

Dr hab. inż. Krzysztof J. Opieliński, prof. nadzw. PWr.
Katedra Akustyki i Multimediów
Wydział Elektroniki
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław, 30.08.2017

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

Tytuł rozprawy: „Numeryczna rekonstrukcja pola prędkości fali akustycznej na podstawie analizy sygnałów ultradźwiękowych”

Autor rozprawy: mgr inż. Piotr Karwat

I. Analiza zagadnienia naukowego rozpatrzonego w rozprawie oraz ocena sposobu jego sformułowania i realizacji, analiza charakteru rozprawy

Celem rozprawy było opracowanie i analiza nowej, efektywnej obliczeniowo metody rekonstrukcji przestrzennego rozkładu lokalnych wartości prędkości ultradźwięków na podstawie akwizycji i przetwarzania sygnałów ultradźwiękowych odbitych od struktur odpowiadających tkankom miękkim. Istotnym elementem rozprawy jest wykazanie możliwości zaimplementowania opracowanej metody w przykładowych, wykorzystywanych obecnie do produkcji ultrasonografów układach elektronicznych, w taki sposób, aby możliwe było uzyskiwanie obrazów tych rozkładów w czasie rzeczywistym, z częstotliwością odświeżania nie gorszą niż w przypadku standardowego obrazowania USG. Opracowana metoda została wnikliwie przeanalizowana i zweryfikowana przez Autora w odniesieniu do istniejących algorytmów referencyjnych, które są trudne do zaimplementowania w czasie rzeczywistym, ze względu na znaczny koszt obliczeniowy.

Ultradźwiękowe metody obrazowania są obecnie powszechnie wykorzystywane w diagnostyce medycznej, ponieważ umożliwiają wizualizację wnętrza ciała *in vivo* w sposób nieszkodliwy i nieinwazyjny, dostarczają istotnych informacji diagnostycznych, przy czym sposób badania jest szybki i łatwy w realizacji. Stąd też obserwuje się dynamiczny rozwój coraz to nowych algorytmów i metod ulepszających standardowe, jakościowe obrazowanie USG (elastografia, *compound imaging*, obrazowanie harmoniczne, syntetyczna apertura), jak również nowatorskich metod ilościowych, jak np. ultradźwiękowa tomografia transmisyjna. Tematyka rozprawy jest nowatorska, ponieważ umożliwia wzbogacenie typowo jakościowego obrazowania USG o dodatkowe obrazowanie ilościowe w postaci rozkładu lokalnych wartości prędkości ultradźwięków w badanym przekroju tkanki 2D, czy nawet w obszarze 3D. Rozkład taki różnicuje parametry tkanki w sposób ilościowy pod kątem powiązania jej sprężystości z gęstością, co umożliwia rozpoznawanie zmian patologicznych, a nawet, w korelacji z rozkładem lokalnych wartości tłumienia ultradźwięków – rozróżnianie nowotworów łagodnych i złośliwych.

Cel pracy jest jasno sformułowany, zgodny z tytułem rozprawy. Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie Elektronika, jak również umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W charakterze uwagi krytycznej stwierdzam, że Autor nie wyodrębnił wyraźnie tezy pracy, co jest zwyczajowo praktykowane w rozprawach doktorskich, nie mniej jednak nie jest to formalnym wymogiem określonym przez jakąkolwiek ustawę, czy rozporządzenie.

Praca stanowi kontynuację szeroko zakrojonych badań związanych z rozwojem nowych metod ultradźwiękowego obrazowania metodą echa, prowadzonych od wielu lat w IPPT PAN.

Praca obejmuje 95 stron, w tym 2 strony bibliografii zawierającej 36 pozycji literaturowych oraz 3 strony z załącznikami dotyczącymi wyprowadzeń wzoru i optymalizacji parametrów algorytmu.

Praca jest bogato ilustrowana rysunkami i wykresami (52), zawiera również kilka tabel (3).

Praca ma charakter teoretyczno-praktyczny, z nastawieniem na budowę algorytmów rekonstrukcji obrazu pod kątem implementacji i wykorzystania w echograficznych skanerach ultradźwiękowych.

