

WPŁYNEŁO

2023 -09- 27

dn.....

Prof. dr hab. inż. Bożena Kostek, czł. koresp. PAN
Politechnika Gdańska,
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Lab. Akustyki Fonicznej

15.09.2023 r.

Opinia nt. rozprawy doktorskiej mgra inż. Macieja Jasińskiego

pt.: **“Wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych odpowiedzi impulsowych”**,
wykonanej pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Jana Żery.

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie sformułowane przez autora

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. **Macieja Jasińskiego** pt.: **“Wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych odpowiedzi impulsowych”**. Rozprawa wpisuje się bardzo aktualny trend w akustyce, jakim są pomiary i ocena parametrów akustycznych wewnątrz z zastosowaniem przestrzennej odpowiedzi impulsowej. W szczególności dotyczy to wykorzystania mikrofonów ambisonicznych 2. i 3. rzędu. Warto zauważyć, że na jednej z ważniejszych konferencji, tj. **International Conference on Immersive and 3D Audio (I3DA)** w Bolonii w tej tematyce pojawiły się takie właśnie tematy badawcze, np. „Measurements of Room Acoustic with Two Different Methods - A Case Study”, „Ambisonic room impulse responses extrapolation guided by single microphone measurements”, „Discussion of Acoustic and Perceptual Optimization Methods for Measuring Spatial Room Impulse Responses with a Mobile Robotic Platform”, „Reverberation time prediction using diverse models”, „A Generic Reverberation Characterization Metric for Accurate Simulation in Virtual and Augmented Reality Environments”, „Sound field interpolation via sparse plane wave decomposition for 6DoF immersive audio”, „Effects of the types of headphones and sound sources on spatial audio quality”, „Extraction of Ambience Sound from Microphone Array Recordings for Spatialisation” i wiele innych prezentacji związanych z tematem recenzowanej rozprawy. Warto też zauważyć, że doktorant prezentował na tym forum swój współautorski referat pt. “Application of different types of microphones in room impulse response measurement”

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter eksperymentalny, składa się z dziesięciu rozdziałów oraz Bibliografii (112 źródeł). Praca obejmuje 93 stron tekstu, w tym trzy załączniki do pracy: definicje parametrów akustycznych, schematy punktów pomiarowych w pomieszczeniach, analizę wariancji danych. Praca zawiera następujące elementy: streszczenia w j. polskim i angielskim, wstęp, opis parametrów akustycznych pomieszczeń, techniki przetwarzania sygnałów ambisonicznych, opis

funkcji przenoszenia głowy HRTF, przegląd literatury, analizę przestrzennej odpowiedzi impulsowej pomieszczenia, wyniki badań, podsumowanie i dyskusję, wnioski. Ten układ pracy wydaje się trochę nietypowy, a mianowicie przegląd literatury pojawia się dopiero w rozdziale 5., cel i tezy rozprawy w rozdziale 6.

Główny cel rozprawy odnosi się do sprawdzenia możliwości zastosowania mikrofonów ambisonicznych 2. i 3. rzędu do pomiarów kompletnego zestawu parametrów służących ocenie akustycznej pomieszczeń, w szczególności zawartych w normie PN-EN ISO 3382-1 oraz dodatkowo parametrów związanych ze słyszeniem dwuosobnym, tj. międzyuszną korelacją skrośną. Cel ten ma swoje rozwinięcie w postaci użycia funkcji HRTF, binauralnej odpowiedzi impulsowej BRIR oraz porównania skuteczności tej metody z klasycznymi oraz referencyjnymi metodami pomiarów, tj. wykorzystania mikrofonu wszechkierunkowego, manekina akustycznego i sztucznej głowy. Do badań wytypowano sale z różnymi warunkami pogłosowymi, tj. komorę bezechową, komorę pogłosową, średniej wielkości studio nagraniowe, salę koncertową oraz korytarz. Taki wybór badanych wewnątrz ma zasadnicze znaczenie, gdyż odnosi się zarówno do pomieszczeń o różnym charakterze i różnych warunkach pogłosowych, jak również o skrajnych wartościach czasu pogłosu.

