



Politechnika Łódzka

Instytut Elektroniki

Łódź, 17 maja 2025 roku

Pan

prof. dr hab. inż. Jan K. Jabczyński

Przewodniczący Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego

ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2

00-908 Warszawa

Szanowny Panie Profesorze,

przesyłam moją pozytywną recenzję rozprawy doktorskiej Pana kpt. mgr inż. Błażeja Ślesickiego pt. **Zastosowanie konwolucyjnych sieci neuronowych do rozpoznawania obiektów w radiolokacji**. Informuję, że rozprawa ma potencjał do wyróżnienia. Zazaczyłem w recenzji, że decyzję o wyróżnieniu rozprawy będę mógł podjąć po publicznej obronie rozprawy.

Do recenzji dołączam podpisaną umowę o dzieło na wykonanie recenzji rozprawy oraz wymagane oświadczenie.

Z uszanowaniem

Paweł Strumiłło



Instytut Elektroniki

90-924 Łódź, ul. Wólczańska 211/215, budynek B9

tel. 042 636 00 65, 042 631 26 26, fax 042 636 22 38, e-mail: ie@p.lodz.pl, www.eletel.p.lodz.pl

NIP: 727-002-18-95, Regon: 000001582

17 maja 2025 r.

prof. dr hab. inż. Paweł Strumiłło
Instytut Elektroniki
Politechniki Łódzkiej

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA,
ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE
WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ

Tytuł rozprawy: **Zastosowanie konwolucyjnych sieci neuronowych do rozpoznawania obiektów w radiolokacji**

Autor rozprawy: kpt. mgr inż. Błażej Ślesicki
Promotor: prof. dr hab. inż. Adam Kawalec
Promotor pomocniczy: kpt. dr inż. Anna Ślesicka

I. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono trafnie i jasno sformułowane?

Celem przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej jest opracowanie techniki detekcji i rozpoznawania obiektów z wykorzystaniem radaru z falą ciągłą o modulowanej częstotliwości (ang. *Frequency Modulated Continuous Wave Radar, FMCW Radar*). Do analizy sygnału echa radaru FMCW Autor zastosował prawa propagacji fal elektromagnetycznych, analizę widmową sygnału oraz techniki uczenia maszynowego.

Tezę rozprawy sformułowano w brzmieniu:

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

Zagadnienie naukowe podjęte w rozprawie zostało konkretnie i jasno zdefiniowane. Autor opracował szereg metod obliczeniowych do analizy sygnału echa z radaru o modulowanej częstotliwości. Zastosował konwolucyjną sieć neuronową, transformację Fouriera i oryginalne wykorzystanie tzw. zjawiska mikro-Dopplera. Pokazał skuteczne połączenie wymienionych technik obliczeniowych. Uzyskał oryginalne wyniki badań, które mają ważny wymiar praktyczny obejmujący rozpoznawanie obiektów w radiolokacji i szereg potencjalnych zastosowań obejmujących wykrywanie i śledzenie obiektów w ruchu w przestrzeniach publicznych.

II. Czy autor rozwiązał postawiony problem i czy użył do tego właściwych metod dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych?

W rozprawie zastosowano zobrazowanie sygnału echa radaru FMCW za pomocą krótkoczasowej transformacji Fouriera oraz konwolucyjne sieci neuronowe do analizy tego sygnału.

Autor rozwiązał podstawowy problem na podstawie zaproponowanej oryginalnej metody badawczej, w której zastosował:

- **radar FMCW** (z falą ciągłą o modulowanej częstotliwości), pracujący na częstotliwości 24 GHz i 77 GHz,
- **krótkoczasową transformację Fouriera (STFT)** jako metodę dwuwymiarowej czasowo-częstotliwościowej reprezentacji niestacjonarnego sygnału echa radaru FMCW,
- **konwolucyjne sieci neuronowe (CNN)**, które są obecnie jedną z podstawowych architektur sztucznych sieci neuronowych wykorzystywanych do analizy obrazów – ich zastosowanie do przetwarzania danych radarowych jest obecnie bardzo aktywnie rozwijanym kierunkiem badań.

