

## 1. Odszumianie (2+0.25 pkt)

Jednym z przykładów zastosowań filtrów adaptacyjnych jest układ odszumiający (ANC – Adaptive Noise Cancelling), wykorzystujący w sposób adaptacyjny zasadę liniowej predykcji. Filtr pozostawia w sygnale tylko składowe, których następne próbki można przewidzieć na podstawie próbek poprzednich – czyli składowe sinusoidalne/deterministyczne (następną próbkę sinusoidy można obliczyć na podstawie dwóch poprzednich próbek). Natomiast inne, losowe (szumowe) – marginalizuje. Innymi słowy filtr adaptacyjny „dostraja” się do dających się przewidzieć składowych deterministycznych. Z powyższego faktu wynika, że metoda ta nadaje się do poprawiania jakości sygnałów złożonych z wielu harmonicznym, takich jak sygnał mowy.

W układzie ANC, sygnałem odniesienia  $d$  jest zaszumiony sygnał, natomiast sygnałem  $x$  ten sam sygnał tylko opóźniony o jedną próbkę. Implementację<sup>1</sup> takiego układu dla kryterium (N)LMS, bez zainicjalizowanych parametrów przedstawiono poniżej.

```
clear;
close all;

dref = ??? % sygnał "czysty" do porównania
d = awgn( dref, 20, 'measured' ); % WE: sygnał odniesienia dla sygnału x
x = [ d(1) d(1:end-1) ]; % WE: sygnał filtrowany, teraz opóźniony d
M = ??? % długość filtru
mi = ??? % współczynnik szybkości adaptacji

y = []; e = []; % sygnały wyjściowe z filtra
bx = zeros(M,1); % bufor na próbki wejściowe x
h = zeros(M,1); % początkowe (puste) wagi filtru

for n = 1 : length(x)
    bx = [ x(n); bx(1:M-1) ]; % pobierz nową próbkę x[n] do bufora
    y(n) = h' * bx; % oblicz y[n] = sum( x .* bx ) - filtr FIR
    e(n) = d(n) - y(n); % oblicz e[n]
    h = h + mi * e(n) * bx; % LMS
% h = h + mi * e(n) * bx / (bx'*bx); % NLMS
end
```

1. Wygeneruj sygnał złożony z dwóch harmonicznym o następujących parametrach: częstotliwość próbkowania:  $f_s=8\text{kHz}$ , czas trwania  $t=1\text{s}$ , amplitudy i częstotliwości odpowiednio:  $A_1=0.5$ ,  $f_1=34.2\text{ Hz}$ ,  $A_2=1$ ,  $f_2=115.5\text{ Hz}$ . Do sygnału dodaj szum AWGN o mocy 10, 20 i 40 dB.
2. Następnie dobierz tak parametry filtru adaptacyjnego aby jednym zestawem parametrów odszumieć jak najlepiej wszystkie 3 wersje sygnału.
3. Zastąp sinusoidę sygnałem z sinusoidalną modulacją częstotliwości SFM:  $f_c = 1000\text{ Hz}$ ,  $\Delta f = 500\text{ Hz}$ ,  $f_m = 0.25\text{ Hz}$ . Zastąp sygnał SFM nagraniem pracy dowolnego, pracującego silnika, np. suszarki do włosów, odkurzacza, lodówki, silnika samochodowego.

Jakość odszumiania wyznacz za pomocą wskaźnika SNR, definiowanego jako iloraz mocy sygnału i mocy szumu (zakłóceń, czyli różnicy pomiędzy sygnałem oryginalnym  $dref(n)$  przed dodaniem szumu a sygnałem po odszumieniu  $y(n)$ ):

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N dref(n)^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N (dref(n) - y(n))^2}$$

gdzie  $N$  to liczba próbek sygnału.

Wyświetl na jednym wykresie sygnał oryginalny, zaszumiony oraz odszumiony.