We Wstępie doktorant wprowadza w tematykę rozprawy, formułuje wstępnie cel rozprawy. W rozdziale 2 doktorant przedstawia parametry akustyczne pomieszczeń, odnosząc się do definicji, kryteriów wyboru oraz metod pomiarowych. Rozdział 3 zawiera zagadnienia związane z konstrukcją i budową mikrofonów przestrzennych (matryc mikrofonowych, mikrofonów ambisonicznych), przetwarzaniem sygnałów ambisonicznych, definicją binauralnej (BRIR) oraz przestrzennej odpowiedzi impulsowej (SRIR), pojęciem aliasingu przestrzennego.

Rozdział 4 omawia metody binauralizacji sygnałów ambisonicznych w odniesieniu do możliwości wyznaczenia parametrów akustyki wewnątrz. W rozdziale 5 doktorant podał krytyczny przegląd literatury w dwóch aspektach, tj. zastosowania przestrzennych odpowiedzi impulsowych do wyznaczania parametrów akustycznych wewnątrz oraz wyznaczania kierunku dochodzenia dźwięku z użyciem sygnałów ambisonicznych.

W rozdziale 6 podana została teza badawcza sformułowana w sposób następujący: **Możliwe jest uzyskanie zestawu parametrów akustycznych pomieszczenia, ze szczególnym uwzględnieniem binauralnych parametrów przestrzennych, za pomocą jednego przetwornika pomiarowego w postaci sferycznej matrycy mikrofonowej o kontrolowanej kierunkowości przy uwzględnieniu niezależnie mierzonych lub modelowanych funkcji HRTF.**

Rozdział 7 jest jednym z dwóch głównym rozdziałów badawczym, w którym została przedstawiona metodologia badań, dotycząca wyznaczania odpowiedzi impulsowych w wersji binauralnej oraz przestrzennej oraz badanych pomieszczeń. Doktorant wykorzystuje algorytmy binauralizacji sygnału ambisonicznego za pomocą metod: najmniejszej sumy kwadratów (Least Squares, LS), Magnitude Least Squares

(MagLS), wyrównania czasowego (Time Alignment, TA) i przepróbkowanie przestrzeni (Spatial Resampling, SPR). Z kolei do wyznaczenia funkcji transmitancji HRTF manekina pomiarowego B&K 4100-D wykorzystano modelowanie metodą elementów brzegowych z wykorzystaniem oprogramowania Mesh2HRTF. Rozdział ten zawiera również opis badanych pomieszczeń, a także aparatury pomiarowej. W rozdziale 8 doktorant zawarł wyniki badań, wyznaczając odpowiedzi impulsowe badanych pomieszczeń oraz parametry związane z pogłosem oraz z jakością brzmienia danego wnętrza z dookólnej odpowiedzi impulsowej, parametry związane z przestrzennością dźwięku, jak również analizę szacowania błędu pomiaru mikrofonem ambisonicznym. Rozdział ten stanowi również dowód na poprawność tezy badawczej.

Rozdział 9 stanowi podsumowanie prowadzonych badań, które jest wynikiem dyskusji uzyskanych wyników, zaś w rozdziale 10 przedstawione zostały wnioski ogólne.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym, literatury światowej, stanu wiedzy

Doktorant – co prawda – zawiera przegląd literatury w tytule rozdziału 5, ale rozdziały 2-4 również stanowią przyczynek do stanu wiedzy, gdyż odnoszą się do metod zastosowanych w części eksperymentalnej pracy. Lista źródeł jest obszerna i zawiera 112 pozycji; została uszeregowana w kolejności alfabetycznej. Dobór literatury jest prawidłowy i należy zauważyć, że Doktorantowi znane są opracowania, które są kluczowe dla prowadzenia badań w zakresie tematyki rozprawy doktorskiej. Bibliografia zawiera źródła pochodzące również z ostatnich lat, tj. 2019-2022, w tym kontekście zgromadzona literatura jest aktualna.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia; czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione, czy wykazał umiejętność poprawnego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników

Autor rozprawy przedstawił koncepcję badania parametrów akustycznych pomieszczeń za pomocą wyznaczenia przestrzennej odpowiedzi impulsowej pomieszczenia (SRIR, Spatial Room Impulse Response) i następnie binauralnej odpowiedzi impulsowej pomieszczenia (BRIR, Binaural RIR). Funkcje SRIR i BRIR są wykorzystywane do określenia parametru międzyusznej korelacji skrośnej (IACC, Interaural Cross-Correlation). Pomimo, iż wyznaczanie parametrów wszechkierunkowych za pomocą mikrofonu ambisonicznego nie jest w pełni nową ideą, to jednak istotne jest porównanie tych wyników z pomiarami standardowymi mikrofonem pomiarowym w różnych warunkach akustycznych. Ponadto istotne jest zbadanie odstępstw wartości uzyskanych parametrów akustycznych w stosunku pomiarów przeprowadzonych zgodnie z zaleceniami standardu i wykazanie, że

wartości tych odstępstw nie przekraczają w większości przypadków jednego do dwóch progów postrzegania zmian parametrów akustycznych pomieszczenia wg normy PN-EN ISO 3382-1 (ang. *Just Noticeable Difference*, JND). Jest to bardzo sensowne zastosowanie tej normy do badania różnic w pomierzonych wartościach w stosunku do wartości uzyskanych za pomocą metody referencyjnej.

Przyjęta metodologia jest poprawna, a przedstawienie wyników – przekonujące.

4. Oryginalność rozprawy, jej mocne strony, pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy, przydatność rozprawy dla nauk inżyniersko-technicznych

Jak wcześniej wspomniano, doktorant koncentruje się na wykorzystaniu BRIR do pomiarów akustycznych oraz na porównaniu wyników uzyskanych za pomocą mikrofonu ambisonicznego z wynikami uzyskanymi za pomocą standardowego mikrofonu pomiarowego, co ma potencjalnie istotne implikacje dla obszaru akustyki i badań nad dźwiękiem przestrzennym. W szczególności dotyczy to przestrzenności dźwięku i jakości pola akustycznego w pomieszczeniach takich jak sale koncertowych i audytoria.

Autor rozprawy porównał wyniki pomiarów dla parametru międzyusznej korelacji skrośnej IACC (Interaural Cross-Correlation) uzyskane za pomocą mikrofonów ambisonicznych. Wykazał, że mikrofony Sennheiser Ambeo i Zylia ZM1-3E osiągnęły najmniejsze różnice w stosunku do pomiarów dokonywanych za pomocą manekina akustycznego. Jest to istotne, ponieważ ten parametr jest istotny w ocenie przestrzennego obrazu dźwiękowego.

Doktorant wykazał, że matryca mikrofonowa (mikrofon ambisoniczny) może zastąpić tradycyjne metody pomiarowe, takie jak użycie mikrofonu pomiarowego lub manekina, do pomiarów różnych parametrów akustycznych pomieszczenia. Podejście takie może stanowić uproszczenie procesu pomiarów przestrzennych parametrów akustycznych. Przede wszystkim, zastosowanie mikrofonu ambisonicznego, umożliwia uzyskanie przestrzennej odpowiedzi impulsowej wnętrza, która jest niezbędna do wyznaczenia parametrów związanych z oceną przestrzennością. Najważniejszą korzyścią tej metodologii jest to, że eliminuje ona potrzebę stosowania manekinu pomiarowego, który był wcześniej niezbędny do pomiarów przestrzennych. Wyniki sugerują, że wykorzystanie sztucznej głowy (w zasadzie nie spełnia standardów urządzenia pomiarowego) do pomiarów funkcji IACC może być równie wiarygodne, jak użycie tradycyjnego manekina B&K4100-D. Otwiera to możliwość wykorzystania KU-100 w badaniach akustycznych związanych z dźwiękiem przestrzennym. Dodatkowo, pozwala to na dowolne dostosowanie orientacji ukierunkowania na źródło dźwięku bez konieczności powtarzania pomiarów. Dzięki temu, proces pomiarów staje się bardziej efektywny, co może mieć znaczący wpływ na obszar związany z wyznaczaniem przestrzennych parametrów akustycznych pomieszczeń.