Autor zastosował dwuetapową metodę badawczą w celu weryfikacji opracowanej metody rozpoznawania obiektów (w tym obiektów w ruchu) na podstawie sygnału echa radaru FMCW:

1. Symulacja komputerowa radaru FMCW i obiektów badanych.
2. Badania eksperymentalne w rzeczywistym środowisku pomiarowym z wykorzystaniem radaru FMCW

Ad.1. W zakresie badań symulacyjnych Autor opracował dwa modele radaru FMCW pracujących z częstotliwością 24 GHz i 77 GHz oraz trójwymiarowe modele geometryczne pieszego, rowerzysty i samochodu. Szczegółowy wykaz parametrów tych modeli pokazano w tabeli 4.1. W następnym kroku badań Autor dokonał doboru struktury głębokiej sieci neuronowej, składającej się z czterech warstw konwolucyjnych dokonujących kaskadowej filtracji i redukcji rozmiaru obrazu obliczonych spektrogramów, warstwy przetwarzającej obraz do postaci wektorowej (tzw. warstwa wypłaszczająca) oraz sieci perceptronowej, w układzie w pełni połączonych neuronów, służącej do klasyfikacji danych. Uzasadnił decyzję projektową na rzecz autorskiej struktury sieci w odróżnieniu od gotowych modeli sieci np. ImageNet, ResNet, U-net. Zaproponowana przez Autora głęboka sieć neuronowa wyspecjalizowana do analizy obrazów spektrogramów sygnału echa radaru składa się z 270 240 parametrów. Autor zbudował obszerną bazę spektrogramów liczącą po 1000 spektrogramów dla każdej klasy analizowanych obiektów (10 klas dla radaru pracującego z częstotliwością 77 GHz i 6 klas dla radaru pracującego z częstotliwości 24 GHz). Dla zbioru testowego i dla modeli obydwu symulowanych radarów Autor uzyskał duże wartości wskaźników klasyfikacji klas. Większość klas była klasyfikowana ze 100% dokładnością a najmniejsza wartość czułości wyniosła 0,798 dla radaru 77 GHz.

Ad.2. W zakresie badań eksperymentalnych w rzeczywistym środowisku Autor zastosował aparaturę pomiarową składającą się z radaru uRAD v1.2 pracującego z częstotliwością

24 GHz umieszczonego na statywie na wysokości ok. 1 m i podłączonego do komputera. Przeprowadzono serie kilkudziesięciu pomiarów dla 6 klas obiektów, które były opromieniowane przez radar. Z uwagi na zbyt małą liczbę przykładów wymaganych do treningu głębokich sieci neuronowych dokonano zwiększenia liczby obrazów spektrogramów poprzez modyfikacje obrazów polegające na dodaniu zakłóceń, przekształceniom skali jasności obrazów oraz poddaniu obrazów przekształceniom geometrycznym tak aby uzyskać 1000 obrazów dla każdej z klas obiektów. Podobnie jak dla badań symulacyjnych uzyskano dużą dokładność rozpoznawania obiektów, tj. w prezentowanej w Tabeli 5.5 macierzy pomyłek dokładność rozpoznania klas nie była mniejsza niż 0,867 a z innych wskaźników jakości klasyfikacji najmniejszą wartość zanotowano dla precyzji 0,853.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że Autor użył właściwych metod badawczych. Pokazał, że posiadał umiejętność planowania badań zarówno na drodze symulacji jak i eksperymentu, oraz umiejętność zastosowania najnowszych technik analizy danych z zastosowaniem uczenia maszynowego oraz umiejętność interpretacji uzyskanych wyników a także ich dyskusji.

III. Czy tematyka rozprawy jest aktualna i dostatecznie ważna?

Tematyka pracy doktorskiej jest aktualna i ważna. W odniesieniu do znaczenia tematyki należy stwierdzić, że:

- praca podejmuje złożone, interdyscyplinarne zagadnienie łączące technologię radarową, analizę sygnałów i sztuczną inteligencję,
- Autor opracował i przetestował własną metodę rozpoznawania obiektów w ruchu, której skuteczność potwierdzono w symulacjach i badaniach eksperymentalnych,
- wyniki badań zawarte w rozprawie mogą znaleźć zastosowanie w identyfikacji obiektów w przestrzeniach publicznych, drogach, lotniskach, stadionach sportowych oraz w rozpoznawaniu pola walki itp.

Liczne cytowana w pracy literatura tematu z ostatnich kilku lat świadczy o aktualności badań pojętych w recenzowanej rozprawie.