<sup>1</sup> Tomasz P. Zieliński, Przemysław Korohoda, Roman Rumian,... Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w telekomunikacji, <http://teledsp.kt.agh.edu.pl/>

**Opcjonalnie** (+0.25 pkt) Wczytaj sygnał mowy z pliku `mowa8000.wav`, poddaj go zaszumianiu jak wcześniej i spróbuj znaleźć najlepsze parametry dla filtru adaptacyjnego. Jakość odszumiania wyznacz odsłuchując próbkę mowy. Zwróć uwagę na różnicę w śledzeniu głosek dźwięcznych i bezdźwięcznych. Podczas obliczeń wyświetlaj odpowiedź amplitudowo-częstotliwościową filtru  $h$  oraz widmo gęstości mocy fragmentu ostatnio analizowanego sygnału. Dla głosek dźwięcznych, widma te powinny być zbliżone.

Dodatkowo, zastosuj algorytm adaptacji RLS do powyższych przykładów [PWN, rozdz. 7].

## 2a. Identyfikacja obiektu (1.5 pkt)

## alternatywa dla 2b

Następnym interesującym nas zastosowaniem jest wykorzystanie filtru adaptacyjnego jako układu do identyfikacji obiektu, np.: identyfikacji odpowiedzi impulsowej kanału komunikacyjnego lub akustycznej odpowiedzi impulsowej pomieszczenia, definiującej pogłos w tym pomieszczeniu.

W takim układzie, sygnałem wejściowym  $x$  są próbki sygnału oryginalnego (zazwyczaj sekwencja treningowa), natomiast sygnałem odniesienia  $d$  są próbki po przejściu przez obiekt (często zaszumione), czyli zniekształcone w stosunku do oryginału. Wynikiem adaptacji są wartości wag  $h$  filtru, równe odpowiedzi impulsowej układu. Można ich użyć do analizy lub kompensacji wpływu obiektu na sygnał. I tak, typowa sekwencja danych (ramka) w transmisji bezprzewodowej składa się z pilota oraz danych. Pilot jest znaną sekwencją treningową, na której jest uczony korektor, wykorzystywany później do poprawy zniekształconych sekwencji, zawierających dane.

Jako sygnał wejściowy wykorzystaj próbkę mowy z pliku `mowa8000.wav`. Sygnałem odniesienia niech będzie próbka mowy przefiltrowana filtrem o następującej odpowiedzi impulsowej:

$$h_i = \begin{cases} 0.8 & i = 255 \\ -0.5 & i = 120 \\ 0.1 & i = 30 \\ 0 & i \neq 255, 120, 30 \end{cases} \text{ dla } i=0,1,2,\dots,255$$

Porównaj (na jednym wykresie) estymację odpowiedzi impulsowej uzyskaną z filtru (jego wagi  $h$ ) z odpowiedzią rzeczywistą, zdefiniowaną powyższej.

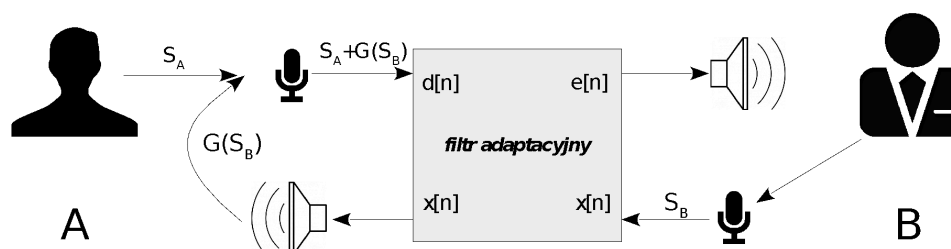
Dobierz parametry filtru adaptacyjnego tak, aby uzyskać jak najbardziej podobne sygnał. Zauważ, że estymatę odpowiedzi impulsowej obiektu obliczyłeś za pomocą sygnału „użytecznego”, a nie sekwencji treningowej.

