszczenia, nagrany mikrofonem, jest traktowany jako filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej.

Aparatura użyta do przeprowadzenia doświadczenia

Gitara elektryczna: custom BS Guitars telecaster (środkowa pozycja)

Wzmacniacz gitarowy: Fender Yale Reverb

Mikrofon: RODE NT1-A

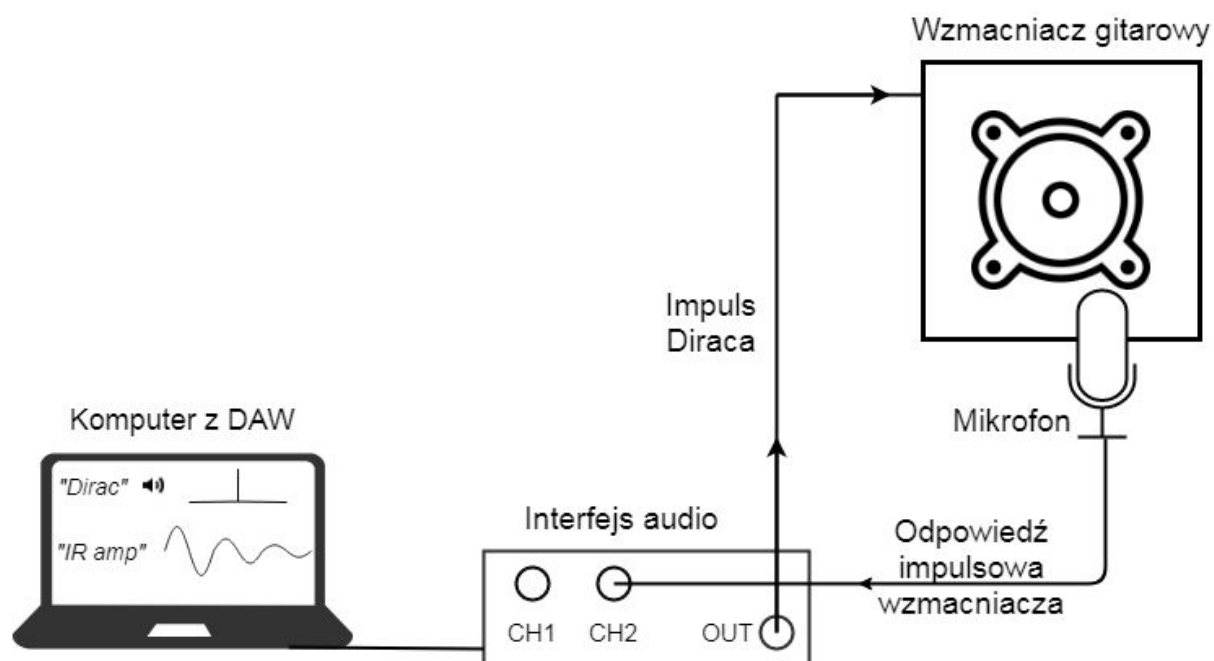
Interfejs audio: Steinberg UR22

Komputer z oprogramowaniem:

- Matlab 2019b
- DAW Studio One 4.5 Pro

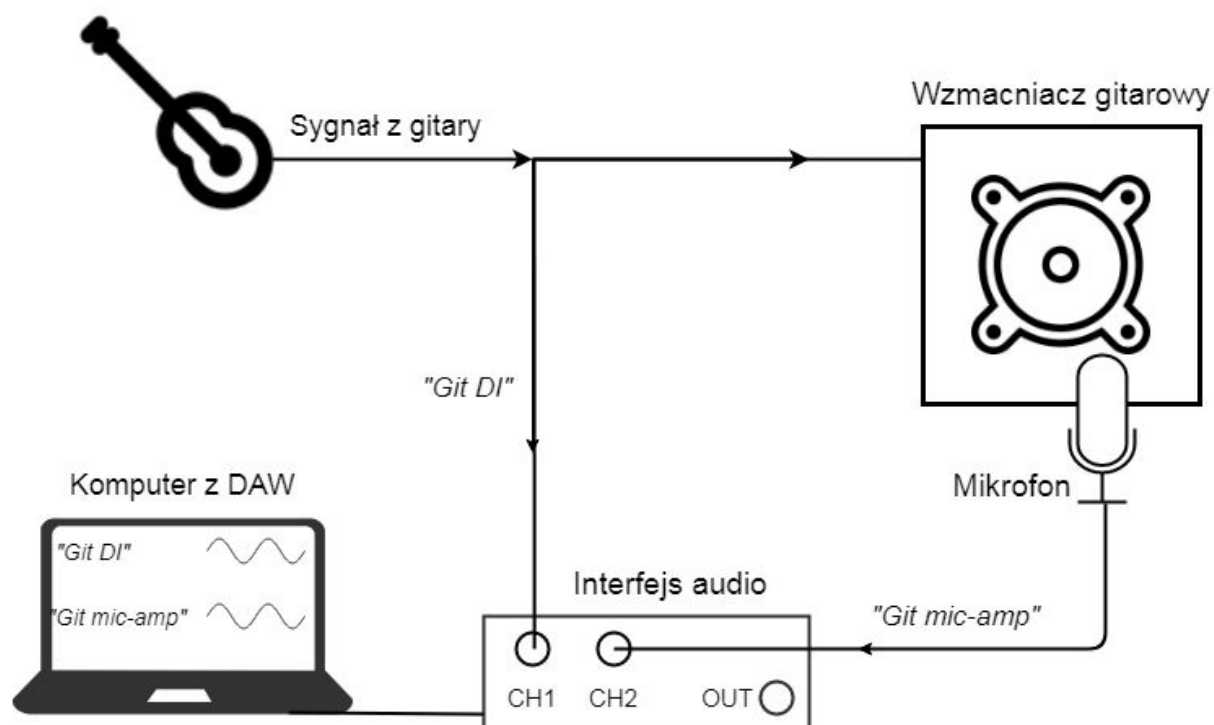
Przebieg doświadczenia

1) Wzmacniacz gitarowy odizolowano panelami akustycznymi, aby zminimalizować wpływ pomieszczenia na sygnał rejestrowany przez mikrofon. Jako sygnał wejściowy podano najpierw cyfrowy impuls Diraca (sygnał składający się z zer i jednej próbki równej 1). Odpowiedź wzmacniacza zarejestrowano przy pomocy toru pomiarowego nr 1 (impuls Diraca => wzmacniacz => mikrofon => interfejs audio => DAW - ang. Digital Audio Workstation): rysunek poniżej.



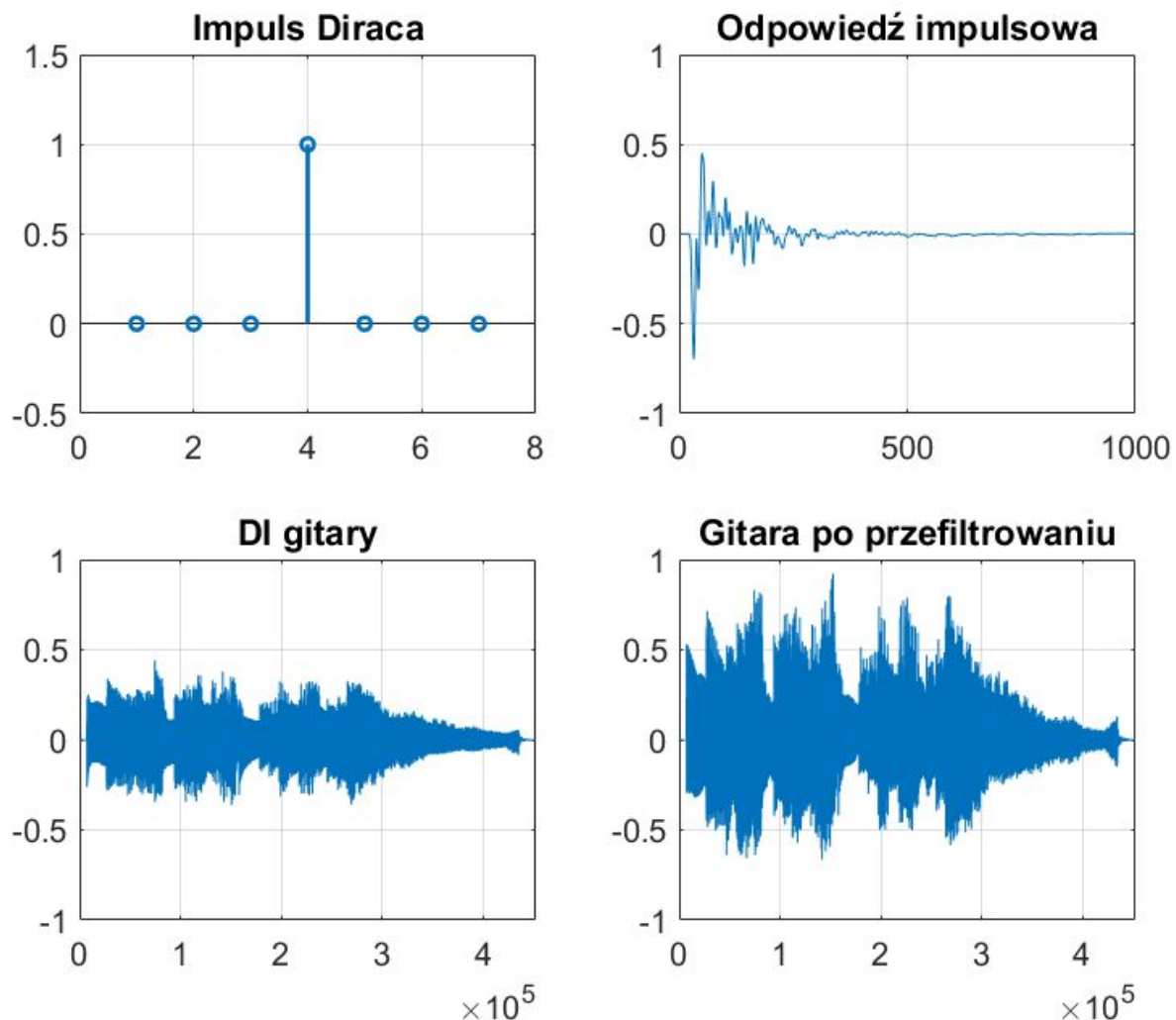
Schemat toru pomiarowego nr 1.

2) W celach analizy porównawczej zarejestrowano bezpośredni sygnał z gitary (DI) oraz ten sam sygnał przepuszczony przez wzmacniacz gitarowy przy pomocy toru pomiarowego nr 2.



Schemat toru pomiarowego nr 2.

3) Przy pomocy programu Matlab wygenerowano poniższe wykresy przedstawiające wygląd impulsu Diraca oraz odpowiedzi impulsowej wzmacniacza (dwa górne wykresy). Następnie dokonano splotu czystego sygnału (DI) z odpowiedzią impulsową wzmacniacza w celu uzyskania symulacji. Dwa dolne wykresy przedstawiają odpowiednio DI gitary przed filtracją, oraz po. Do wykonania splotu użyto funkcji `conv(x,h)`. Sygnał uzyskany metodą odpowiedzi impulsowej jest dłuższy od sygnału nagrałego o dokładnie $H-1$ próbek (H - ilość próbek filtru/odpowiedzi impulsowej). Wynika to z natury splotu sygnałów w dziedzinie dyskretniej.



