

Prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski
Politechnika Poznańska
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Instytut Automatyki i Robotyki
Zakład Układów Elektronicznych
i Przetwarzania Sygnałów

OCENA

rozprawy doktorskiej pt.: *„Zastosowanie konwolucyjnych sieci neuronowych do rozpoznawania obiektów w radiolokacji”*
Doktorant kpt. mgr inż. Błażej Ślesicki

1 Ocena trafności doboru tematyki pracy, określenia problemu naukowego oraz celu i zakresu przeprowadzonych badań

Tematem ocenianej rozprawy doktorskiej, napisanej w języku polskim, jest rozpoznawanie uczestników ruchu drogowego (pojazdów, rowerzystów, pieszych) za pomocą splotowych sieci neuronowych, na podstawie spektrogramów krótkoczasowej transformacji Fouriera, obliczanych z danych pozyskiwanych za pomocą radaru z falą ciągłą o modulowanej częstotliwości.

Dzięki opracowanej i przetestowanej przez Doktoranta technice można nie tylko skutecznie rozpoznawać wymienione powyżej obiekty, ale także oceniać ich odległość, kierunek i prędkość ruchu, a uwzględniając tzw. efekt mikro-dopplerowski, można jeszcze brać pod uwagę ruchy w obrębie rozpoznawanych obiektów, np. ruchy nóg rowerzysty podczas pedałowania, co jeszcze dodatkowo poprawia skuteczność opracowanej metody.

Prace badawcze podjęte i przedstawione w ocenianej rozprawie zaliczam do bardzo ważnej i w pełni aktualnej tematyki, która w ostatnich latach nabiera coraz większego znaczenia w związku z rozwojem pojazdów autonomicznych i systemów ADAS wspomagających kierowców.

Tematyka rozprawy wraz z trafnie określonym problemem badawczym mają więc ważne aplikacje i ogromne znaczenie, ponieważ pozwalają na poprawianie bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz ruchu w zatłoczonych miejscach użyteczności publicznej (centrach rozrywkowych i zakupowych, dworcach, lotniskach itp.). Tematyka ta została trafnie przypisana do dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Na stronie 17 rozprawy Doktorant podał następujący cel badawczy:

„Celem pracy jest opracowanie metody detekcji i rozpoznawania obiektów za pomocą radaru z falą ciągłą o modulowanej częstotliwości (ang. Frequency-Modulated Continuous Wave, FMCW), krótkoczasowej transformacji Fouriera (ang. Short Time Fourier Transform STFT) a także dedykowanej struktury konwolucyjnej sieci neuronowej (ang. Convolutional Neural Network CNN).”

Ten cel, co uważam za niepotrzebne, został (w formie skróconej) powtórzony na str. 49 i ponownie na str. 91 tekstu rozprawy.

Na str. 17 Doktorant dodał:

„Ponadto, za cel autor postawił sobie również stworzenie kompleksowego i uniwersalnego kompendium wiedzy dotyczącego zastosowania sztucznej inteligencji w radiolokacji.”

Doktorant sformułował także następującą tezę naukową (str. 17):

„Możliwe jest stworzenie zautomatyzowanej metody pozwalającej na detekcję i jednoznaczne rozpoznanie wybranych obiektów ruchu drogowego za pomocą radaru FMCW stosując krótkoczasową transformację Fouriera echa odebranego sygnału oraz dedykowaną strukturę konwolucyjnej sieci neuronowej jako klasyfikatora obiektów.”

Uważam, że zarówno cele pracy jak i teza naukowa są zgodne z podjętym tematem i zakresem przeprowadzonych badań. Sformułowane są jasno i precyzyjnie, choć zastosowane w nich bardzo „górnolotne” i „metafizyczne” określenie „stworzenie” zastąpiłbym „przyziemnym” lecz w pełni naukowym określeniem „opracowanie”.

Tytuł rozprawy trafnie określa zakres podjętych i przeprowadzonych badań, które dotyczą, jak już to wcześniej zaznaczyłem, ważnego i w pełni aktualnego a nawet w dużym stopniu nowatorskiego zagadnienia naukowego o dużych walorach aplikacyjnych. Doktorant przeprowadził skrupulatnie analizę zastanego stanu wiedzy oraz opisał własne pomysły, prace badawcze i eksperymenty zarówno symulacyjne jak i wykonane w warunkach rzeczywistych.