II. Ocena analizy literaturowej, analizy stanu wiedzy i zastosowań oraz sposobu sformułowania wniosków i ich wykorzystania w rozprawie

Autor biegle porusza się w aktualnej literaturze przedmiotu. Analiza bibliograficzna przedstawiona w pracy świadczy o wiedzy Autora i znajomości przedstawianych zagadnień. Po krótkim wstępie w rozprawie, dotyczącym diagnostyki obrazowej, Autor przedstawia w sposób zwięzły i rzeczowy systematykę tkanek pod kątem prędkości ultradźwięków i parametrów, od których ta prędkość jest zależna. Następnie przedstawia on istniejące możliwości oraz rys historyczny obrazowania prędkości ultradźwięków w tkankach z odniesieniem do zastosowań i motywacją do opracowania nowych, efektywniejszych obliczeniowo algorytmów. Wnioski z przeglądu literatury sformułowano w sposób jasny i rzeczowy – stały się one podstawą do opracowania modeli matematycznych i algorytmów rekonstrukcji obrazu, jak również pozwoliły na wnikliwą analizę i weryfikację opracowanej metody z wybranymi metodami referencyjnymi.

W analizie literaturowej rozprawy znajdują błędy w postaci tzw. ślepych cytowań – 7 pozycji literatury (10, 12, 17, 20, 21, 22, 34) wymienionej w bibliografii rozprawy nie zostało zacytowanych w tekście. Literatura ta dotyczy zagadnień przedstawionych we wstępie rozprawy. Błędy popełnione zostały prawdopodobnie w procesie edycji. Nie rzutują one jednakże na wysoką w mojej opinii wartość merytoryczną rozprawy.

III. Ocena sposobu rozwiązania postawionego zagadnienia, zasadności założeń i prawidłowości użytych metod

W celu realizacji postawionych zagadnień, Autor wykonał szereg zadań w postaci m.in.:

- opracowania modelu matematycznego dla zagadnień wprost, zmodyfikowanego w odniesieniu do istniejących metod poprzez ujednoczenie dróg całkowania,
- opracowania na podstawie powyższej modyfikacji efektywnej obliczeniowo dwuetapowej metody rozwiązania zagadnienia odwrotnego,
- opracowania efektywnego obliczeniowo przetwarzania za pomocą prostych filtrów NOI odpowiadających zastosowaniu zregulowanego operatora pochodnej,
- przeprowadzenia porównawczej analizy jakości wyników uzyskiwanych za pomocą opracowanej metody w porównaniu z metodami referencyjnymi.

Wyniki uzyskane w rozprawie potwierdziły tezę, że opracowana przez Autora metoda echograficznego obrazowania rozkładu prędkości ultradźwięków w strukturze tkanek miękkich (nazwana Q-CUTE_D) umożliwia efektywną obliczeniowo rekonstrukcję wysokiej jakości obrazów, przy czym złożoność obliczeniowa tej metody jest mniejsza od złożoności obu algorytmów referencyjnych. Dzięki temu możliwa jest implementacja opracowanego w ramach rozprawy algorytmu, działająca w czasie rzeczywistym na danych o niezredukowanej rozdzielczości pikselowej. To z kolei otwiera możliwości efektywnej korekcji aberracji w obrazowaniu metodą echa oraz jest potencjalnym załącznikiem nowej, ilościowej modalności w obrazowaniu ultradźwiękowym.

Założenia przyjęte do realizacji celu pracy zostały zasadnie sformułowane, a postawione zagadnienie zostało prawidłowo zrealizowane.

IV. Dyskusja merytoryczna i uwagi

W ocenianej rozprawie przedstawione zwięźle i rzeczowo rozdziały 1. Wstęp oraz 2. Teoria w mojej opinii nie budzą zastrzeżeń, podobnie jak rozdz. 4. Wyniki i 5. Podsumowanie. Pewne wątpliwości i spostrzeżenia krytyczne odnoszą natomiast do fragmentów rozdz. 3. Metodologia.

Opracowany przez Autora algorytm rekonstrukcji rozkładu prędkości ultradźwięków w strukturze tkanek miękkich bazuje na sposobie akwizycji odbitych sygnałów ultradźwiękowych RF metodą wielokątowego obrazowania falą płaską (CPWI), w której obraz wynikowy wysokiej rozdzielczości (HRI) składany jest z cząstkowych obrazów niskiej rozdzielczości (LRI), pozyskiwanych pod różnymi kątami. Danymi wejściowymi koniecznymi do testowania algorytmu są więc obrazy LRI_n pozyskiwane dla N kątów propagacji.