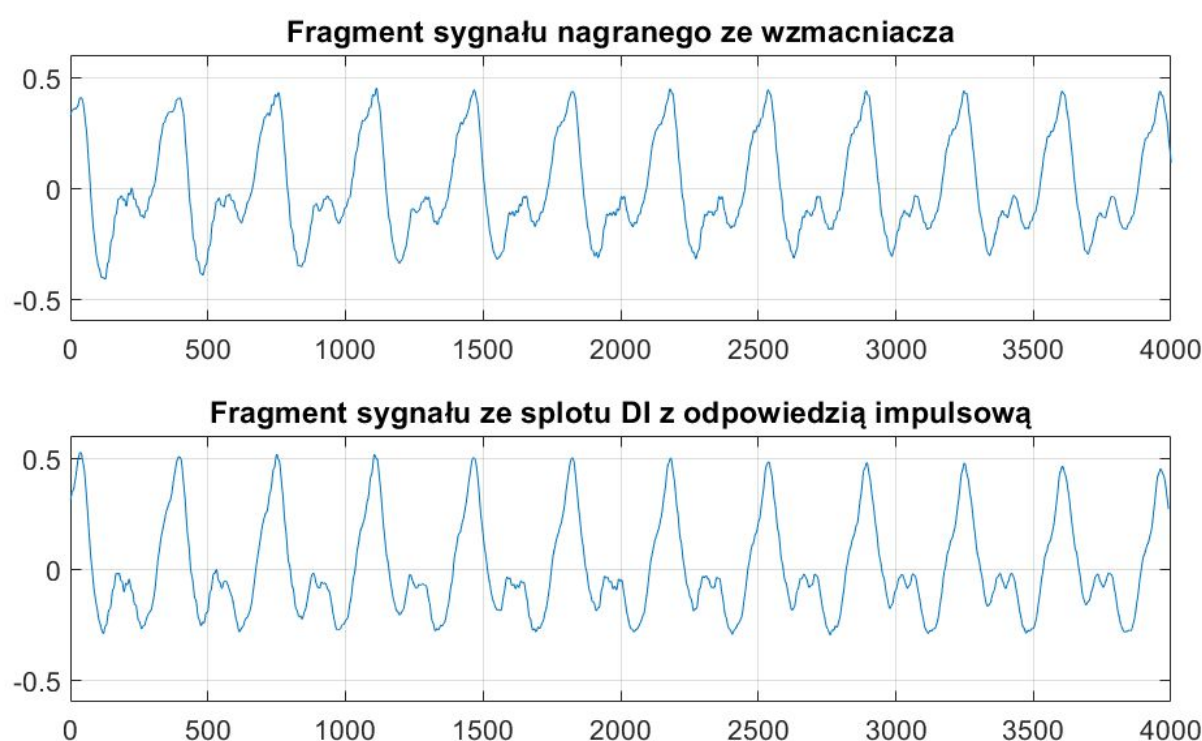
Porównanie

Do oceny brzmienia instrumentu najbardziej niezawodnym narzędziem są nasze uszy, dlatego poniżej znajdują się linki odpowiednio do czystego sygnału gitary, sygnału nagrałego bezpośrednio ze wzmacniacza oraz symulacji wzmacniacza.

- [Bezpośredni sygnał z gitary \(DI - Direct input\)](#)
- [Sygnał zarejestrowany: wzmacniacz - mikrofon](#)
- [Symulacja wzmacniacza \(splot DI z odp. impulsową\)](#)

Brzmienie nagrane bezpośrednio ze wzmacniacza w porównaniu do tego otrzymanego dzięki operacji splotu wyróżnia się większą ilością szczegółów obecnych w wyższych pasmach częstotliwościowych, jest bardziej “krystaliczne”. Jednak bez silnej sugestii, ciężko jest stwierdzić, który z sygnałów wyjściowych został uzyskany w dany sposób, szczególnie w kontekście miksu, gdy pojawią się inne instrumenty. Nic w sygnale uzyskanym “sztucznie” nie sugeruje jego pochodzenia, a “krystaliczność” brzmienia naturalnego można spróbować uzyskać stosując delikatną equalizację.