2 Ocena treści, tekstu rozprawy, analizy źródeł i dorobku publikacyjnego Doktoranta

Recenzowana rozprawa, jak już wspomniałem, została napisana w języku polskim. Jej tekst zawiera 120 stron.

Na stronie 5 tekstu rozprawy jest streszczenie w języku polskim a na stronie 7 — streszczenie w języku angielskim. Na stronach 11 i 12 Doktorant podał listę używanych w pracy skrótów a listę używanych symboli umieścił na stronach 13 i 14.

Właściwa część tekstu rozprawy rozpoczyna się od wstępu, który jest rozdziałem bez przypisanego numeru. Dalsze rozdziały są już ponumerowane od 1 do 6.

W rozdziale 1 pt.: „Sztuczna inteligencja” Doktorant w dużym skrócie omówił rozwój koncepcji tzw. sztucznych sieci neuronowych, koncentrując się na splotowych sieciach neuronowych.

Rozdział 2 pt.: „Konwolucyjne sieci neuronowe w radiolokacji” zawiera omówienie stanu wiedzy i przegląd literatury dotyczącej tematyki rozprawy.

Rozdział 3 pt.: „Analiza radaru FMCW oraz transformacji STFT” został poświęcony opisaniu radaru z falą ciągłą o modulowanej częstotliwości oraz przedstawieniu krótkoczasowej transformacji Fouriera.

Te rozdziały są wprowadzeniem do tematyki rozprawy, pełnią więc funkcję pomocniczą. Zasadniczą, oryginalną część rozprawy, w której Doktorant zawarł swoje wyniki badawcze, tworzą rozdziały 4, 5 i 6.

Pierwszym z nich jest rozdział 4 pt.: „Analiza opracowanych metod”, w którym Doktorant opisał kolejno: metodę symulowania pomiarów a więc zarówno radaru jak i środowiska oraz rozpoznawanych obiektów, metodę tworzenia spektrogramów oraz dobór odpowiedniej splotowej sieci neuronowej do rozpoznawania obiektów.

Rozdział 5 pt.: „Walidacja eksperymentalna” zawiera opis opracowanych baz danych, zarówno bazy spektrogramów symulowanych jak i spektrogramów obliczonych na podstawie pomiarów. W tym rozdziale Doktorant podał także otrzymane wyniki i porównał je z wynikami analogicznych badań na podstawie studiów literaturowych.

Główną część tekstu rozprawy zamyka rozdział 6 pt.: „Podsumowanie i kierunki dalszych badań”.

Pracę zamykają: spis literatury zawierający 77 pozycji, które dobrze i wyczerpująco przedstawiają aktualny stan wiedzy i badań w zakresie objętym rozprawą, a także spis rysunków, spis tabel, wykaz najważniejszych publikacji Autora rozprawy i kody źródłowe opracowanych programów i funkcji.

Wykaz najważniejszych publikacji Autora rozprawy zawiera osiem artykułów:

1. B. Ślesicki, A. Kawalec, A. Ślesicka, The Study of the possibility of applying parallel programming to the algorithms of space-time adaptive processing, *Problems of Mechatronics. Armament, Aviation, Safety Engineering*, 13 (3), 2022, pp. 27–42, 70 pkt.
2. A. Ślesicka, A. Kawalec, B. Ślesicki, Capon-like method for direction of arrival estimation using TDM MIMO RADAR, *Metrology And Measurement Systems* 30 (3), 2023, 100 pkt.
3. A. Kawalec, A. Ślesicka, B. Ślesicki, A new statistical method for determining the clutter covariance matrix in spatial-temporal adaptive processing of a radar signal, *Sensors*, 23, 2023, 100 pkt.
4. A. Ślesicka, B. Ślesicki, The concept of disrupting anti-radiation missiles in a radar decoy system, *Aviation and Security Issues*, 3(1), 2023, pp. 167–181, 100 pkt.
5. B. Ślesicki, A. Ślesicka, A. Kawalec, Improve the safety of air transport, especially in militarized terrain, by use of side looking airborne radar and space time adaptive processing, *Scientific Journal of Silesian University of Technology, Series Transport*, 123, 2024, pp. 335–346, 100 pkt.
6. A. Ślesicka, B. Ślesicki, J. Iwański, A. Truskowski, Application of space-time adaptive signal processing in radiolocation, *Aviation and Security Issues*, 4(2), 2024, 100 pkt.
7. B. Ślesicki, A. Ślesicka, A new method for traffic participant recognition using Doppler radar signature and convolutional neural networks, *Sensors*, 24, 2024, 100 pkt.
8. B. Ślesicki, A. Ślesicka, A. Kawalec, M. Walenczykowska, Improving recognition of road users via Doppler radar data and deep learning convolutional networks, *Electronics* 13, 2024, 100 pkt.

