

Dr hab. inż. Lucyna Leniowska, prof. UR

Rzeszów, 10. 05. 2022 r.

Zakład Mechatroniki i Automatyki

Kolegium Nauk Przyrodniczych

Uniwersytet Rzeszowski

Recenzja pracy doktorskiej

Tytuł rozprawy: ***Aktywna eliminacja składowych tonalnych sygnałów akustycznych***

Autor rozprawy: **mgr inż. Michał Łuczyński**

Promotor rozprawy: **Prof. dr hab. inż. Andrzej Dobrucki**

Dziedzina: nauki techniczne

Dyscyplina: Elektronika

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Łuczyńskiego, która została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja Dziedzica, wyrażone w piśmie RDN-AEE/34/2022 z dnia 03.03. 2022 r.

1. Ogólna charakterystyka pracy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska podejmuje temat zastosowania algorytmów aktywnej redukcji hałasu do eliminacji wybranych składowych częstotliwościowych sygnałów akustycznych o charakterze tonalnym. To tematyka istotna i aktualna, zarówno z poznawczego jak i z aplikacyjnego punktu widzenia. Dysertacja napisana jest w języku polskim, zawiera łącznie 162 strony i składa się z 8 rozdziałów, poświęconych kolejno:

Rozdział 1, wstępny, zawiera wprowadzenie do tematu i omówienie zawartości całej rozprawy.

W **Rozdziale 2**. sformułowano tezę a także przedstawiono cel badań.

RDN AEE / 63 / 2022 J.

Rozdział 3. poświęcono omówieniu metod aktywnych redukcji hałasu. Autor przedstawił rys historyczny rozwoju metod, ich fizyczne podstawy oraz czynniki które mają istotny wpływ na kompensację sygnału pierwotnego; omówił także szczegółowo dwa zasadnicze podejścia stosowane w aktywnej redukcji hałasu, a mianowicie metody typu *feedback* i *feedforward* oraz ich warianty.

Rozdział 4. zawiera opis sygnałów, których charakter można określić jako tonalny. Doktorant podał przykłady źródeł, które wykazują charakter tonalny, omówił normy dotyczące hałasu tonalnego oraz dokonał podziału sygnałów tonalnych na klasy.

Rozdział 5. poświęcono omówieniu algorytmów służących do estymacji wartości parametrów składowych tonalnych, które następnie są podstawą do syntezy sygnału kompensującego. Autor przedstawił trzy takie algorytmy:

- algorytm wykorzystujący Dyskretną Transformatę Fouriera (DTF),
- algorytm oparty na Szybkiej Transformacie Fouriera (FTT),
- algorytm bazujący na detekcji przejść przez zero składowej tonalnej.

Rozdział zawiera istotniejszą część badań Doktoranta, polegającą na ocenie błędów estymacji parametrów dla różnych sygnałów tonalnych z wykorzystaniem w/w algorytmów, z dodatkowymi modyfikacjami w postaci zastosowania metod interpolacji i techniki *zero-padding*.

Rozdział 6. prezentuje finalną część badań Doktoranta, a mianowicie syntezę sygnałów kompensujących (uzyskaną z wykorzystaniem omówionych wcześniej algorytmów) oraz wyniki eliminacji składowych tonalnych w sygnale pierwotnym po zastosowaniu syntezy sygnału kompensującego. Analizowano dwie metody kompensacji sygnału wyjściowego: eliminacja w bieżącej ramce i eliminacja w kolejnej ramce.

Rozdział 7. zawiera przykłady zastosowania analizowanych algorytmów aktywnej redukcji składowych tonalnych. Przykłady dotyczą usuwania przydźwięku sieciowego z nagrania, usuwania składowych tonalnych z sygnału mowy, usuwania sprzężenia akustycznego, redukcji niskoczęstotliwościowej składowej tonalnej hałasu wentylatora oraz eliminacji składowej tonalnej w dźwięku pochodzącym od silnika spalinowego przy zwiększaniu liczby obrotów.

Rozdział 8. to krótkie podsumowanie, w którym Doktorant przedstawił w sposób syntetyczny wykonane prace i uzyskane rezultaty.

Rozprawę uzupełnia spis literatury, który liczy 148 pozycji. Literatura przedmiotu cytowana przez Autora jest zasadniczo właściwie dobrana i w większości anglojęzyczna. Układ pracy jest poprawny. Treści rozprawy zostały logicznie podzielone na rozdziały, a ich zawartość i zakres nie budzi zastrzeżeń.

2. Oryginalne osiągnięcia pracy

Zagadnienia poruszone w dysertacji dotyczą aktywnej redukcji dźwięków. To nurt badań określany anglojęzyczną nazwą *Active Noise Control* (ANC). W zakresie badań ANC spotykamy zazwyczaj jedno z dwóch podejść do rozwiązania problemu:

- zastosowanie konfiguracji typu *feedforward* i związanych z nią algorytmów,
- zastosowanie konfiguracji typu *feedback* i odpowiednio strojonych regulatorów.

