

Warszawa, 2020-08-10

Prof. dr hab. inż. Remigiusz J. RAK
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej
i Systemów Informacyjno-Pomiarowych
POLITECHNIKA WARSZAWSKA

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Jarmołowicza
nt.: "Metody interpolacyjne w algorytmach zmiany częstotliwości próbkowa-
wania sygnałów dyskretnych"**

1. Tematyka rozprawy

W miarę rozwoju technik cyfrowego przetwarzania sygnałów, coraz bardziej aktualne stają się problemy analizy sygnałów dyskretnych, które zostały zarejestrowane i zapisane w postaci cyfrowej dawno temu. Przyczyną tych problemów jest zwykle niedopasowanie wartości częstotliwości próbkowania do aktualnych warunków. Rodzi się potrzeba przepróbkowania sygnału dyskretnego, bez znajomości jego analogowego prototypu. Dotyczy to szerokiego spektrum sygnałów diagnostycznych, sejsmologicznych, medycznych, telekomunikacyjnych, itp. W zależności od potrzeb, metody przepróbkowania optymalizuje się pod kątem jakości przetwarzania, możliwości pracy w czasie rzeczywistym oraz zapotrzebowania na moc obliczeniową lub pamięć. Pociąga to za sobą szybki rozwój badań w tym obszarze.

Taki wybór tematu pracy dobrze rokuje, trzeba jednak mieć świadomość, że ma także swoje ujemne strony. Polegają one na tym, że Autor godzi się na to, że jego dokonania porównywane będą z osiągnięciami wytrawnych, doświadczonych badaczy, od lat publikowanymi w obszernej literaturze dotyczącej cyfrowego przetwarzania sygnałów. Ponadto, trzeba pamiętać, że badania w obszarze przepróbkowania stają się coraz to bardziej specjalistyczne i żmudne, przynoszą coraz mniej wymiernych korzyści. Należy rozumieć, że Autor godzi się na te warunki.

Zgodnie z deklaracją złożoną przez Autora, głównym celem Jego badań było wypracowanie takich modyfikacji wybranych algorytmów przepróbkowania sygnałów, które pozwolą uzyskać redukcję błędów, a następnie wykazanie przydatności tych algorytmów do przypadków, w których dokładność przetwarzania ma szczególne znaczenie.

Praca zawiera aż cztery tezy, przytoczone tu w wersji autorskiej:

1. *interpolacja spektralna, działająca w oparciu o zmianę długości widma sygnału wejściowego, generuje mniejsze zniekształcenia niż algorytmy operujące w dziedzinie czasu dyskretnego i jest podatna na modyfikacje,*
2. *istnieje możliwość przeprowadzenia takiej korekcji widma sygnału wejściowego, aby uzyskać lepsze odzwierciedlenie cech charakterystycznych dla spektrum sygnału idealnie przepróbkowanego, a tym samym zwiększyć dokładność resamplingu widmowego,*
3. *w przypadku upsamplingu realizowanego w dziedzinie częstotliwości, odpowiednia eliminacja skokowych zmian amplitudy pomiędzy spektrum oryginalnym a dopisanym wektorem zerowych próbek zwiększa dokładność działania algorytmu.*
4. *jakość działania dowolnych algorytmów zmiany szybkości próbkowania zależy od struktury częstotliwościowej sygnału.*

2. Najważniejsze wyniki uzyskane w pracy

Tekst pracy podzielony jest na siedem rozdziałów. We wstępnej części pracy, po streszczeniach i spisie treści, znajduje się wykaz wybranych oznaczeń i skrótów. Sprawia to wrażenie systematyczności, która zasadniczo kontynuowana jest w zakresie tworzenia kolejnych rozdziałów pracy. Rozdział 1 stanowi wstęp, w którym sformułowano cel i tezy pracy.

Rozdział 2 zawiera opisy różnych metod próbkowania sygnałów rzeczywistych z uwzględnieniem parametrów czynników wpływających na ich działanie. Dotyczy to ekspansji i kompresji częstotliwości próbkowania, filtracji cyfrowej, różnych typów interpolacji oraz przetwarzania łącznego C/A–A/C.