Kpt. mgr inż. Błażej Ślesicki jest więc współautorem ośmiu publikacji o tematyce zbliżonej do tematyki ocenianej rozprawy doktorskiej, przy czym w czterech z nich jest pierwszym współautorem.

Biorąc zatem pod uwagę powyższe zestawienie artykułów naukowych, dorobek publikacyjny Doktoranta oceniam jako bardzo wartościowy i w pełni wspierający ocenianą rozprawę.

Kompozycja pracy jest prawidłowa. Tekst jest jasny, rzeczowy i treściwy. Doktorant najpierw przeprowadził skrupulatnie analizę zastanego stanu wiedzy a następnie opisał własne prace badawcze i eksperymentalne.

Można jednak mieć zastrzeżenia co do skrupulatności edycyjnej tekstu rozprawy, poprawności językowej, gramatycznej, stylistycznej, interpunkcyjnej oraz typograficznej. Ta niedbałość — mnie jako człowieka zwracającego uwagę na jakość tekstów naukowych — razi, ale nie obniża wartości osiągniętych wyników. Wybrane niedociągnięcia omówiłem szczegółowo w sekcji 4 pt.: „Uwagi szczegółowe”.

3 Ocena uzyskanych wyników i przeprowadzonych eksperymentów oraz poprawności ich przedstawienia

Kpt. mgr inż. Błażej Ślesicki zaproponował i przetestował zastosowanie metod sztucznej inteligencji a ściślej — splotowych sieci neuronowych o odpowiednio dobranej strukturze do wykrywania obiektów za pomocą nowoczesnej techniki radarowej z falą ciągłą z modulacją częstotliwości czyli tzw. radaru FMCW (ang. frequency-modulated continuous wave).

Do głównych zadań podjętych i wykonanych przez Doktoranta oraz do najważniejszych uzyskanych przez Niego wyników należy, moim zdaniem, zaliczyć:

- opracowanie metody detekcji i rozpoznawania wybranych uczestników ruchu drogowego na podstawie spektrogramów obliczanych za pomocą krótkoczasowej transformacji Fouriera sygnałów radaru FMCW z wykorzystaniem dobrze dobranych do tego celu splotowych sieci neuronowych
- przygotowanie eksperymentalnych baz danych (z wyszczególnieniem danych treningowych, testowych oraz walidacyjnych) zarówno spektrogramów otrzymanych symulacyjnie jak i obliczonych na podstawie pomiarów rzeczywistych obiektów obserwowanych za pomocą radaru FMCW pracującego przy częstotliwości 24 GHz
- wykonanie badań eksperymentalnych opracowanej metody za pomocą symulacji z radarem FMCW 77 GHz oraz dodatkowo pomiarów z radarem FMCW 24 GHz
- przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników i wykazanie ich wyższości nad znanymi z literatury, a tym samym potwierdzenie tezy naukowej rozprawy.

Wymienione powyżej osiągnięcia Doktoranta oceniam bardzo wysoko. Świadczą one nie tylko o Jego pomysłowości i dużej wiedzy w zakresie zastosowania sztucznej inteligencji w radiolokacji, ale także o systematyczności, skrupulatności, pracowitości i skuteczności osiągania założonych celów badawczych.