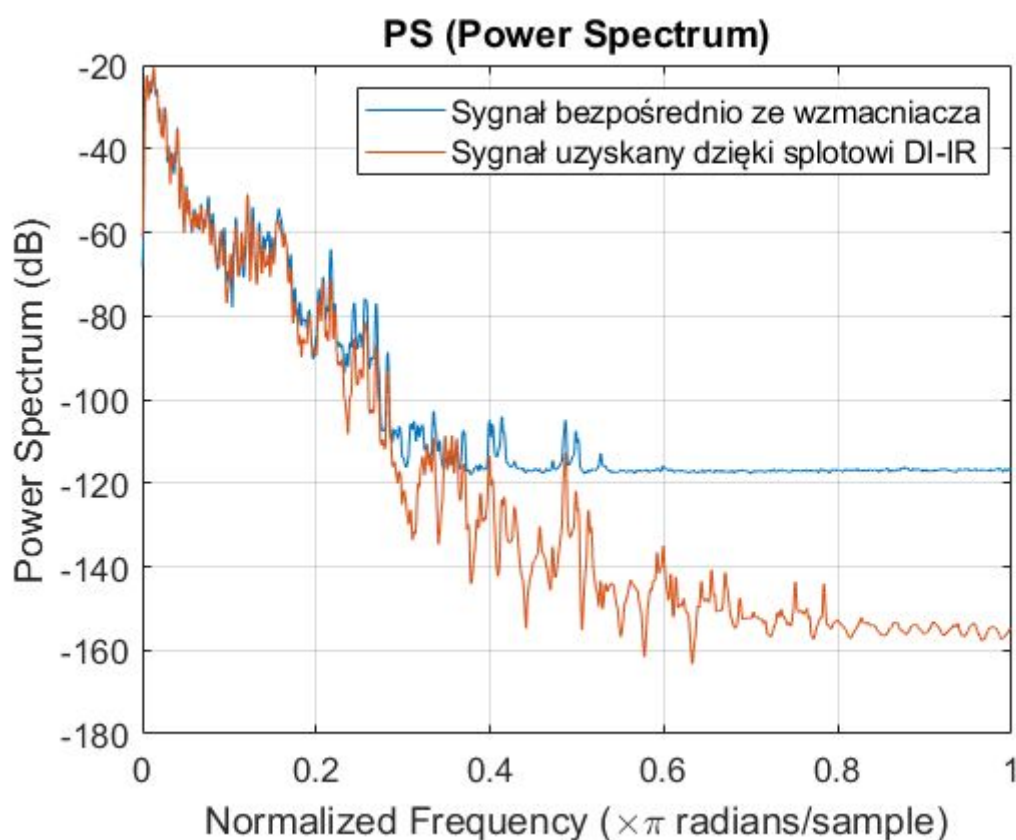
Kolejną słyszalną (szczególnie pod koniec nagrania) różnicą jest mniej szumu w sygnale uzyskanym ze splotu, która jest raczej pożądaną cechą, lecz wiąże się z poprzednią zauważoną niedoskonałością.



Wykresy przedstawiające wycięty krótki fragment sygnału nagrałego bezpośrednio mikrofonem przy wzmacniaczu (wykres górny), oraz ten sam fragment sygnału uzyskanego dzięki splotowi DI gitary z odpowiedzią impulsową wzmacniacza (dolny wykres).

Jak widać na powyższej wizualizacji, charakter sygnału został zachowany. Nie są one jednak identyczne. Pomimo zachowanego ogólnego kształtu, różnią się one szczegółami. Istnieją pomiędzy nimi różnice, które nie są łatwe do usłyszenia ludzkim uchem.

Poniżej znajduje się wykres $|X(f)|^2$ (PS, ang. Power Spectrum) przedstawiający udział konkretnych częstotliwości w sygnałach (ich energię).



Wykres energii sygnału nagrałego mikrofonem przez wzmacniacz oraz sygnału uzyskanego dzięki splotowi DI z IR w funkcji częstotliwości.

Na powyższym wykresie da się zaobserwować zjawisko, które zostało zauważone przy odsłuchu porównawczym obu sygnałów, mianowicie w sygnale uzyskanym dzięki splotowi udział wyższych częstotliwości jest o wiele mniejszy i nie jest tak równomierny jak w sygnale bezpośrednim, oraz spada wraz ze wzrostem częstotliwości. Stały poziom energii w wyższych częstotliwościach sygnału nagrałego bezpośrednio jest wynikiem wpływu szumu wzmacniacza. Do sygnału uzyskanego metodą splotu użyto odpowiedzi impulsowej wzmacniacza nie uwzględniającej tych szumów, skąd może wynikać zauważalna różnica.

Warto jednak zaznaczyć, że metoda odwzorowania brzmienia oryginalnego wzmacniacza użyta w tym doświadczeniu nie jest idealna, gdyż próbujemy modelować złożony nieliniowy tor sygnałowy przy pomocy prostego liniowego filtra FIR (ang. Finite Impulse Response - Filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej).

Dodatkowe zagadnienia

Wpływ długości IR na brzmienie

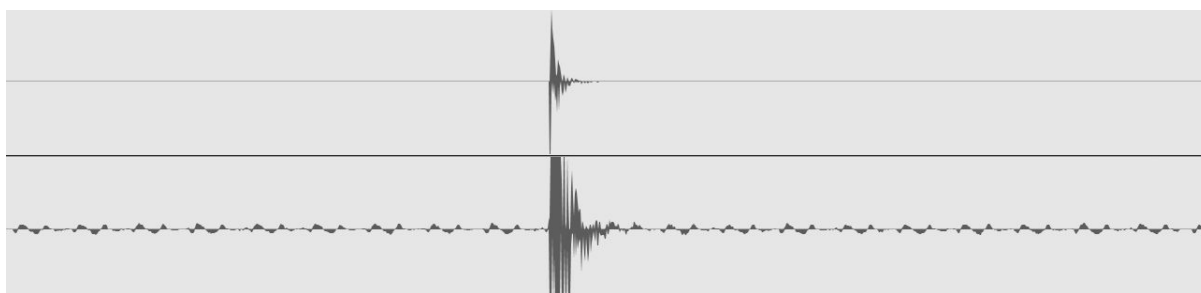
Częstotliwość próbkowania, z jaką zarejestrowano odpowiedź impulsową wpływa na szerokość jej widma. Dla częstotliwości próbkowania równej 44100 Hz, widmo które obserwujemy, będzie rozciągać się aż do częstotliwości Nyquista równej połowie częstotliwości próbkowania, zatem do 22050 Hz.

Natomiast od ilości próbek nagranych IR zależy rozdzielczość częstotliwościowa widma. Innymi słowy: w teorii, im dłuższą odpowiedź impulsową wzmacniacza, tym dokładniejszy wynik filtracji.

