

Warszawa, dnia 29 kwietnia 2013r.

dr hab. inż. Krzysztof Kałużyński, prof.nzw. PW
Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej PW
ul.Boboli 8, 02-525 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Ziemowita Klimondy

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Ziemowita Klimondy pt. "Obrazowanie parametryczne tłumienia fali ultradźwiękowej w tkance miękkiej" przygotowana została na zlecenie Rady Naukowej IPPT PAN, zawarte w piśmie Rady Naukowej z dnia 6 marca 2013 roku.

Rozprawa dotyczy istotnego problemu, jakim jest obrazowanie tłumienia w tkankach miękkich, które stanowi jeden z rozwijających się kierunków obrazowania parametrycznego. Jest to tematyka ważna i podejmowanie jej jest jak najbardziej uzasadnione. Tematyka nie jest co prawda nowa, ale możliwości implementacji metod estymacji tłumienia, a w konsekwencji wykorzystania estymacji tłumienia w praktyce klinicznej, zdecydowanie rosną z rozwojem technologii, w szczególności możliwości obliczeniowych układów logicznych wielkiej skali integracji, procesorów graficznych i procesorów sygnałowych. Szczegółowy cel pracy stanowiło opracowanie i weryfikacja metody estymacji tłumienia fali ultradźwiękowej w tkankach miękkich. Zadanie to zostało zrealizowane, przy czym weryfikacja została przeprowadzona z wykorzystaniem symulacji i eksperymentów z użyciem fantomów tkankowych.

Przedmiotowa rozprawa wraz z dodatkami liczy 140 stron, zawiera 6 rozdziałów, bibliografię i 3 Dodatki. Bibliografia liczy 58 pozycji, z których wszystkie zostały zacytowane, a około 60% z nich ukazało się po 2000 roku.

Praca ma charakter przede wszystkim eksperymentalny, z elementem teoretycznym w postaci propozycji rozszerzenia opisu procesu estymacji tłumienia o uwzględnienie wpływu ograniczonego pasma przetwornika oraz rozbieżności rozkładu widma echa w stosunku do teoretycznego rozkładu gaussowskiego.

Po uzasadnieniu celowości prowadzenia badań nad estymacją tłumienia w tkankach miękkich przeprowadzona została skromna analiza stanu wiedzy. Następnie Doktorant omówił mechanizmy tłumienia towarzyszącego propagacji fali ultradźwiękowej w tkance miękkiej. Zaproponował model zmian widma propagującej paczki fali, uwzględniając w nim wpływ

tłumienia i rozproszenia. Parametrem widma paczki mającym umożliwić estymację tłumienia jest częstotliwość średnia paczki, zmieniająca się w funkcji tłumienia i drogi propagacji. W kolejnych krokach Doktorant zaproponował zastosowanie korelacyjnego estymatora częstotliwości średniej oraz estymację trendu zmian tej częstotliwości wzdłuż drogi propagacji z wykorzystaniem metody analizy widma osobliwego, co stanowi oryginalne zastosowanie tej metody do estymacji trendu częstotliwości średniej widma paczki ultradźwiękowej. Doktorant uwzględnił także wpływ pasma przetwornika na wynik estymacji tłumienia i przedyskutował wpływ rozbieżności między teoretycznym rozkładem gaussowskim a ograniczonym rozkładem widma paczki uzyskiwanym w pomiarach, wykazując, że dla głowic o węższym pasmie (75%) i mniejszych tłumień (do 1.5dB/cm/MHz) wpływ ten można pominąć dla głębokości obrazowania do około 10cm.

Ekspertyzom objęły symulacje numeryczne oraz badania fizycznych modeli tkankowych o zróżnicowanym tłumieniu. W ramach symulacji numerycznych zbadane zostały właściwości korelacyjnego estymatora częstotliwości średniej, w tym wpływ długości okna danych oraz liczby uśrednianych sąsiadujących linii na odchylenie standardowe oraz błąd maksymalny tego estymatora. Okno danych i liczba uśrednionych linii są istotnymi parametrami, ponieważ mają wpływ na rozdzielczość obrazu tłumienia. Na podstawie symulacji oraz pierwszego eksperymentu w modelu fizycznym Doktorant stwierdził, że znacznie istotniejszy wpływ na właściwości estymatora ma długość okna danych niż liczba uśrednień. Wynika to zapewne z niewielkich możliwości uśrednienia (liczba linii ograniczona do 50). Na podstawie wyników pierwszego eksperymentu na modelu fizycznym Doktorant stwierdził, że dla okien zawierających kilkaset próbek (powyżej 500, co odpowiada długości ok. 1cm) estymowana wartość współczynnika tłumienia zbliża się do wartości podanej przez producenta fantomu. Doktorant przeanalizował także wpływ obecności silnych ech na wyniki estymacji częstotliwości średniej, i zaproponował skuteczną metodę korekcji skutków tego zjawiska. Na potrzeby symulacji Doktorant opracował własne procedury w środowisku Matlab, a także rozbudował możliwości oprogramowania FIELD II o symulację niejednorodnego fantomu.