W symulacjach Doktorant badał rozpoznawanie 10-ciu następujących klas obiektów:

1. pojedynczy pieszy
2. dwóch/dwoje pieszych
3. trzech/troje pieszych



4. pojedynczy rowerzysta
5. pojedynczy samochód
6. pojedynczy pieszy oraz pojedynczy samochód
7. pojedynczy pieszy oraz pojedynczy rowerzysta
8. pojedynczy samochód oraz pojedynczy rowerzysta
9. dwóch/dwoje pieszych oraz pojedynczy samochód
10. dwóch/dwoje pieszych oraz pojedynczy rowerzysta

a w eksperymentach pomiarowych — już tylko 6-ciu następujących klas obiektów:

1. pojedynczy pieszy
2. dwóch/dwoje pieszych
3. pojedynczy rowerzysta
4. pojedynczy samochód
5. pojedynczy pieszy oraz pojedynczy samochód
6. pojedynczy pieszy oraz pojedynczy rowerzysta.

Moim zdaniem, nawet jeśli wyniki eksperymentów pomiarowych rozpoznawania aż 10-ciu klas obiektów okazałyby się nie w pełni zadowalające, np. ze względu na szумы pomiarowe, to ciekawe byłoby ich przeprowadzenie i pokazanie tego, gdyż wskazywałoby to na ograniczenia opracowanej metody. Podobnie, ciekawe byłoby pokazanie krzywej uczenia także dla najgorszego przypadku w uzupełnieniu tej przedstawionej na rysunku 5.2 dla najlepszego przypadku.

W wykonanych eksperymentach pomiarowych badane obiekty poruszały się tylko prostopadłe do zbudowanego stanowiska pomiarowego, o czym Doktorant napisał na str. 81 i pokazał to na rys. 5,3. Ciekawe byłoby także zbadanie obiektów zbliżających się i oddalających się wzdłuż osi pomiaru w celu pełnego przetestowania wpływu zjawiska dopplerowskiego na wyniki działania opracowanej metody.

Język pracy jest poprawny. Dużą zasługą Doktoranta jest to, że starał się dobierać polskie odpowiedniki zamiast sosowanych przez wielu innych żargonowych określeń wziętych bezpośrednio z języka angielskiego. Przykładem jest trafnie zaproponowana nazwa „swoistość” zamiast „specyficzność”, „rozszerzanie danych” zamiast „augmentacja danych” i „grupowanie” zamiast „pooling” (choć Doktorant nie był w pełni konsekwentny).

Przykładem odwrotnym jest jednak stosowanie nazwy „konwolucyjne sieci neuronowe” zamiast „splotowe sieci neuronowe”. Jeszcze ważniejszym przykładem jest częste używanie określenia „efekt mikro-Dopplera”, którego nie zalecałbym nawet w niedbałym języku żargonowym, zamiast poprawnej nazwy „efekt mikro-dopplerowski”. Poprawna nazwa pojawiła się w pracy niestety tylko jeden raz na str. 40. Fizykiem i matematykiem, który zaobserwował i opisał zjawisko dopplerowskie był Christian Andreas Doppler, zaś żaden mikro-Doppler nie istniał.

Wyrażenia matematyczne są na ogół poprawne. Niestety skutek nieuwagi i pewnej niestaranności Doktoranta, który zapewne stosował technikę edycyjną „kopiuj i wklej” niektóre



z nich są nieprawidłowe. Na przykład w tabeli 1.2 w drugim i w M -tym wierszu macierzy pomyłek zamiast powtarzającej się liczby $m_{1,1}$ powinno być odpowiednio $m_{2,1}, m_{2,2}, \dots, m_{2,M}$ i $m_{M,1}, m_{M,2}, \dots, m_{M,M}$. Ponadto Doktorant nie określił wartości m w ostatnim wierszu i ostatniej kolumnie tabeli 1.2.

Wyrażenie (4.5) na str. 70 jest błędne. Po pierwsze, zamiast

$$128 \times 10 \times +128 = 1290$$

powinno być

$$128 \times 10 + 10 = 1290.$$

Po drugie, należało podać dwa wzory, tzn. nie tylko wzór dla 10-ciu wyjść, ale także wzór dla 6-ciu wyjść.