IV. Na czym polega oryginalny dorobek autora i jakie jest jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?

Do głównych, oryginalnych osiągnięć pracy zaliczam:

1. Opracowanie metody detekcji i klasyfikacji uczestników ruchu drogowego (pieszych, rowerzystów, samochodów) z wykorzystaniem radaru z falą ciągłą o modulowanej częstotliwości, analizy widmowej sygnału i konwolucyjnej sieci neuronowej.
2. Dobór struktury konwolucyjnej sieci neuronowej odpowiedniej do specyfiki zastosowania w technice radarowej.
3. Opracowanie bazy danych symulowanych sygnałów radarowych oraz sygnałów radarowych uzyskanych z eksperymentów pomiarowych wykonanych w rzeczywistym środowisku rzeczywistych.
4. Weryfikacja opracowanej metody za pomocą badań symulacyjnych oraz badań eksperymentalnych w rzeczywistym środowisku pomiarowym.

Praca dotyczy bardzo aktualnego problemu i wnosi oryginalny wkład w rozwój technologii detekcji i rozpoznawania obiektów przy użyciu radarów FMCW i technik sztucznej inteligencji.

V. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy autora, wiedzy na zaawansowanych poziomie, o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk technicznych oraz o charakterze szczegółowym, odpowiadającej obszarowi prowadzonych badań naukowych?

W pierwszych dwóch rozdziałach Autor zwięźle opisał podstawowe architektury sztucznych sieci neuronowych (w tym architekturę sieci głębokich) oraz omówił metody uczenia maszynowego, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania tych metod w radiolokacji. Opis ten poparł cytowaniami licznych źródeł literaturowych, są to źródła [27-58]. W przeważającej liczbie są to publikacje z ostatnich kilku lat. Podsumowanie tych prac Autor przedstawił w przejrzystej postaci tabelarycznej. Wskazał na możliwość łącznego zastosowania krótkoczasowej transformacji Fouriera wraz z głębokimi sieciami neuronowymi, tj. podejścia badawczego niedokumentowanego w literaturze, które stanowi oryginalną technikę analizy sygnałów echa radaru FMCW.

Pełny wykaz cytowanych w pracy publikacji jest obszerny i liczy 77 pozycji.

W wykazie literatury wydzielono sekcję zawierającą 8 najważniejszych współautorskich publikacji Autora dotyczących tematyki rozprawy. Publikacje te znajdują się w wykazie czasopism punktowanych MNiSW, z których 7 to publikacje o liczbie punktów 100.

VI. Jakie są wady i słabe strony rozprawy?

Proponowane brzmienie tezy rozprawy:

Możliwe jest opracowanie zautomatyzowanej metody detekcji i rozpoznawania wybranych obiektów ruchu drogowego na podstawie klasyfikacji krótkookresowego widma Fouriera echa sygnału odebranego przez radar FMCW za pomocą konwolucyjnej sieci neuronowej

W moim przekonaniu, teza pracy sformułowana w tym brzmieniu jest bardziej zwięzła i dokładniej precyzuje zadania badawcze podjęte w rozprawie.

W tekście na str. 36 pracy jest mowa o trójwymiarowej reprezentacji sygnałów radarowych podczas gdy na rys. 2.1 w panelu drugim od góry pokazane są dwuwymiarowe zobrazowania. Panel rys. 2.1. pt. *Radarowa chmura punktów* również wymaga dodatkowego komentarza i podania źródła obrazu. W dolnym panelu rys. 2.1 nie podano oznaczenia osi.

W wielu miejscach tekst pracy jest pisany językiem potocznym. Zauważono wiele zwrotów żargonowych, przykładowe z nich to:

- str. 54 – „... dedykowane oprogramowanie ...”
- str. 55 – „... surowe sygnały ...”
- str. 64 – „... surowe dane ...”
- str. 67 – co oznacza stwierdzenie, że sieć jest „... zoptymalizowana pod kątem dużych zadań”?
- str. 68 – „... słabo przetworzone dane ...”

Inne uwagi szczegółowe i pytania:

Ze wzoru (3.1) na stronie 52 wynika, że dla czasu $t=0$ w zdefiniowanym zakresie $t \in [0, T]$ częstotliwość emitowanego przez radar sygnału wyniesie $f=0$. Jest to niezgodne z opisem działania radaru, w którym podano, że częstotliwość sygnału radaru zmienia się w zakresie $[f_{min}, f_{max}]$, przy czym powinno być $f_{min} > 0$.