Jak wcześniej wspomniano, autor rozprawy wykazał, że wyniki pomiarów funkcji IACC (Interaural Cross-Correlation) uzyskane za pomocą manekina B&K4100-D i sztucznej głowy KU-100 są praktycznie identyczne, a więc w praktyce nie ma znaczących różnic między wynikami uzyskanymi za pomocą tych dwóch różnych narzędzi pomiarowych. Jest to kolejny istotny wniosek, ponieważ potwierdza, że sztuczna głowa może być używana jako alternatywa w badaniach dźwięku przestrzennego rejestrowanego mikrofonami ambisonicznymi.

Doktorant stwierdził, że wybór metody, która upraszcza funkcję HRTF (Head-Related Transfer Function) jest skomplikowany i zależy od wielu czynników, w tym od rodzaju i rzędu mikrofonu oraz rozdzielczości przestrzennej funkcji HRTF. Wniosek ten wskazuje, że wybór odpowiedniej metody uproszczającej jest istotny w procesie pomiarowym.

Doktorant przeprowadził uproszczoną ocenę dokładności mikrofonów ambisonicznych Sennheiser Ambeo i Zylia ZM1-3E, wskazując, że dokładność w odniesieniu do amplitud odbić w sali nie jest mniejsza niż 2,7 dB. Informacja ta pozwala na określenie granic dokładności stosowania tych mikrofonów.

W powyższym kontekście można stwierdzić, że teza pracy sformułowana jako: „Możliwe jest uzyskanie parametrów akustycznych pomieszczenia przy uwzględnieniu binauralnych parametrów przestrzennych, za pomocą sferycznej matrycy mikrofonowej przy uwzględnieniu funkcji HRTF została wykazana.

Autor potwierdził tezę pracy, która mówi, że **„Możliwe jest uzyskanie zestawu parametrów akustycznych pomieszczenia, ze szczególnym uwzględnieniem binauralnych parametrów przestrzennych, za pomocą jednego przetwornika pomiarowego w postaci sferycznej matrycy mikrofonowej o kontrolowanej kierunkowości przy uwzględnieniu niezależnie mierzonych lub modelowanych funkcji HRTF”**. Jest to kluczowy wniosek, który wskazuje na możliwość skutecznego zastosowania mikrofonów ambisonicznych w pomiarach akustyki wnętrz.

Na podstawie wyników, ale też doświadczenia uzyskanego podczas realizacji badań, doktorant wskazał na potrzebę rozwoju zaproponowanej metodologii. Jednym z kierunków jest badanie mikrofonów ambisonicznych o rzędzie wyższym niż trzy. Autor rozprawy sugeruje wykorzystanie operacji opartych na harmonikach sferycznych (ang. *upscaling*) w celu poprawy dokładności pomiarów. Ważna jest też kontynuacja badań związanych z uproszczeniem rozdzielczości funkcji przestrzennej HRTF (Head-Related Transfer Function) przy użyciu różnych rzędów harmonik sferycznych. W moim odczuciu, jednak najważniejszym aspektem jest rozwinięcie metody kalibracji mikrofonów ambisonicznych właśnie w kontekście pomiarów akustycznych.