W ramach eksperymentów fizycznych Doktorant zbadął kilka technik prowadzących do redukcji wariancji estymatora tłumienia, jak obniżenie poziomu szumu w danych wejściowych w obrazowaniu z uśrednianiem w przestrzeni, uśrednianie estymatorów tłumienia uzyskanych w wyniku podziału pasma ech, połączenia tych dwóch technik, oraz wykorzystanie do uzyskania danych wejściowych apertury syntetycznej (SAFT). Najkorzystniejsze wyniki w sensie obniżenia wariancji estymatora tłumienia uzyskał stosując aperturę syntetyczną.

Reasumując, rozprawa przedstawia proces opracowywania metody estymacji tłumienia i jej weryfikacji z wykorzystaniem symulacji oraz eksperymentów fizycznych z użyciem fantomów tkankowych. Zaproponowane przez Doktoranta rozwiązania okazały się skuteczne, biorąc pod uwagę wyniki uzyskane w badaniach fantomów tkankowych o znanych tłumieniach.

Uwagi dyskusyjne i krytyczne:

1. Centralny problem pracy stanowi estymacja częstotliwości średniej ech, mająca zasadnicze znaczenie dla estymacji tłumienia, zaś wszystkie pozostałe zabiegi należy traktować jako próby konstrukcji zmodyfikowanych estymatorów, bazujących na estymatorze częstotliwości średniej, o mniej lub bardziej poprawionych właściwościach, ewentualnie jako działania mające prowadzić do obniżenia poziomu szumów w danych wejściowych dla estymatora częstotliwości średniej. Doktorant zastosował korelacyjny estymator częstotliwości/prędkości średniej znany z impulsowej metody dopplerowskiej, i zrezygnował z estymacji tej częstotliwości na podstawie widma uzyskanego z zastosowaniem bezpośredniego przekształcenia Fouriera, nie analizując możliwości wykorzystania innych metod. W literaturze przedstawione zostały zastosowania metody autoregresyjnej do estymacji tłumienia tkanek/modeli tkankowych na podstawie zmian częstotliwości średniej, a także do estymacji częstotliwości średniej ultradźwiękowych sygnałów dopplerowskich (T. Baldeweck et al. Application of Autoregressive Spectral Analysis for Ultrasound Attenuation Estimation in Highly Attenuating Medium. IEEE Trans UFFC, 1995, vol.42, no 1, 99-110; Girault JM et al. Time-varying autoregressive spectral estimation for ultrasound attenuation in tissue characterization. IEEE Trans UFFC. 1998;45(3):650-9; C. Guittet et al. High-frequency estimation of the ultrasonic attenuation coefficient slope obtained in human skin: simulation and in vivo results. Ultrasound Med. Biol., Vol. 25, No. 3, pp. 421–429, 1999; T. B. Ahn i S.B. Park, Estimation of mean frequency and variance of ultrasonic Doppler signal by using second-order autoregressive model. IEEE Trans. UFFC vol.38, pp.172-182, 1991). Metoda autoregresyjna w estymacji widmowej gęstości mocy znana jest z korzystniejszych właściwości statystycznych niż bezpośrednie przekształcenie Fouriera, a ponadto może prowadzić do uzyskania lepszej rozdzielczości przestrzennej estymatora tłumienia. Dyskusja możliwości estymacji częstotliwości średniej z wykorzystaniem metody AR mogłaby być korzystnym uzupełnieniem rozprawy.