Nie możemy jednak powiększać ilości próbek w nieskończoność z dwóch powodów:

- złożoność obliczeniowa rośnie, co niekorzystnie wydłuża latencję przy przetwarzaniu sygnału w czasie rzeczywistym
- praktyczna długość odpowiedzi impulsowej wzmacniacza nie jest nieskończona, po pewnym czasie mikrofon rejestruje jedynie szum wzmacniacza

Poniżej znajduje się wizualna reprezentacja odpowiedzi impulsowej wzmacniacza wygenerowana w programie Studio One 4.5 Pro (dolny wykres jest głośniejszy o 24 dB aby lepiej było widać szumy, nie jest to przesterowany sygnał).



Wizualna reprezentacja IR nagranej w programie Studio One 4.5 Pro.

Jak widać, po chwili od pobudzenia systemu impulsem Diraca, rejestrowany sygnał wygląda tak jak przed zdarzeniem. Są to szumy wzmacniacza.

Użycie odpowiedzi impulsowej uwzględniającej te szumy wprowadza niepożądane zakłócenia do sygnału, co można usłyszeć w próbce w linku poniżej (szczególnie pod sam koniec, kiedy gitara przestaje grać):

- [Symulacja wzmacniacza \(zbyt długa odpowiedź impulsowa\)](#)

Z tego samego powodu nie powinno się uwzględniać w pliku IR informacji zarejestrowanych przed pobudzeniem kolumny impulsem Diraca. Może to wprowadzić duże opóźnienie oraz zniekształcenie sygnału.

- [Symulacja wzmacniacza \(uwzględnione szumy przed oraz po IR\)](#)

Próba odzyskania sygnału bezpośredniego

Możliwe jest odzyskanie sygnału bezpośredniego z gitary (DI), jeśli mamy do dyspozycji nagraną odpowiedź impulsową wzmacniacza (IR) oraz sygnał DI splecionego z IR. Wynika to z poniższych wzorów i przekształceń:

$$y(n) = h(n) * x(n) \quad /FFT \Rightarrow Y(k) = H(k)X(k) \Rightarrow X(k) = \frac{Y(k)}{H(k)} \quad /IFFT$$

ostatecznie: $x(n) = IFFT\left(\frac{Y(k)}{H(k)}\right)$

Dokonano splotu DI z IR, a następnie dzięki powyższym przekształceniom odzyskano DI przy pomocy sygnału wynikowego oraz IR. Porównując DI odzyskane z oryginalnym, można zauważyć że zawiera ono praktycznie takie same składowe częstotliwościowe o takiej samej energii. Drobne różnice (odległość między sygnałami (przestrzeń metryczna) wynosi zaledwie $1,5438 * 10^{-10}$) mogą być wynikiem faktu, że wszystkie operacje dokonywane są w dziedzinie dyskretnej, na urządzeniu o skończonej mocy obliczeniowej, na skutek czego po drodze wykonywane są niesprzyjające wynikom zaokrąglenia. Możemy jednak uznać, że udowodniliśmy poprawność wzorów wykorzystanych w dalszej części.

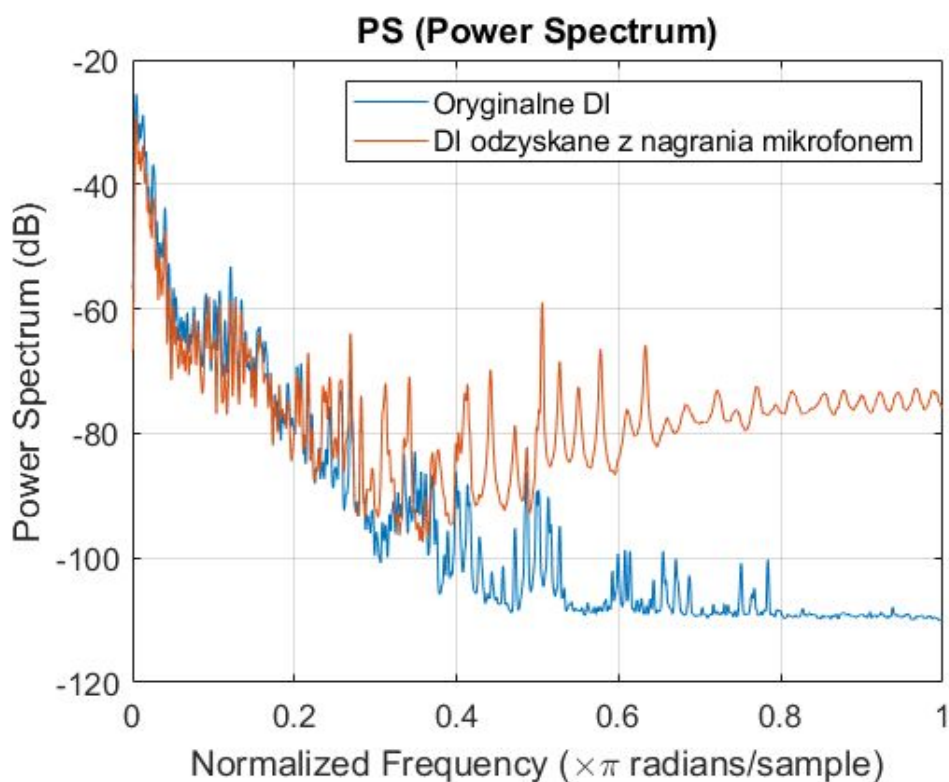
Odzyskanie DI z sygnału nagrałego bezpośrednio mikrofonem przy wykorzystaniu odpowiedzi impulsowej wzmacniacza.

Kolejnym krokiem tej części doświadczenia jest sprawdzenie czy istnieje możliwość odzyskania bezpośredniego sygnału z gitary mając do dyspozycji sygnał przepuszczony przez prawdziwy wzmacniacz nagrany mikrofonem oraz odpowiedź impulsową tego wzmacniacza.