Pewne wątpliwości budzi opracowany generator sygnału LRI. Algorytm generatora (wzór 57) jest bardzo uproszczony, ponieważ na podstawie zadanego rozkładu lokalnych wartości prędkości ultradźwięków w wirtualnym przekroju tkanki tworzy on tablicę zespolonych próbek sygnału RF, które mają stałą jednostkową amplitudę i fazę wyznaczaną na podstawie zadanego rozkładu prędkości. Szum generowany jest w postaci losowych liczb zespolonych dodawanych do próbek RF i symulujących zaszumienie amplitudy i fazy próbek RF. O ile można pogodzić się w obecnej fazie badań z takim uproszczeniem zamiast generowania sygnałów RF, o tyle, sposób generowania szumu powinien być nieco szerszej

wyjaśniony. W rozdz. 3.4 na str 53 podany jest „poziom zakłóceń o charakterze szumowym $\xi = 0.4$ ”. Jakie to daje maksymalne zakresy poziomu zmian amplitudy szumu w dB w stosunku do sygnału użytecznego o amplitudzie jednostkowej? Czy jest to 8 dB odstęp S/N? Dlaczego akurat tyle? Na stronie 56 przyjęto zmiany amplitudy zakłóceń $\xi = 0.2, 0.4, 0.8$. Dlaczego takie? A jakie przyjęto zmiany zakłóceń fazy? Ile to jest w przeliczeniu na odchyłki prędkości? Tych danych mi w pracy brakuje.

Należy zauważyć, że Autor przy testowaniu opracowanego algorytmu nie uwzględnił tłumienia w generowanych obrazach LRI, a to może znacząco wpływać na wyniki.

Bardzo pozytywnie oceniam przeprowadzoną przez Autora analizę zależności wyników uzyskiwanych za pomocą opracowanego algorytmu oraz algorytmów referencyjnych od warunków optymalizacji (rys.33), która pokazuje, że optymalne współczynniki regularyzacji zależą od rozmiarów i struktury wizualizowanego przekroju oraz poziomu szumu. Analiza ta wskazuje na konieczność opracowania tablicy współczynników regularyzacji w zależności od pewnych cech badanych struktur. Istotnym elementem jest również wskazana przez Autora możliwość wykorzystania współczynników wagowych $w^I_{n,n+1}$ oraz $w^{II}_{n,n+1}$ w celu redukcji artefaktów wprowadzanych przez opracowany algorytm na brzegach obrazu.

Należy zaznaczyć, że opracowany algorytm został przetestowany w kierunku jakości obrazowania za pomocą reprezentatywnych, niezakłóconych numerycznych danych dla prostych wirtualnych przekrojów struktur tkankopodobnych. Konieczne jest przetestowanie algorytmu na tkankach *in vivo*, chociaż biorąc pod uwagę wyniki obrazowania przestrzennego rozkładu lokalnych wartości prędkości ultradźwięków w przekrojach tkanek prezentowane ostatnio na konferencjach (IEEE International Ultrasonics Symposium 2015, Taipei, Taiwan), można przewidywać obiecujące rezultaty.

V. Ocena oryginalności rozprawy i dorobku autora

Pod kątem oryginalności rozprawy istotne są rozdziały 2. Teoria, 3. Metodologia i 4. Wyniki.

W rozdz. 2 Autor opisuje modele matematyczne opracowanej metody oraz metod referencyjnych wraz z analizą i uzasadnieniem ich konstrukcji, regularyzacji oraz przyjętych założeń i uproszczeń. Pozwala to na dokonanie przez Autora analizy i porównania złożoności obliczeniowej wszystkich metod oraz wnioskowanie wysokiej wydajności obliczeniowej opracowanego algorytmu Q-CUTE umożliwiającego jego implementację w echograficznym obrazowaniu trójwymiarowym z zachowaniem rygoru czasu rzeczywistego. Bardzo ciekawe i oryginalne jest np. zestawienie i analiza sygnałów odpowiadających wyrazom A i B równania (35) będącego podstawą do opracowania metody Q-CUTE (rys.11).

W rozdz. 3 Autor przedstawia oryginalnie schematy implementacyjne opracowanego w dwóch wersjach algorytmu Q-CUTE oraz algorytmów dwóch metod referencyjnych: CUTE-FD, CUTE-SD, jak również autorską metodologię ich porównawczego testowania i oceny jakości obrazowania oraz sposobu optymalizacji współczynników regularyzacji.