Możliwe jest też zastosowanie konfiguracji hybrydowej, łączącej oba wymienione wyżej podejścia.

W pracy doktorskiej Autor proponuje rozwiązanie, w którym do aktywnej eliminacji wybranych składowych tonalnych, zastosował algorytmy estymacji ich parametrów, a następnie dokonał syntezy sygnału tzw. „wtórnego” (kompensującego), który eliminuje te składowe w sposób aktywny, w procesie sumowania sygnałów oryginalnego i „wtórnego”.

Cel rozprawy został sformułowany następująco:

„Celem pracy było opracowanie algorytmów służących do eliminacji składowych tonalnych w sygnałach akustycznych. Skuteczna eliminacja tych składowych polega na takim przetworzeniu sygnału, aby w sygnale wyjściowym nie wystąpiły składowe tonalne obecne w sygnale wejściowym”.

Na potrzeby realizacji tak sformułowanego celu Doktorant sformułował następującą tezę:

„Możliwe jest opracowanie efektywnych algorytmów aktywnej redukcji hałasów tonalnych wykorzystujących parametry tonalności”.

Doktorant dążył do udowodnienia tej tezy w trzech następujących krokach:

1. Zaproponował, przetestował i ocenił skuteczność trzech algorytmów do estymacji wartości parametrów składowych tonalnych. Są to:

- a. algorytm wykorzystujący Dyskretną Transformatę Fouriera (DTF), o ilości próbek dopasowywanej do częstotliwości składowej tonalnej sygnału wejściowego;
 - b. algorytm oparty na Szybkiej Transformacie Fouriera (FTT),
 - c. algorytm bazujący na detekcji przejść przez zero składowej tonalnej.
2. Opracował metody, które umożliwiają syntezę sygnałów „wtórnych” (kompensujących) i prowadzą do eliminacji składowych tonalnych w sygnale pierwotnym po zastosowaniu syntezywanego sygnału wtórnego. Rozważył przy tym dwie metody dodania sygnału kompensującego do sygnału pierwotnego, a mianowicie:
- a. w bieżącej ramce – następuje tu zarówno estymacja parametrów jak i wyznaczenie sygnału „wtórnego”
 - b. w kolejnej ramce, przy czym wyznaczenie parametrów składowej tonalnej następuje w ramce bezpośrednio poprzedzającej dodanie sygnału „wtórnego”.
3. Dokonał weryfikacji działania algorytmów na konkretnych przykładach, poprzez zastosowanie ich do usuwania przydźwięku sieciowego z nagrania, usuwania składowych tonalnych z sygnału mowy, usuwania sprzężenia akustycznego, redukcji niskoczęstotliwościowej składowej tonalnej hałasu wentylatora oraz eliminacji składowej tonalnej w dźwięku pochodzącym od silnika spalinowego przy zwiększaniu liczby obrotów. Nie są to jednak ścisłe dowody.

Zaprezentowane przykłady nie wyczerpują wprawdzie wszystkich możliwych sytuacji zastosowania aktywnej kompensacji składowych tonalnych, warto jednak zauważyć, że są one reprezentatywne dla szerokiej grupy problemów. We wszystkich opisanych przykładach opracowane algorytmy działają, skutecznie redukując wybrane składowe tonalne. Doktorant szczegółowo omawia potencjalne problemy, jakie można napotkać przy estymacji i syntezie sygnału kompensującego, wskazując na ich wzajemne zależności. Ponadto Autor proponuje wzbogacenie algorytmów o dodatkowe obliczenia, polegające np. na wprowadzeniu interpolacji parabolicznej. Wiadomo jednak, że istnieją zdecydowanie lepsze metody interpolacji sygnałów czasowych, o nieco wyższej złożoności obliczeniowej, ale zapewniające błąd nawet o dwa rzędy niższy. Doktorant jednak nie odniósł się do istniejących możliwości. Na uwagę zasługuje metoda umożliwiająca określenie minimalnych długości próbek, pozwalająca na wyekstrahowanie składowych tonalnych, szczególnie, jeśli leżą one

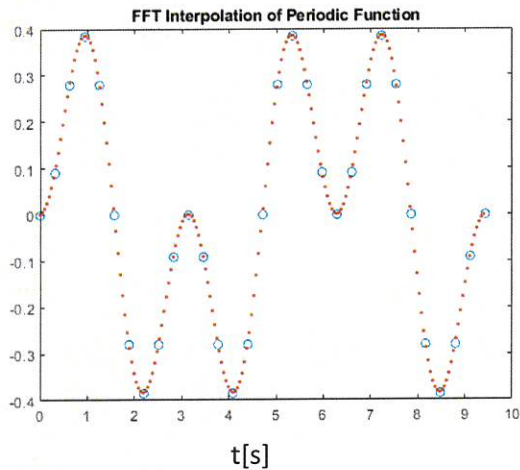
w widmie blisko siebie. Trudno jednak w pełni docenić pracę Doktoranta w sytuacji, gdy nie opisuje on dokładnie środowiska programistycznego, użytych bibliotek i funkcji.