Dzięki podanym powyżej wzorom odzyskano sygnał bezpośredni DI. Poniżej znajdują się linki do wyników doświadczenia:

- [DI oryginalne](#)
- [DI odzyskane z nagrania ze wzmacniacza](#)

Jesteśmy w stanie zidentyfikować dźwięki grane przez gitarę, chociaż zniekształcenia jakie pojawiły się w sygnale są bardzo duże. Nie możemy nazwać tego różnicą w brzmieniu, odzyskany sygnał jest kompletnie zdegradowany i nie nadaje się do użytku. Pojawiły się dodatkowe wysokie składowe częstotliwościowe, których nie ma w oryginale, co najlepiej widać na wykresie znajdującym się poniżej.



Wykres energii oryginalnego DI oraz DI odzyskanego z nagrania mikrofonem.

Aby nieco bardziej zbliżyć się do oryginalnego DI, możemy spróbować zastosować filtrację dolnoprzepustową, co pozwoli pozbyć się nowych niepożądanych częstotliwości i umożliwić lepszą percepcję sygnału DI, którego poszukujemy. Zastosowano filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości odcięcia równej 5.2 kHz, na bazie okna Barletta o długości 1000 próbek.

Poniżej znajdują się linki do porównania wyników:

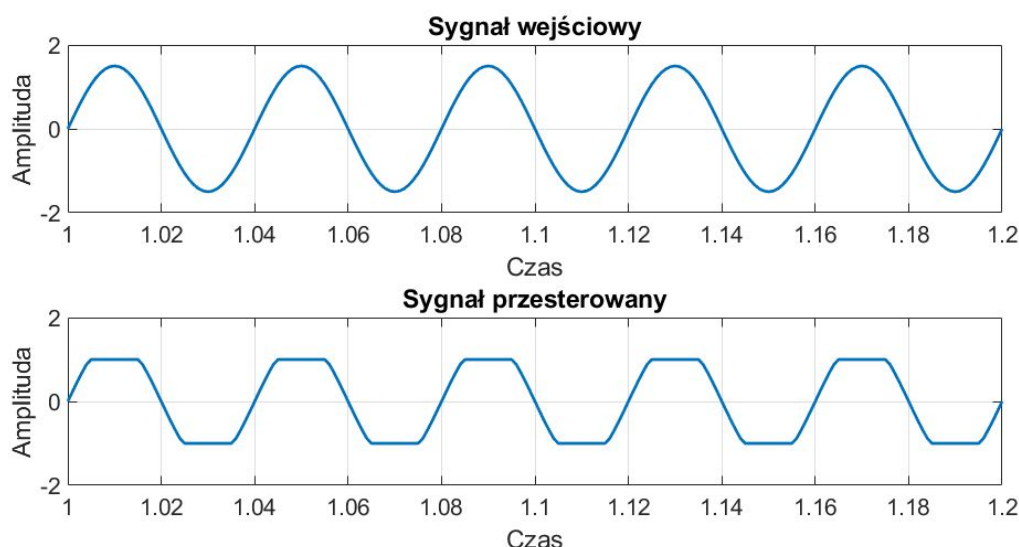
- [DI oryginalne](#)
- [DI odzyskane z nagrania ze wzmacniacza](#)
- [DI odzyskane z nagrania ze wzmacniacza \(po filtracji\)](#)

Można usłyszeć, że po powyższym zabiegu, odzyskany sygnał łatwiej jest już porównywać z sygnałem oryginalnym. Jego charakter jest do niego zbliżony, udało się pozbyć wysokich irytujących częstotliwości. Najbardziej słyszalną różnicą pomiędzy nimi jest utrata informacji zawartych w niskich częstotliwościach, których było zdecydowanie więcej w oryginalnym DI.

Warty uwagi jest fakt, że długość (ilość próbek) odpowiedzi impulsowej wzmacniacza została odpowiednio zoptymalizowana, tak aby odzyskany sygnał DI był jak najbardziej zbliżony do DI oryginalnego (optymalizacja na podstawie przestrzeni metrycznej sygnałów). Takiego IR używano w całym doświadczeniu.

Próba uzyskania przesteru gitarowego

Przester jest wynikiem modulacji sygnału polegającej na obcinaniu wierzchołków sygnału, dzięki czemu pojawiają się w nim płaskie poziome odcinki o stałej amplitudzie. Poniżej znajduje się schematyczne przedstawienie tego zjawiska.



Wykresy przedstawiające sygnał przed i po przesterowaniu.