Określenie np. na str. 27 i w liście symboli na str. 13 „macierz dwuwymiarowa” jest niepoprawne. Po pierwsze, każda macierz, jako dwuwskaźnikowa tablica liczb, jest, w znaczeniu użytym przez Doktoranta, „dwuwymiarowa”. Po drugie, przez wymiar macierzy rozumie się parę liczb złożoną z liczby wierszy i liczby kolumn, więc określenie „macierz dwuwymiarowa” należałoby raczej rozumieć w sensie macierz 2×2 . Z podobnych powodów niepoprawne jest określenie „wektor jednowymiarowy” na str. 29.

Podsumowując podkreślam, że uzyskane przez Doktoranta wyniki zasługują na bardzo pozytywne ocenę. Mają nie tylko wartość poznawczą, ale przede wszystkim duże walory aplikacyjne. Doktorant rozwiązał postawione problemy, dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych.

4 Wybrane uwagi szczegółowe

Poniżej zebrałem niektóre uwagi szczegółowe, które nasunęły mi się podczas czytania tekstu rozprawy:

- str. 3: „piętą achillesową” Doktoranta jest nietrafne używanie liter „ą” i „ę”; już w krótkich podziękowaniach zrobił dwa takie błędy, bo zamiast „kieruje do całej rodziny” powinno być „kieruję do całej rodziny” a zamiast „dziękuje mojej kochanej żonie” powinno być „dziękuję mojej kochanej żonie”
- str. 5 (wiersz 13_d): sformułowanie „odbitego od obiektu za pomocą krótkoczasowej transformacji Fouriera” jest mylące
- str. 5 (wiersz 4_d): zamiast „dowodły o możliwości” powinno być „dowodły możliwości”
- str. 11 (wiersz 3^g): tłumaczenie „automatic target recognition” jako „automatyczne rozpoznawanie obrazów” jest nieściśle
- str. 11 (wiersz 7^g): zamiast „skompresowany impulsu” powinno być „skompresowany impuls”
- str. 11 (wiersz 12^g): zamiast „oparty na gradientach” powinno być „oparte na gradientach”
- str. 11 (wiersz 3_d): zamiast „Moving Target Detecyon” powinno być „moving target detection”

- str. 12 (wiersz 6^g): zastosowanie oznaczenia f dla funkcji aktywacji neuronu i jednocześnie dla częstotliwości, np. $f(t)$ we wzorze (3.1) jest raczej złym pomysłem
- str. 15 (wiersz 7^g): zamiast „oparte o głębokie sieci neuronowe” proponuję „oparte na głębokich sieciach neuronowych”
- str. 21 (wiersz 5_d): zamiast „To od fascynacji możliwości tego narządu” powinno być „To od fascynacji możliwościami tego narządu”
- str. 22 (wiersz 8_d): zamiast „sieciach neuronowych” powinno być „sieci neuronowych”
- str. 25: pierwszy wykres na rys. 1.4 ilustruje funkcję $f(x) = ax$ a nie — jak podał Doktorant — funkcję $f(x) = ax + b$
- str. 27 (wiersz 8_d): o co chodzi w sformułowaniu „dokonuje operacji iloczynu skalarnego Hadamarda”? (operacja definiowana jako iloczyn Hadamarda nie jest iloczynem skalar-nym)
- str. 28 (wiersz 3^g): o co chodzi w sformułowaniu „z krokiem 2”?
- str. 31 (wiersz 9^g): zamiast „To czyni sieci CNN jako doskonałe narzędzie” powinno być „To czyni sieci CNN doskonałym narzędziem”
- str. 31: na rysunku 1.8 brakuje oznaczenia „warstwa spłaszczająca”
- str. 37 (wiersz 2_d): zamiast „Radarowa chmury punktów” powinno być „Radarowe chmury punktów”
- str. 38 (wiersz 1^g): czym są „trójwymiarowe punkty”?
- str. 43: na rys. 2.5 brak jest chociaż przybliżonych wartości na osiach układu współrzęd-nych
- str. 52: określenie funkcji $f(t)$ we wzorze (3.1) wymaga komentarza, ponieważ całkowita częstotliwość jest równa

$$f(t) = \beta t + f_{\min}$$

- str. 53 (wiersz 1_d): zamiast „- 20” i „+ 65 °C” powinno być „-20” i „+65 °C”
- str. 54 (wiersz 11_d): zamiast „częstotliwość próbkowania” powinno być „szybkość prób-kowania” (ang. sampling rate)¹