Powtórz doświadczenie wykorzystując szum biały, a nie sygnał mowy, jako sekwencję treningową.

## 2b. Kasowanie echa (1.5 pkt)

## alternatywa dla 2a

Na poniższym obrazku pokazano instalację głośnomówiącą. Załóżmy, że użytkownicy są połączeni ze sobą dwukierunkowym zestawem telekonferencyjnym oraz że mówią równocześnie. W takim przypadku mikrofon użytkownika  $A$  rejestruje (i wysła do użytkownika  $B$ ) głos użytkownika  $A$  ( $S_A$ ) oraz głos użytkownika  $B$  ( $S_B$ ), transmitowany przez głośnik znajdujący się w pomieszczeniu  $A$ . Dodatkowo, sygnał  $S_B$  jest zmodyfikowany nieznaną transmitancją  $G$ , czyli funkcją przejścia układu



głośnik-pokój-mikrofon.

Układ adaptacyjny działający w części  $A$ , zna sygnał  $S_B$  (odbiera go od  $B$ ) oraz sygnał  $S_A + G(S_B)$ , który jest rejestrowany przez mikrofon. Jeżeli sygnał  $S_A + G(S_B)$  potraktujemy jako zaszumiony sygnał odniesienia  $d$ , natomiast  $S_B$  jako sygnał wejściowy  $x$ , to na wyjściu  $e$  filtru adaptacyjnego otrzymamy odszumiony sygnał  $S_A$ . Dzięki temu układ nadajnika  $A$  transmituje do  $B$  sygnał pozbawiony echa.

Wykonaj i przetestuj układ kasowania echa dysponując następującymi sygnałami:

$S_A$ : `mowa_1.wav`, sygnał do porównania, w rzeczywistości sygnał  $S_A$  jest niemożliwy do zarejestrowania,  
 $S_B$ : `mowa_2.wav`,  
 $S_A + G(S_B)$ : `mowa_3.wav`.

### 3. Pętla PLL (1.5+1 pkt)

Zanim zastosujesz PLL w praktyce, sprawdź czy działa na syntetycznym sygnale. W tym celu:

1. Wygeneruj sygnał udający pilota 19 kHz o stałym przesunięciu fazowym i sprawdź, czy adaptacyjny oscylator się do niego dostroi.
2. Wygeneruj sygnał j.w. tylko niech częstotliwość pilota dodatkowo wolno się zmienia sinusoidalnie:  $\pm 10$  Hz ( $d_f=10$  Hz) jeden raz na 10 sekund ( $f_m=0.1$  Hz). Sprawdź czy adaptacyjny oscylator dostroi się do pilota.
3. Sprawdź szybkość zbieżności pętli PLL. W tym celu do sygnału z pkt. 1 dodaj szum AWGN o mocy: 0, 5, 10 i 20 dB. Znajdąc sygnał oczekiwany (wzorcowy), określ po ilu próbkach oscylator dostroił się do sygnału.

Poniżej przedstawiono fragment programu realizującego cyfrową pętlę PLL. Sygnałem wejściowym jest wektor `p`. Przykładowy sygnał harmoniczny o 3 razy większej częstotliwości (trzecia harmoniczna) niż śledzony sygnał został wygenerowany w zmiennej `c57`.

```
% Pętla PLL z filtrem typu IIR do odtworzenia częstotliwości i fazy pilota [7]
% i na tej podstawie sygnałów nośnych: symboli c1, stereo c38 i danych RDS c57
freq = 2*pi*f_pilot/fs;
theta = zeros(1,length(p)+1);
alpha = 1e-2;
beta = alpha^2/4;

for n = 1 : length(p)
    perr = -p(n)*sin(theta(n));
    theta(n+1) = theta(n) + freq + alpha*perr;
    freq = freq + beta*perr;
end

c57(:,1) = cos(3*theta(1:end-1)); % nosna 57 kHz
```

**Opcjonalnie** (+1 pkt): Do dekodowania stereofonicznego radia FM należy zrekonstruować sygnały L+R oraz L-R (patrz laboratorium 07), a następnie dodać je i odjąć od siebie. Nawet dla niewielkich przesunięć fazowych pomiędzy sygnałami L+R i L-R, dekodowanie sygnału stereo nie powiedzie się!