Rozprawa ma charakter badawczy, aktualność tematyki rozprawy jest potwierdzona przez źródła literaturowe oraz technologie. Prowadzone badania wpisują się w dyscyplinę, w której doktoryzuje się p. **Maciej Jasiński**. Szczególnie

istotny jest aspekt aplikacyjny rozprawy doktorskiej, uzyskane wyniki mogą stać się przyczynkiem do wprowadzenia nowych metod pomiarów akustyki wewnątrz.

Warto też zauważyć, że obecnie binauralna odpowiedź impulsowa BRIR jest głównie stosowana w systemach rozszerzonej rzeczywistości w połączeniu z dźwiękiem przestrzennym. Niemniej jednak, obserwuje się rosnące zainteresowanie badaczy nad modyfikacją zarówno BRIR, jak i HRIR (Head-Related Impulse Response) w kontekście zastosowania tych funkcji w badaniach akustycznych, co świadczy o aktualności tematyki rozprawy.

Podsumowując, autor pracy przeprowadził kompleksowe badania nad wykorzystaniem mikrofonów ambisonicznych w pomiarach akustycznych pomieszczeń, potwierdzając ich przydatność i dokładność szczególnie w kontekście przestrzennych pomiarów akustycznych. Wynik tych prac może stanowić ważny wkład w połączonych obszarach pomiarów akustyki i rejestracji dźwięku przestrzennego i dobrze wpisuje się w nauki inżynierjno-techniczne oraz dyscyplinę naukową.

Uwagi do dyskusji:

1. Czy istnieje standardowa metoda kalibracji tego typu przetwornika (mikrofon ambisoniczny). Czy autor rozprawy mógłby zaproponować własną metodę na podstawie doświadczeń z badań?
2. Czy autor rozprawy mógłby się pokusić o propozycje nowych parametrów lub zaproponować nowe definicje parametrów, które są ściśle skorelowane z parametrami przestrzennymi oceny jakości wewnątrz uzyskanymi pośrednio z przestrzennej odp. impulsowej (SRIR)?
3. Czy tego typu metodyka badań jest uniwersalna w kontekście projekcji różnych sygnałów fonicznych (doktorant wyznacza wskaźnik czytelności C50) czy ma główne zastosowanie do oceny jakości muzyki we wewnątrz?
4. Czy przykład metody oszacowania błędu pomiarowego (niepewności pomiaru) mógłby posłużyć do wyznaczenia nowych miar błędu?
5. W jakim stopniu zjawisko aliasingu przestrzennego w przypadku wykorzystywanych mikrofonów (i wynikająca z niego częstotliwość graniczna) ogranicza proponowaną metodę pomiarową? Czy oprócz zastosowanych metod pozwalających na minimalizację błędu związanego z ograniczaniem rzędu harmonik sferycznych funkcji przenoszenia głowy HRTF dla wyznaczenia parametru IACC doktorant widzi inne podejścia?
6. Typowo, w końcowym rozdziale obejmującym podsumowanie badań zarysowane są plany na dalsze kierunki badań. Tak też jest w przypadku recenzowanej pracy. Czy doktorant mógłby rozwinąć przedstawione plany, zwłaszcza, że badania akustyki wewnątrz na podstawie przestrzennych odpowiedzi impulsowych są tematem rozwojowym, a ponadto mogą być wykorzystywane w wielu zastosowaniach.