W rozdziale 3, zaprezentowane zostały wyniki pomiaru poziomu zniekształceń generowanych przez omawiane metody w funkcji między innymi takich czynników jak położenie i szerokość pasma sygnałów, krotność próbkowania, czas trwania sygnału. Na ich podstawie, wyznaczona została klasyfikacja jakościowa wszystkich rozpatrywanych, w poprzednim rozdziale algorytmów. Sygnały użyte do testowania generowane były jako superpozycja określonej liczby fal sinusoidalnych. Parametry sinusoid były losowe. W konkluzji Autor stwierdził, że najdokładniejsze okazały się te metody działające w obszarze widma. Błędy mierzone dla metod działających w dziedzinie czasu były dwudziesto-, a nawet trzydziestokrotnie większe. Ten fakt Autor uznał za potwierdzenie pierwszej tezy rozprawy.

Rozdział 4 zawiera opis autorskich metod modyfikacji algorytmów próbkowania widmowego prowadzących do poprawy ich dokładności. Pierwsza z metod opiera się na wykorzystaniu, specyficznej dla próbkowania, relacji widm sygnału wejściowego i wyjściowego. Kluczową operacją jest zmiana szerokości widma sygnału wejściowego do wartości właściwej dla przebiegu z docelową częstotliwością próbkowania. Pozwala to na dokonanie na zmodyfikowanym widmie odwrotnej dyskretnej transformacji Fouriera i uzyskanie wyjściowego przebiegu czasowego. Jak wykazał Autor, zmiana dotyczy jedynie szerokości widma. Użyta została w tym celu funkcja korekcji, będąca interpolacją relacji widm. W opinii Autora, opisana metoda stanowi potwierdzenie drugiej tezy rozprawy.

Kolejna modyfikacja próbkowania widmowego zrealizowana była poprzez sztuczne wydłużenie sygnału wejściowego w dziedzinie czasu, przy zachowaniu zgodności rozdzielczości widmowej dla oryginalnej i docelowej częstotliwości próbkowania. Ze względu na rozkład błędów generowanych przez algorytmy próbkowania widmowego w dziedzinie czasu, w którym występuje wzrost błędów dla skrajnych próbek sygnału, symetryczne wydłużenie sygnału korzystnie wpływa na jakość przetwarzania. Ostatecznie autorska metoda, określona jako *zmodyfikowany podstawowy algorytm resamplingu widmowego* (ZPARW) - obejmuje, symetryczne wydłużenie w dziedzinie czasu sygnału wejściowego oraz zastosowanie dynamicznej korekcji widma.

W rozdziale 5 przedstawione zostały wyniki testów przeprowadzonych dla zmodyfikowanego algorytmu próbkowania widmowego oraz najdokładniejszych pięciu metod według autorskiej klasyfikacji. Obejmują one pomiary dokonane dla szerokopasmowych sygnałów cyfrowych o znanym prototypie analogowym. W zdecydowanej większości testów, zmodyfikowany algorytm próbkowania widmowego ZPARW został sklasyfikowany jako najbardziej dokładny. Algorytm ten okazał się również najbardziej dokładny przy przetwarzaniu sygnałów rzeczywistych. Warto zaznaczyć, że pomiary jakości przetwarzania dokonane przy użyciu sygnałów rzeczywistych wymagały oryginalnego, dosyć złożonego podejścia. Dla uzyskania przebiegu referencyjnego, konieczna była jednoczesna rejestracja sygnału przez dwa identyczne urządzenia, pracujące na różnych częstotliwościach próbkowania. Udało się to uzyskać Autorowi z użyciem oscyloskopu cyfrowego.

W rozdziale 6 opisane są *nietypowe* zastosowania opracowanych metod. Dotyczą one optymalizacji struktury widmowej sygnałów używanych w diagnostyce urządzeń i w medycynie, skalowania obrazów cyfrowych oraz generowania dźwięków w oparciu o pojedynczy ton

podstawowy. Jednym z nich jest eliminacja przecieków widma, które zdaniem Autora, poprzez przepróbkowanie, można zredukować o wiele skuteczniej niż przy użyciu okien czasowych. Innym nietypowym zastosowaniem jest użycie jednowymiarowych algorytmów przepróbkowania do skalowania obrazów cyfrowych. Kolejny przykład to sposób na uzyskanie dowolnej wysokości dźwięków generowanych przez urządzenia cyfrowe w oparciu o pojedynczy ton podstawowy.

Rozdział 7 to bardzo wyczerpujące podsumowanie i interpretacja uzyskanych wyników.