Aby opis na stronie 56. w dolnym akapicie był zgodny z obrazami spektrogramów na rys. 3.5, opis powinien brzmieć: „... która, rośnie liniowo od 100 kHz do 300 kHz.”

We wzorze (3.10) na stronie 58 definiującym dyskretną krótkoczasową transformatę Fouriera $X(n, m)$, zmienne n i m zdefiniowano jako zmienne czasu a jedna z nich powinna być zmienną częstotliwości. Poprawnie natomiast oznaczono zmienne we wzorach (3.9) i (3.11) definiujących ciągłą krótkoczasową transformatę Fouriera $X(t, f)$ oraz odpowiadający tej transformacie spektrogram $|X(t, f)|^2$.

- str. 59 – rys. 4.1 nie przedstawia symulowanego modelu radaru tylko piktogramy radaru i obiektów,

- str. 64 – proszę o wyjaśnienie jak obliczane są składowe: synfazowa (I) i kwadraturowa (Q) na podstawie sygnału odbitego? Jest to podstawowa operacja przetwarzania sygnałów radarowych.

- Rozdział 5. – proszę o wyjaśnienie jakie było wzajemne położenie obiektów dla klas, w których występował więcej niż jeden obiekt, oraz jak przebiegały ścieżki ruchu tych obiektów w zbudowanej bazie spektrogramów?

- Rozdział 5. – proszę o wyjaśnienie, dlaczego na rys. 5.1 i 5.4 obrazujących spektrogramy zastosowano skalę częstotliwości, w której występują ujemne częstotliwości oraz dlaczego skala częstotliwości jest odwrócona, tj. częstotliwości ujemne są w górnej części spektrogramu a dodatnie w dolnej części spektrogramu?

Badania eksperymentalne przeprowadzono z udziałem człowieka. Czy uzyskano na te badania zgodę odpowiedniej komisji bioetycznej oraz czy uczestnicy badań podpisali oświadczenie o świadomej zgodzie na udział w badaniach? W pracy nie zamieszczono informacji na ten temat.

VII. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę?

W rozprawie zreferowano nowatorską metodę detekcji i rozpoznawania obiektów z wykorzystaniem radaru FMCW, krótkoczasowej transformacji Fouriera oraz odpowiednio dobranej struktury konwolucyjnej sieci neuronowej. Praca zyskałaby na jakości gdyby była napisana bardziej precyzyjnym językiem technicznym. Ponieważ osiągnięcia merytoryczne Autora rozprawy są oryginalne i bardzo wartościowe uważam, że praca może zasługiwać na wyróżnienie. Spełnia ona m.in. wymagania Uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne Wojskowej Akademii Technicznej w sprawie wyróżniania rozpraw doktorskich w punkcie dotyczącym autorstwa publikacji naukowych.

Moją końcową decyzję w tej sprawie będę mógł określić po przeprowadzeniu obrony publicznej rozprawy.

Wniosek końcowy

Ponieważ przedłożona do recenzji rozprawa:

- dokumentuje samodzielne rozwiązanie problemu naukowego, na poziomie szczegółowości odpowiedniej dla rozpraw doktorskich w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych,
- zawiera opis oryginalnych osiągnięć badawczych (wymienionych w sekcjach II i IV niniejszej recenzji) stanowiących istotnym wkład do dyscypliny naukowej Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne w zakresie zastosowań uczenia maszynowego w radiolokacji,
- została udokumentowana we współautorskich publikacjach naukowych, w tym w 4 publikacjach w czasopismach punktowanych, w których Autor rozprawy jest pierwszym autorem,
- prezentuje szeroką i dogłębną wiedzę Kandydata nt. techniki radarowej i technik przetwarzania sygnałów i analizy danych wpisujących się merytorycznie w tematykę dyscypliny naukowej Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne,

stwierdzam, że rozprawa doktorska kpt. mgr. inż. Błażeja Ślesickiego spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Wniosuję do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wojskowej Akademii Technicznej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana kpt. mgr. inż. Błażeja Ślesickiego do publicznej obrony.