Wymienione osiągnięcia mogą stanowić podstawę do dalszych badań i wnoszą wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny elektronika.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Poniżej wymieniam kilka uwag krytycznych lub dyskusyjnych, które nasunęły mi się po przeczytaniu pracy:

1. Doktorant nie zestawił w pracy swoich autorskich osiągnięć. Nie jest wystarczająco jasne, co jest własnym wkładem Autora w proponowane metody, a co zostało zaczerpnięte z prac innych badaczy?
2. W pracy poświęconej opracowaniu algorytmów nie znalazłam żadnej informacji na temat ich implementacji. W związku z tym nasuwają się pytania:
 - a. W jakim środowisku programowym wykonano testy przedstawione w dysertacji?
 - b. Które fragmenty algorytmów Autor kodował osobiście i w jakim języku programowania?
3. W zakresie prowadzonych badań, jakość kodu, czyli sposób zapisu opracowanych algorytmów w języku programowania, może mieć istotny wpływ na otrzymywane wyniki. Niestety praca nie zawiera żadnego komentarza na ten temat. Tymczasem dostępne są różne algorytmy szacowania parametrów przebiegów, dla których wyznaczono FTT/DFT, np.: <https://dspguru.com/dsp/howtos/how-to-interpolate-fft-peak/>. Ponadto środowiska takie jak Matlab, czy biblioteki w Phytonie, zawierają funkcje pozwalające w łatwy sposób sterować procesem aproksymacji amplitudy w funkcji częstotliwości. Czy Autor próbował przeprowadzić porównanie swoich metod z jakimiś znanymi algorytmami bibliotecznymi?
4. Algorytm z rys. 36 zawiera dwie pętle, jedna uruchamiana jest wtedy, gdy nie spełniono warunku maksimum amplitudy. Algorytm tak zbudowany będzie miał różne czasy wykonania, co obniża jego wartość dla zastosowań typu *Real Time*. Czy Autor ma pomysł jak temu zaradzić?
5. Do dyskusji: jak zachowa się algorytm z rys.88 dla sygnału o dwóch częstotliwościach (pokazanego na Rys.1.), gdzie występuje detekcja zera (wielokrotna), a sygnał nie jest zaszumiony?



Rys.1.

6. W pracy opisano przykłady zastosowania omawianych algorytmów. Niestety nie wspomniano o sprzęcie, jakiego należy użyć, aby umożliwić kompletne przetworzenie danych w czasie rzeczywistym. Dla częstotliwości próbkowania 48 kHz opóźnienie systemu wynosi około 21 μ s, a to wysokie wymagania, biorąc pod uwagę ilość operacji, jakie należy wykonać. Jaki jest szacowany czas wykonania algorytmów z rys. 36, 56 i 88 dla konkretnego procesora, np. DSP TI z serii C7x lub bardziej popularnego Raspberry Pi 4, 4x ARM-8 Cortex-A72 1,5 G ?

4. Uwagi natury redakcyjnej

Praca jest zasadniczo zredagowana poprawnie, ale zawiera kilka usterek gramatyczno-stylistycznych. Oto niektóre z nich:

s. 23₂ Jest: „...do każdego mikrofonów będącego elementem systemu”, powinno być: „...do każdego mikrofonu będącego elementem systemu”.

s. 25⁸ Jest: „... ze względu na zakres..”, powinno być: „... ze względu na zakres..”

s. 26¹⁰ Jest: „Least Mean Square”, powinno być: „Least Mean Squares”.

s. 27¹ Jest: „...który odpowiada sygnału kompensowanemu”, powinno być: „który odpowiada sygnałowi kompensowanemu”.

s. 42¹³ Jest: „... kiedy można nazywać daną składową jako składową tonalną”, lepiej tak: „kiedy można daną składową nazywać *składową tonalną*”.

s. 79₅ Jest: „... dla jakiej minimalnej długości DFT jest pewność identyfikacja obu składowych tonalnych niezależnie od wartości faz początkowych”, lepiej tak: „...dla jakiej minimalnej długości DFT osiąga się pewność poprawnej identyfikacji obu składowych tonalnych niezależnie od wartości faz początkowych”.

s. 79₂ Jest: „...w tabeli umieszczone informację jaka część okresów składowych 127 Hz i 254 Hz mieszczą się w oknach...”, lepiej tak: „...w tabeli umieszczono informacje, mówiące o tym jaka część okresów składowych 127 Hz i 254 Hz mieści się w oknach...”.

s. 145₁₁ Jest: „Ostatnim przykładem jest zastosowanie algorytmu estymacji bazującego na detekcji przejść przez zero sygnału filtrowanego i eliminacją w bieżącej ramce do analizy sygnału.”, lepiej tak: „Ostatnim przykładem jest zastosowanie algorytmu estymacji, który bazuje na detekcji przejść przez zero sygnału filtrowanego i eliminuje składową tonalną w bieżącej ramce”.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że Doktorant dowiódł postawionej tezy, wnosząc tym samym wkład w rozwój dyscypliny *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika*. Uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Łuczyńskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą Ustawę i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