Bibliografia zawiera 99 pozycji.

Po dokładnym przestudiowaniu rozprawy i opisów zawartych w niej koncepcji stwierdzam, że praca w dość oczywisty sposób nawiązuje do badań i rozwiązań znanych z literatury. Jednak stwierdzam także, że Doktorant zdołał wnieść do przedmiotu swoje własne oryginalne badania, przemyślenia i koncepcje, które stanowią krok do przodu w zakresie algorytmów przepróbkowania sygnałów. Zaliczam do nich przede wszystkim:

- zdefiniowanie oryginalnych sposobów modyfikacji znanych metod przepróbkowania sygnałów, które prowadzą do redukcji błędów przetwarzania,
- określenie wpływu na jakość przepróbkowania takich czynników jak szerokość i położenie pasma częstotliwościowego sygnału, krotność przepróbkowania, czas trwania sygnału oraz liczba składowych widma dla wszystkich trzydziestu sześciu rozpatrywanych metod,
- przeprowadzenie eksperymentów z użyciem autorskiego zmodyfikowanego algorytmu przetwarzania na wybranych sygnałach rzeczywistych.

3. Uwagi krytyczne

Pierwiastek subiektywizmu, nieodłącznie towarzyszący każdej ocenie cudzego dorobku skłania do sformułowania uwag krytycznych.

3.1. Uwagi ogólne

1. Sama tematyka badań prowadzonych przez Autora, jest niezwykle wąska, natomiast zawartość informacyjna pracy jest bardzo wysoka. Duża liczba wyrażeń matematycznych oraz wyników badań, jest trudna do weryfikacji na zasadach przypisanych recenzentowi. Odnosi się wrażenie, że pewne elementy tej pracy (np. przytaczane wzory) zamieszczone zostały w sposób nadmiarowy.
2. Autor zbyt mało uwagi poświęcił wykorzystywanym narzędzom programistycznym. Odwołuje się tylko do czterech, wybranych funkcji Matlaba:
*p.2.3.1 „...Dla potrzeb oceny jakości działania, w kolejnym rozdziale, algorytm zostanie zaimplementowany z użyciem funkcji środowiska Matlab: **interp** oraz **decimate** [27]....”*
*p.2.3.2. „...W dalszej części pracy, w celu oceny jakości działania, algorytm zostanie zaimplementowany z użyciem funkcji **resample** środowiska Matlab, która stosuje polifazową implementację cyfrowych filtrów typu FIR o liniowej fazie [37]. Są one projektowane z użyciem funkcji **firls** z zastosowaniem okna Kaisera...”*
3. Brak takich objaśnień w innych przypadkach. W gruncie rzeczy nie wiadomo, czy Matlab to jedyne środowisko programistyczne wykorzystane przez Autora. Raport z badań powinien być napisany tak, aby można było powtórzyć opisane eksperymenty i pójść krok dalej.
4. Wydaje się, że kryteria błędów wykorzystane przez Autora mogą być zbyt *rozmyte*. Wynika to z faktu, że realizacje losowe sygnałów testowych mogły nie być miarodajne. Sygnał o strukturze poliharmonicznej, daje wynik uśredniony. Dla sprawdzenia powinno się badać ten sam model z użyciem wielu realizacji losowych. Warto byłoby



też sprawdzić, zachowanie modelu dla sygnału o częstotliwości bliskiej granicy Nyquista. Z kolei użyte przykłady praktyczne, dotyczą raczej sygnałów *gładkich* o rozmytym widmie, raczej łatwych do przetwarzania, stąd mało miarodajnych.

5. W pewnym sensie, problematyczne jest również „dopisywanie” próbek, w sensie deformacji oryginalnego sygnału.
6. Czy nie warto byłoby porównywać (prążki) widma sygnałów przed i po przepróbkowaniu? Zaobserwować *fizykę* zjawisk ?
7. Brak jawnego porównania osiągniętych wyników z odpowiednikami zaczerpniętymi z literatury, uzyskanymi przez innych badaczy.
8. Występuje chaos w zakresie użytej terminologii, w szczególności wymienne jest używanie różnych terminów w odniesieniu do tych samych zjawisk (przykłady w uwagach szczegółowych). Dla potwierdzenia tego, wystarczy ograniczyć się do tez pracy.
9. Nagminne jest używanie terminów anglojęzycznych (często wymienne z polskojęzycznymi) w miejsce znanych i zaakceptowanych w języku polskim.