2. Chcąc wykorzystywać dostępne w skanerze sygnały Doktorant poruszał się w swych działaniach z ograniczeniami czasu trwania paczki emitowanej stosowanymi w przypadku obrazowania 2D. Czy nie byłoby celowe stosowanie innych emisji, np. o dłuższym czasie trwania, skoro rozdzielczość obrazowania tłumienia jest znacznie niższa niż obrazu 2D? Może parametry estymatora częstotliwości średniej (wariancja) byłyby wtedy korzystniejsze?
3. Metodyka analizy danych symulowanych nie została opisana w sposób przejrzysty. Nie została podana wartość częstotliwości próbkowania, ani czy i w jakim stopniu okna danych nakładają się. Nie została przedstawiona analiza obciążenia estymatora. Procedura wyznaczenia rozrzutów nie została dokładnie opisana, a schemat przedstawiony na Rys.4.2 jej nie wyjaśnia.
4. Tabele 4.1 i 4.2 zawierające wyniki pomiarów tłumienia nie pozwalają wyodrębnić wpływu zmian długości okna danych i liczby uśrednień na wynik, ponieważ nie podano wyników przy jednym parametrze stałym, a drugim zmiennym. Nieuzasadnione też wydaje się zmienianie okna danych o około 3% czy też liczby uśrednień o kilka na poziomie około 30 – wpływ takich zmian może być tylko znikomy.
5. Opis eksperymentów fizycznych jest mało uporządkowany. Doktorant testował metodę na danych uzyskanych z wykorzystaniem kilku ultrasonografów, różnych głowic i różnych fantomów, co sprawia, że porównanie wyników tych eksperymentów jest utrudnione. W opisach znajdujących się w tej części rozprawy rysunków nie podano parametrów (średnic i tłumień) wtrąceń o tłumieniu różnym od pozostałej części fantomu, co ułatwiłoby interpretację. Dlaczego na Rys.5.24 i 5.28 prezentowane są maksymalne wartości estymat tłumienia a nie np. rozbieżności między wynikiem estymacji a wartością rzeczywistą? Czy na Rys.5.29 prawidłowo podane są współrzędne punktu, dla którego podano wyniki (byłaby to krawędź fantomu)?
6. Przegląd stanu wiedzy nie obejmuje kilku aspektów problematyki estymacji tłumienia przedstawianych w literaturze, w tym metod wykorzystujących porównanie z fantomem odniesienia, metod wykorzystujących korelację widm ech pochodzących z różnych głębokości czy metody opartej na ilorazie widm. Pozycje poświęcone estymacji tłumieniu ultradźwięków w tkankach są w bibliografii reprezentowane skromnie. Doktorant nie ustrzegł się cytowania prac powołujących się na źródło oryginalne, w miejsce cytowania tych ostatnich (np. Evans i McDicken z 2000 zamiast Kasai et al. z 1985 na str.23).

Uwagi redakcyjne i językowe:

1. Omówienie przebiegu symulacji (rozdział 4.1.2, od str. 43) powinno poprzedzać przedstawienie jej wyników (strona 35 i następne). Opis badania i oceny rozdzielczości metody na podstawie symulacji i pomiarów w fantomie fizycznym znajdujący się w rozdziale o tytule „Praktyczne zastosowanie algorytmu tłumienia” powinien znaleźć się w rozdziale poświęconym badaniu metody, a nie jej zastosowaniom. Podrozdziały 5.1.1, 5.2.1 i 5.3.1 mają charakter wprowadzenia i powinny znaleźć się we wprowadzającej części pracy.
2. Ilustrowanie rozprawy doktorskiej zdjęciami ultrasonografów i głowic jest wątpliwe. Strukturę fantomów korzystniej byłoby pokazać na rysunkach niż na zdjęciach.
3. Rezultaty przedstawiane w rozprawie pochodzą z symulacji bądź badań fantomów, zaś tytuł mówi o obrazowaniu tłumienia w tkankach miękkich.
4. W rozprawie pojawiają się nieprawidłowe sformułowania - wyznaczanie estymaty „na linii” lub obrazu tłumienia „na systemie Sonix Touch”, czy też dokonywanie pomiarów „na fantomie”.

Podsumowując, rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, z elementami nowatorskimi w opisie zmian widma paczki spowodowanych tłumieniem i w metodzie estymacji częstotliwości średniej. Rozprawa wykazuje ogólną wiedzę Doktoranta w dyscyplinie naukowej Elektronika i dowodzi umiejętności prowadzenia samodzielnych badań naukowych. Mimo uwag krytycznych rozprawa zasługuje na pozytywną ocenę.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Ziemowita Klimondy spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w myśl Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami. Wnoszę o dopuszczenie mgr Ziemowita Klimondy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Krzysztof Kałużynski