W rozdz. 4 Autor przedstawia uzyskane wyniki optymalizacji współczynników regularyzacji, porównanie jakości obrazowania opracowanego algorytmu z algorytmami referencyjnymi dla zadanych rozkładów prędkości w symulowanym przekroju tkanki typu jednorodnego, warstwowego i wtrącenia okrągłego wraz ze szczegółową analizą i dyskusją.

Uzyskane wyniki wykazują, że najlepszy pod względem jakości obrazowania algorytm CUTE-SD charakteryzuje się dużą złożonością obliczeniową, przez co jego zastosowanie w systemach obrazujących w czasie rzeczywistym jest obecnie ograniczone. Drugi w klasyfikacji jakości algorytm Q-CUTE_D (opracowany przez Autora) jest znacznie efektywniejszy obliczeniowo, dzięki czemu możliwe jest wykonywanie go w czasie rzeczywistym w wysokiej rozdzielczości, przy czym dystans pomiędzy jakością wyników CUTE-SD i Q-CUTE_D jest niewielki, a szerokie możliwości optymalizacji i modyfikacji algorytmu Q-CUTE_D potencjalnie umożliwiają jeszcze zmniejszenie tych różnic. Opracowana przez Autora metoda jest więc najbardziej perspektywiczną spośród analizowanych metod rekonstrukcji prędkości ultradźwięków.

Dorobek Autora oceniam jako bardzo dobry. Składa się na niego 7 artykułów w czasopiśmie z tzw. listy filadelfijskiej (w tym jedno w Ultrasonics wydawanym przez Elsevier), wydanie książkowe, oraz 4 rozdziały w monografiach. Ponadto, należy podkreślić udział Autora w 4 dużych konferencjach międzynarodowych związanych z ultradźwiękami oraz w 5 konferencjach krajowych z zakresu akustyki oraz inżynierii biomedycznej. Dorobek Autora dopełnia udział w 3 kilkuletnich projektach naukowo-badawczych, co podkreśla Jego umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

VI. Ocena umiejętności przedstawienia uzyskanych wyników, ocena poprawności redakcyjnej rozprawy

Redakcja rozprawy jest staranna, z dobrymi i czytelnymi ilustracjami. Wyniki zostały przedstawione umiejętnie i przekonująco, a zagadnienia zaprezentowano w sposób jasny i zwięzły.

Krytycznie wskazać mogę jedynie wspomniane wcześniej „ślepe cytowania” oraz zaledwie jeden błąd językowy (przymiotnik „niedetekowalna” na str 3) oraz nieliczne, drobne błędy edycyjne:

- „wynosi” zamiast „wynoszą” na str 7,
- „(Rysunek 2b)” zamiast „(Rysunek 3b)” na str 8,
- brak zaanonsovania w tekście rysunków: 4, 5, 6, 8.

W kontekście oceny całości redakcji pracy, przytoczone błędy nie mają jednak istotnego znaczenia.

VII. Podsumowanie

Praca przedstawiona przez mgr. inż. Piotra Karwata ma istotny charakter poznawczy – wykazujący i wstępnie analizujący możliwości ilościowej, echograficznej rekonstrukcji rozkładu lokalnych prędkości ultradźwięków w tkankach miękkich oraz praktyczny – w postaci opracowania i analizy efektywnego obliczeniowo algorytmu

takiej rekonstrukcji. Wyniki tej pracy mogą przyczynić się do dokładniejszej detekcji zmian nowotworowych w tkankach miękkich.

W konkluzji stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Karwata spełnia z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim i w związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Przedstawione przeze mnie w recenzji uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na istotną wartość merytoryczną rozprawy.

W związku z nowatorską tematyką ocenianej rozprawy, której wynikiem jest oryginalne opracowanie i analiza nowej, efektywnej obliczeniowo echograficznej metody rekonstrukcji przestrzennego rozkładu lokalnych wartości prędkości ultradźwięków, możliwej do wykorzystania w ultrasonografii m.in. w celu diagnostyki nowotworowej tkanek miękkich oraz biorąc pod uwagę dorobek naukowy Autora, uważam, że praca zasługuje na wyróżnienie.

Krzysztof Opaliński