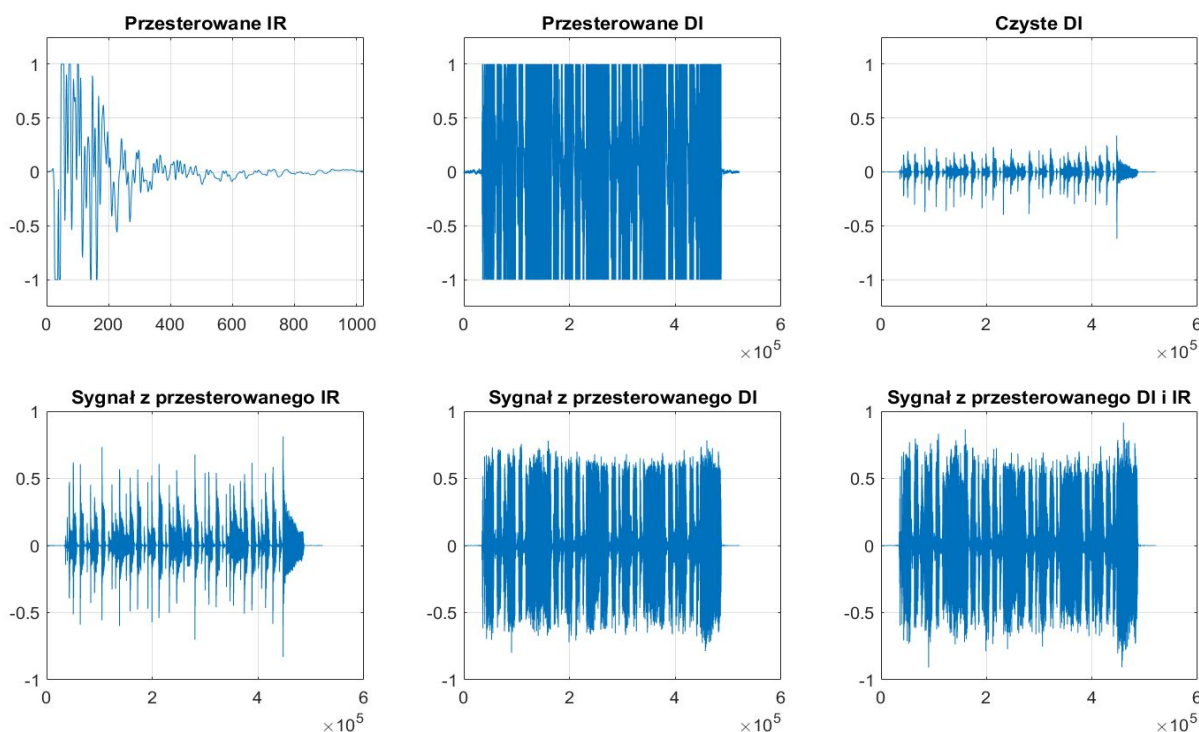
Przesterowanie sygnału jest raczej niekorzystnym zjawiskiem, ponieważ tracimy wtedy informacje, które znajdowały się w ściętych wierzchołkach. Ma ono jednak zastosowanie chociażby w muzyce i obróbce dźwięku. Przester użyty świadomie może mieć wiele zastosowań.

Clipping w cyfrowym przetwarzaniu sygnałów jest zjawiskiem, w którym amplitudy sygnału osiągają wartości -1 i 1.

Proces przesterowania w doświadczeniu polegał na pomnożeniu całego sygnału przez pewną stałą, a następnie nadpisanie wartości każdej próbki większej od 1 jako 1 i analogicznie dla dolnej granicy: jeśli próbka miała wartość mniejszą niż -1, to nadpisywano jej wartość jako -1.

W celach doświadczalnych przesterowano najpierw odpowiedź impulsową wzmacniacza i dokonano jej splotu z DI gitary. Następnie dokonano splotu czystej odpowiedzi impulsowej z przesterowanym DI. Na koniec dokonano splotu przesterowanej odpowiedzi impulsowej oraz przesterowanego DI.

Poszukiwane brzmienie jest częściej spotykane w muzyce bardziej żywej/agresywnej, dlatego do celu tego doświadczenia nagrano nowe DI.



Wykresy przedstawiające wyniki doświadczenia.

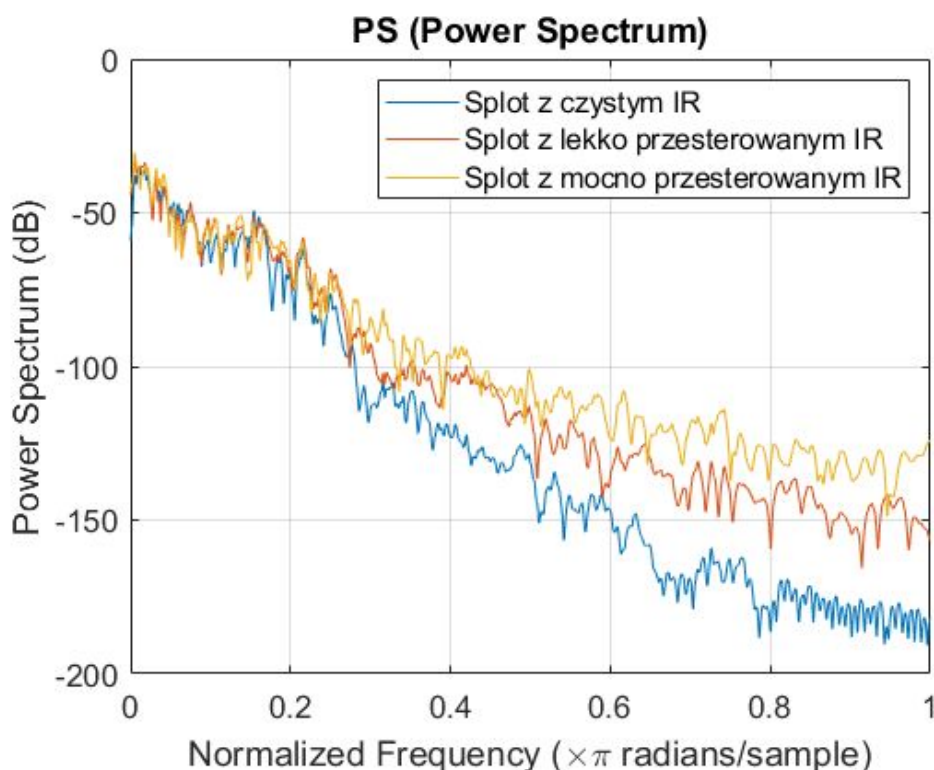
Poniżej znajdują się odpowiednio nazwane linki do wyników doświadczenia:

- [Bezpośredni sygnał z gitary \(DI - Direct Input\)](#)
- [Splot czystego DI z czystym IR \(ang. Impulse Response\)](#)
- [Splot czystego DI z przesterowanym IR](#)
- [Przesterowane DI \(clipping\) - ściszenie słuchawek zalecane](#)
- [Splot przesterowanego DI z czystym IR](#)
- [Splot przesterowanego DI z przesterowanym IR](#)

Przesterowany czysty sygnał nie jest przyjemny dla ucha, co potwierdza stwierdzenie, że niechciany clipping jest niekorzystnym zjawiskiem w przetwarzaniu sygnałów (z tego samego powodu próba przesterowania splecionego już ciągu próbek nie miała sensu).