7. W szczególności można zauważyć kierunki prac związane z przestrzennością dźwięku wykorzystujące uczenie maszynowe (Amengual Garí, S., Robinson, P., Calamia P., Room acoustic characterization for binaural rendering: From spatial room impulse responses to deep learning, Conference: International Congress on Acoustics, October 2022). Co prawda dotyczy to przede wszystkim odtwarzania wiarygodnej propagacji dźwięku w rzeczywistości rozszerzonej (Augmented Reality) i tworzenia przekonującej auralizacji. W celu osiągnięcia tego celu, konieczne jest dopasowanie właściwości akustycznych sygnałów wirtualnych do tych występujących w przestrzeni, w której użytkownik się znajduje. Punktem wyjściowym są techniki "Blind Parameter Estimation" (BPE) i "Blind System Identification" (BSI), które pozwalają na uzyskanie parametrów akustycznych pomieszczenia i przybliżonej odpowiedzi impulsowej pomieszczenia (RIR) za pomocą już istniejących źródeł dźwięku w otoczeniu. W omawianym podejściu metody uczenia maszynowego (wykorzystujące modele głębokie) stosowane są w celu rekonstrukcji geometrii i identyfikacji materiałów w scenie wirtualnej, dzięki czemu można bezpośrednio tworzyć modele akustyczne potrzebne do generowania dźwięku. Autorzy cytowanej powyżej pracy starają się ominąć konieczność bezpośredniego oszacowania akustyki poprzez bezpośrednie wbudowanie właściwości akustycznych przestrzeni w dowolny sygnał. Czy autor rozprawy mógłby skomentować, w jakim stopniu metody pomiarowe związane z badaniem parametrów akustycznych, w tym przestrzenności mogłyby wspomóc takie podejście.

Uwagi natury edycyjnej (głównie dotyczy bibliografii)

Jak wcześniej wspomniano, układ pracy jest niestandardowy, gdyż rozdział zawierający cel i tezy pracy (taki jest tytuł rozdziału) pojawia się w rozdziale 6. Dobrze jednak, że doktorant zarysował cel badań oraz zakres rozprawy we Wstępie. Rozdziały 2-4 zawierają odniesienie do podstaw pomiarów akustyki wnętrza, zaś rozdział 5 nosi tytuł: przegląd stanu wiedzy (w kontekście zaproponowanej tezy badawczej). Pomimo wspomnianego nietypowego układu pracy, ma ona logiczną strukturę. Wyniki badań zostały przedstawione w sposób zwięzły. Praca jest poprawna od strony redakcyjnej, edycja rozprawy jest dość staranna, chociaż zdarzają się różne usterki (głównie w stosowaniu apostrofu w nazwiskach zagranicznych).

Podsumowanie i dyskusja oraz wnioski są oddzielnymi rozdziałami, zwykle dyskusja i wnioski są jednym rozdziałem, zaś Podsumowanie i dalszy rozwój badań – finalnym.

W pracy brakuje listy rysunków, tabel oraz wykazu ważniejszych skrótów, w tym odniesienia do symboli i oznaczeń matematycznych,

W niektórych pozycjach brakuje pełnych danych bibliograficznych, np.:

Brinkmann, F. *et al.*, "Recent Advances in an Open Software for Numerical HRTF Calculation," *Journal Audio Engineering Society*, , vol. (w druku), 2023.

Właściwy zapis: F. Brinkmann, W. Kreuzer, J. Thomsen, S. Dombrovskis, K. Pollack, S. Weinzierl and P. Majdak, "Recent Advances in an Open Software for Numerical HRTF Calculation" *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 71, no. 7/8, pp. 502–514, (2023 July/August). DOI: <https://doi.org/10.17743/jaes.2022.0078>

Brakuje informacji dotyczących dat i miejsc konferencji, doi przy nowszych pozycjach bibliografii, itp.

Podsumowanie

W podsumowaniu stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska p. **Macieja Jasińskiego spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania** stawiane rozprawom doktorskim w aktualnie obowiązującej Ustawie o stopniach i tytule naukowym. W związku z tym wnoszę o **dopuszczenie rozprawy doktorskiej p. mgra inż. Macieja Jasińskiego do publicznej obrony.**

Ze względu na osiągnięte w rozprawie wyniki, w szczególności dotyczących analizy odstępstw w pomiarach parametrów akustyki wewnątrz oraz opublikowanie tych wyników w recenzowanych czasopismach oraz na prestiżowych konferencjach tematycznych – **wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.**