3.2. Uwagi szczegółowe

1. Brak skrótowych oznaczeń rozważanych metod w wykazie oznaczeń i skrótów np. ZPARW.
2. Nagminne używanie wymienne terminów: *resampling* \leftrightarrow *przepróbkowanie*. Należało pozostać przy języku polskim: *przepróbkownie*.
3. Nagminnie, wymienne używanie określeń *spektrum* \leftrightarrow *widmo*. Np. *rozdzielczość spektralna*. Zasadniczo najpowszechniej używany jest termin *rozdzielczość częstotliwościowa* (np. str.8), rzadziej *rozdzielczość widma* (np.str.7).
4. W miejsce *czas trwania sygnału* używane jest pojęcie *długość sygnału* (wyrażana w liczbie próbek) - do zaakceptowania. Natomiast *długość widma* (str. 29), czy *wydłużenie widma* – trudniej zaakceptować. Powszechnie używa się pojęcia *szerokość*, w odniesieniu do widma.
5. To samo dotyczy określenia ... *okna o długości L*... (str. 38) Powinno być *okna o szerokości L*
6. To samo dotyczy wektorów: Nie powinno być *długość wektora* lecz *rozmiar wektora*.
7. Zamiast *wielkość błędu*, powinno być *wartość błędu* (np.str.7, 15 ...).
8. Zamiast *sygnał czasu ciągłego (analogowy)*, powinno być *ciągły sygnał analogowy*.
9. Zamiast *sygnał czasu dyskretnego (dyskretny)* powinno być *dyskretny sygnał analogowy*.
10. Jak rozumieć termin *pulsacja analogowa* (str.7) ?
11. Zamiast *szybka, dyskretna transformata Fouriera*, *szybka transformata Fouriera* (FFT).
12. Dziwacznie brzmi zdanie: ...*ciągłe sygnały czasu dyskretnego czyli takie, których dokładne wartości znane są tylko w określonych chwilach czasu*. (str. 13) !!! Autor miał zapewne na myśli *dyskretny sygnał analogowy* (sygnał czasu dyskretnego nie jest sygnałem ciągłym, co stwierdza sam Autor w drugiej części zdania).
13. W miejsce *wolno zmiennych* powinno być *wolnozmiennych*.
14. Częste używanie personifikacji typu: ...*sygnał wyjściowy posiada częstotliwość próbkowania*... (str. 17).
15. We wzorze 2.8 powinien być zaznaczony moduł: $|H(j\omega)|$.
16. Na rys. 2.7 powinny wystąpić transformaty Z sygnałów $X(z)$ w miejsce $x(n)$.
17. Objasnić termin *opóźnienie różnicowe* str. 22



18. Terminy *upsampling* i *downsampling* mają swoje odpowiedniki polskojęzyczne: *nadpróbkowanie* i *podpróbkowanie* (str. 32, ...).
19. Niezręczne i niecisłe jest stwierdzenie *cyfrowe zniekształcenia generowane przez przetwornik C/A* (str. 39).
20. Nie *wykonania dużej ilości pomiarów* (str. 92), lecz *wykonania dużej liczby pomiarów*.
21. Błędne oznaczenie indeksu n we wzorze 3.4 (N zamiast M).
22. Niepełna interpretacja wzoru 4.13
23. Zdublowana numeracja rysunku 4.24 (str. 119 na dole) Błędy w opisie ponad tym rysunkiem oraz w podpisie pod rysunkiem – niezgodność z opisem osi rzędnych występujących na rysunku.

4. Konkluzja

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska jest pracą o dobrym poziomie merytorycznym. Autor uzyskał szereg wyników o dużym znaczeniu tak w zakresie naukowym, jak i praktycznym. Wykazał bardzo dobre rozeznanie w zakresie przetwarzania sygnałów dyskretnych. Wiadę wyrażnie, że zmodyfikowana metoda przepróbkowania widmowego, którą Doktorant proponuje jest szczegółowo dopracowana i sprawdzona. Praca jest nastawiona na realne potrzeby praktyki, które doktorant zna i czuje. Zawarte w recenzji uwagi krytyczne, nie rzutują w sposób znaczący na merytoryczną ocenę pracy.

W konkluzji stwierdzam, że praca mgr inż. Marcina Jarmołowicza spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