¹Jestem absolutnym przeciwnikiem stosowania nazwy „częstotliwość próbkowania” (nie mierzymy jej przecież w hercach a w próbkach na sekundę). Jest to niepoprawne i prowadzi do nieporozumień. Należy bowiem rozróż-niać pojęcia: „częstotliwość” (ang. frequency) jako właściwość sygnału i „szybkość” (ang. rate) jako właściwość procesu wykonywanego nad sygnałem i powstałego strumienia danych. Dlatego należy wyłącznie stosować okre-ślenie „szybkość próbkowania” i należy ją mierzyć w próbkach na sekundę (S/s), podobnie jak szybkość binarnego strumienia danych mierzy się w bitach na sekundę (b/s), a nie w hercach. Dzięki temu można jednoznacznie rozróżniać powszechnie stosowane pojęcia: „częstotliwość Nyquista” i „szybkość Nyquista”. Przez częstotli-wość Nyquista rozumie się maksymalną częstotliwość widma sygnału dolnopasmowego, który można próbkować z określoną szybkością, a przez szybkość Nyquista — minimalną szybkość, z którą można próbować sygnał dolnopasmowy o określonej maksymalnej częstotliwości widma. Skutkiem stosowania niepoprawnego terminu „częstotliwość próbkowania” jest więc niejednoznaczność pojęcia „częstotliwość Nyquista”.

- str. 55 (wiersz 7^g): Doktorant stosuje różne czcionki dla oznaczeń matematycznych w tekście, we wzorach i na wykresach, co jest niepoprawne; w zaznaczonym miejscu zamiast „f₀” powinno być np. f_0
- str. 65 (wiersz 5^g): zamiast „o liczbie wierszy równej czasie trwania pomiaru oraz liczbie kolumn równej liczbie próbek” powinno być „o liczbie wierszy równej (dyskretyzowanemu) czasowi trwania pomiaru oraz liczbie kolumn równej liczbie próbek”
- str. 70 (wiersz 2^g): suma wszystkich parametrów określonych wzorami (4.1)–(4.5) to nie 270240 — jak podał Doktorant — a 271530
- str. 77 (wiersz 14^g): zamiast „mających na celu określić” powinno być „mających na celu określenie”
- str. 78 (wiersz 9^g) i str. 86: zamiast „Po za” powinno być „Poza”
- str. 87: wnioski sformułowane przez Doktoranta wymagają szerszego wyjaśnienia, a zwłaszcza stwierdzenia: „Albo z drugiej strony warto by było w przyszłości głębiej pochylić się na sposobem przetwarzania surowych sygnałów celem otrzymania przejrzystszych spektrogramów. Mimo to doprowadzenie do sytuacji, w której każda klasa zawierała po 1000 sztucznie uzyskanych obrazów pozwoliło na osiągnięcie wysokiej dokładności klasyfikacji.”.

5 Konkluzja

Podsumowując powyższą charakterystykę recenzowanej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Pan kpt. mgr inż. Błażej Ślesicki zamieścił w niej wartościowe i oryginalne wyniki prac przeprowadzonych przez Niego pod kierunkiem Promotora rozprawy Pana Profesora dr. hab. inż. Adama Kawalca i Promotorki/Promotora pomocniczego Pani kpt. dr inż. Anny Ślesickiej.

Oceniam, że Doktorant osiągnął zakładane cele badawcze i wykazał prawdziwość postawionej tezy naukowej. Stwierdzam więc, że przedłożona praca bardzo dobrze spełnia wymagania stawiane przez stosowne przepisy rozprawom doktorskim i uważam, że Pan kpt. mgr inż. Błażej Ślesicki nie tylko powinien być dopuszczony do dalszych etapów procedury doktorskiej, w tym do publicznej obrony ocenionej przeze mnie rozprawy, ale także, ze względu na oryginalność i nowatorski charakter uzyskanych przez Niego wyników oraz Jego duży dorobek publikacyjny, należy rozważyć wyróżnienie tej rozprawy.