Dlatego też oprócz kompensacji opóźnień wprowadzanych przez filtry FIR należy również dokładnie odtworzyć częstotliwość oraz fazę sygnału nośnego dla komponentu L-R w celu przesunięcia go do pasma podstawowego. Wykorzystaj przykład z pliku `fm_dekoder_stereo.m` dekodujący sygnał stereo z syntetycznych danych zamieszczonych w laboratorium 07.

4. Wygeneruj sygnał pilota `c38` o częstotliwości 38 kHz (podwojona wartość pilota 19 kHz znajdującego się w sygnale hybrydowym) bez pętli fazowej. Sprawdź separację pomiędzy kanałem L i R.
5. Sprawdź separację kanałów dla częstotliwość pilota na 38001 Hz. Następnie wróć do 38 kHz, zmień fazę pilota i ponownie zweryfikuj separację kanału
6. Zastosuj adaptacyjną pętlę synchronizacji z sygnałem pilota `c19` (19 kHz) i wykorzystaj wynik jej pracy do wygenerowania poprawnego sygnału nośnego `c38`. (38 kHz), czyli sygnału o podwojonej częstotliwości. Sprawdź separację kanałów dla tej wersji dekodera stereo.
7. Zastosuj program bez pętli PLL i z pętlą PLL do sygnału radiowego, w którym pilot w nadajniku: a) opóźnia się o stały kąt fazowy, b) odstroił się od 19kHz, c) suma a) + b). W tym celu spróbuj odtworzyć nagrania FM: `stereo_fm_broken_pilot_a.mat`, `stereo_fm_broken_pilot_b.mat`, `stereo_fm_broken_pilot_c.mat` (sekwencje zawierają takie same dane jak `stereo_samples_fs1000kHz_LR_IQ.mat`). Wyświetl spektrogram sygnału hybrydowego dla wersji „b”. Sprawdź czy widoczne są zmiany częstotliwości pilota.

Opis i wyprowadzenie algorytmu synchronizacji z pilotem jest w dokumencie „[FM\\_SynchoPilot.pdf](#)”.

### 4. Usuwanie sygnału elektrycznego z sygnału EKG (0.5 +0.75 pkt)

Pobierz z Internetu zapis EKG elektrycznej aktywności serca, np. ze stron <https://physionet.org/about/database/>, [https://github.com/mathworks/physionet\\_ECG\\_data](https://github.com/mathworks/physionet_ECG_data), albo użyj sygnału `EKG100.mat` dołączonego do instrukcji.

Dodaj do niego sinusoidę o częstotliwości 50 Hz lub 60 Hz, udającą przydźwięk sieciowy (interferencję). Spróbuj zmniejszyć/usunąć to zakłócenie poprzez zastosowanie filtra adaptacyjnego, pracującego w układzie usuwania interferencji.

**Opcjonalnie** (+0.75 pkt) Dodaj do niego szum gaussowski (`randn()`), uprzednio przefiltrowany wybranym filtrem dolnoprzepustowym, symulujący sygnał elektryczny skórczu mięśni. Znajdź w Internecie informację na temat maksymalnej częstotliwości sygnału skórczu mięśni. Zastosuj filtr adaptacyjny do zmniejszenia zakłócenia sygnału EKG, pracujący w układzie: 1) adaptacyjnego usuwania interferencji, 2) adaptacyjnej liniowej predykcji. Która struktura filtra okazała się lepsza/skuteczniejsza?