Natomiast po dokonaniu splotu przesterowanego DI z odpowiedzią impulsową, czyli zasymulowania wpuszczenia do wzmacniacza takiego sygnału, uzyskujemy już nieco inny efekt, zbliżony do efektu **fuzz**, który nie jest obcy naszym uszom (brzmienie podobne do brzmień gitary w muzyce rockowej, metalowej i innych).

Przesterowanie odpowiedzi impulsowej wzmacniacza nie dało pożądanych wyników, natomiast wpłynęło na brzmienie otrzymanego sygnału. Poniżej znajduje się zestawienie wykresów PS (Power Spectrum) splotu czystego DI z odpowiednio: czystym, lekko przesterowanym oraz bardzo mocno przesterowanym IR, ilustrujące zauważalne zmiany.



Wykres energii sygnałów uzyskanych w wyniku splotu DI z IR o różnym stopniu przesterowania w funkcji częstotliwości.

Jak widać na wykresie, przesterowanie odpowiedzi impulsowej wzmacniacza wpływa na brzmienie otrzymanego sygnału w następujący sposób: im bardziej przesterujemy sygnał, tym więcej informacji pojawia się w wyższych częstotliwościach. Wynika to z faktu, że generalnie przesterowanie sygnału skutkuje pojawieniem się w nim dodatkowych składowych harmoniczných. Zgodnie z teorią, przesterowany sygnał, wraz ze wzrostem wzmocnienia coraz bardziej przestaje przypominać sygnał sinusoidalny, co w widmie fourierowskim skutkuje pojawieniem się innych składowych (harmoniczných).

[Link do wizualnej reprezentacji omawianego zagadnienia](#)

Z powyższego zagadnienia dodatkowego można zatem wyciągnąć wniosek, że za symulacje przesterowanego brzmienia w cyfrowych replikach wzmacniaczy odpowiedzialne są algorytmy niekoniecznie związane z samą odpowiedzią impulsową, a ta odpowiada jedynie za brzmienie głośników i kolumny, w jakiej się znajdują. W celu uzyskania różnych, bardziej skomplikowanych modulacji brzmienia (takich jak chociażby rozpatrywany przester), konieczna jest praca nad sygnałem wejściowym przed splataniem go z IR.

Wykorzystanie w praktyce

Aby zweryfikować, czy uzyskane symulacje mogą znaleźć zastosowanie w praktyce, wykonano dwa miksy krótkich fragmentów utworów, w których wszystkie brzmienia gitarowe zostały wygenerowane przy pomocy kodu w Matlabie. Pierwszy utwór wykorzystuje czyste brzmienia (zwykły splot), a drugi dodatkowo implementację przesteru. Poniżej znajdują się odpowiednie linki.

- [Utwór z wykorzystaniem czystych gitar](#)
- [Utwór z wykorzystaniem przesterowanych gitar](#)

Podsumowanie i wnioski

Metoda odwzorowania brzmienia oryginalnego wzmacniacza użyta w tym doświadczeniu nie jest idealna, gdyż próbujemy modelować złożony nieliniowy tor sygnałowy przy pomocy prostego liniowego filtra FIR (ang. Finite Impulse Response - Filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej). Pomimo to, sposób przetwarzania czystego sygnału gitarowego przedstawiony w powyższym doświadczeniu otwiera wiele możliwości brzmieniowych. Nie jest konieczne noszenie ze sobą wszędzie kolumny gitarowej, wystarczy wcześniej uzyskać odpowiedzi impulsowe tych, które chcielibyśmy użyć i zapisać na swoim komputerze. Aby natomiast przetwarzać sygnał na żywo konieczne byłoby użycie splotu blokowego. Software wykonujący to za nas istnieje na rynku od wielu lat (wszelkiego rodzaju IR loadery, czy całe symulacje wzmacniaczy).

Uzyskane symulacje nadają się do wykorzystania w produkcji muzyki, co mam nadzieję że udało się udowodnić dzięki przykładowym załączonym utworom, chociaż jakość (szczególnie przesteru) nie może się równać z bardziej zaawansowanymi symulacjami komercyjnymi (np. Neural DSP, BIAS amp, Amplitube, etc). Oprócz tego na końcowe brzmienie największy wpływ ma to z jakiej kolumny gitarowej pobieramy odpowiedź impulsową. Wzmacniacz użyty w tym doświadczeniu nie jest wzmacniaczem przystosowanym do brzmień przesterowanych i prawdopodobnie, gdyby wykorzystano inną kolumnę, uzyskany efekt końcowy byłby o wiele ciekawszy.

Kod do wygenerowania impulsu Diraca w Matlabie

```
d = [0 0 0 1 0 0 0];  
Fs = 44100;  
audiowrite('Dirac.wav',d,Fs); % Zapis impulsu do pliku wav
```

[Impuls Diraca \(wav\)](#)

[Odpowiedź impulsowa wzmacniacza z doświadczenia \(wav\)](#)