

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na
OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr. inż. Marka Ciesielskiego

która odbędzie się w dniu **21 kwietnia 2026 roku**, o godzinie **11:15**

Temat rozprawy:

„Wielopasmowy system radiolokacji pasywnej”

Promotor: prof. dr hab. inż. Mateusz Malanowski – Politechnika Warszawska

Recenzenci: dr hab. inż. Janusz Dudczyk, prof. uczelni – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

dr hab. inż. Łukasz Januszkiewicz, prof. uczelni – Politechnika Łódzka

dr hab. inż. Bogusław Szlachetko, prof. uczelni – Politechnika Wrocławska

Obrona odbędzie się stacjonarnie w sali 229 Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej (Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19). Szczegółowych informacji udziela sekretarz komisji: dr hab. inż. Kajetana Snopek, email: kajetana.snopek@pw.edu.pl.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Rada-Naukowa-Dyscypliny-Informatyka-Techniczna-i-Telekomunikacja/mgr-inz.-Marek-Ciesielski>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej
prof. dr hab. inż. Jarosław Arabas

Streszczenie

Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej jest projekt, implementacja oraz analiza różnych algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów na potrzeby wielopasmowego systemu radiolokacji pasywnej (PCL – Passive Coherent Location), umożliwiającego wykrywanie, klasyfikację oraz śledzenie obiektów niekooperujących, ze szczególnym uwzględnieniem helikopterów. W pracy zaproponowano autorskie rozwiązania algorytmiczne oraz przeprowadzono szereg badań symulacyjnych i eksperymentalnych, opartych na rzeczywistych danych pomiarowych. Dokonano analizy charakterystyk sygnałów użytecznych dla radarów pasywnych – sygnałów DVB-T/T2 oraz FM – w kontekście ich przydatności do detekcji celów powietrznych. Wykazano znaczące różnice pomiędzy tymi sygnałami oraz potrzebę indywidualnego podejścia do ich przetwarzania w ramach jednego, wielopasmowego systemu pasywnego. Pomimo różnic w szerokości pasma, częstotliwości nośnej i rodzaju modulacji, każdy z analizowanych sygnałów może być z powodzeniem wykorzystany w praktyce. Zaproponowano również dedykowane algorytmy, poprawiające efektywność ich przetwarzania w systemie PCL.

Istotnym zagadnieniem poruszonym w pracy była detekcja i klasyfikacja helikopterów. Zaproponowano nową metodę identyfikacji helikopterów na podstawie analizy przekroju Dopplerowskiego echa. Dzięki zastosowaniu transformaty Fouriera oraz autokorelacji profilu prędkościowego, możliwe było wykrycie łopat wirnika i estymacja ich charakterystycznych parametrów, takich jak częstotliwość obrotów. Metoda ta wykazała się dużą uniwersalnością – skutecznie działała nie tylko w paśmie DVB-T, ale również w trudniejszych warunkach propagacyjnych związanych z sygnałami FM i GSM.

W kolejnej części rozprawy przedstawiono system śledzący oparty na Rozszerzonym Filtrze Kalmana (EKF). Dokładność systemu oceniono na podstawie badań symulacyjnych oraz analiz z wykorzystaniem danych pomiarowych, również w obecności fałszywych detekcji oraz przy założeniu niedoskonałych modeli ruchu. Wykazano, że efektywność śledzenia zależy nie tylko od liczby i rozmieszczenia par bistatycznych, ale także od właściwości zastosowanego sygnału.

Rozprawę kończy podsumowanie uzyskanych wyników oraz wskazanie możliwych kierunków dalszych prac badawczych. Otrzymane rezultaty potwierdzają duży potencjał radarów pasywnych w zastosowaniach cywilnych i militarnych.

Słowa kluczowe: radiolokacja pasywna, radar bistatyczny, system wielopasmowy, śledzenie obiektów, Interacting Multiple Model (IMM), Multiple Hypothesis Tracking (MHT), Rozszerzony Filtr Kalmana (EKF), Digital Video Broadcasting – Terrestrial (DVB-T)

dr hab. inż. Bogusław Szlachetko, prof. PWr.
Katedra Akustyki, Multimediów i Przetwarzania Sygnałów
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska

Wrocław, 22 stycznia 2026

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł:	Wielopasmowy system radiolokacji pasywnej
Autor:	mgr inż. Marek Ciesielski
Promotor:	prof. dr hab. inż. Mateusz Malanowski
Dyscyplina naukowa:	Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Dziedzina nauk:	Nauki Inżynieryjno-Techniczne

1 Podstawa prawna

Podstawą recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja numer 78/2025 z dnia 23 września 2025 w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr inż. Markowi Ciesielskiemu.

2 Charakterystyka rozprawy doktorskiej

2.1 Krótkie streszczenie treści

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska podejmuje niezwykle aktualny temat monitorowania przestrzeni powietrznej za pomocą pasywnej radiolokacji. Rozprawa koncentruje się na syntezie, implementacji oraz ewaluacji autorskich algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów (DSP) w wielopasmowych systemach radiolokacji pasywnej PCL (*ang. Passive Coherent Location*). Głównym celem badawczym było opracowanie metodologii wykrywania i śledzenia obiektów niekooperujących, ze szczególnym uwzględnieniem specyficznej sygnatury śmigłowców.

Autor dokonał wielokryterialnej analizy sygnałów DVB-T/T2, FM oraz GSM, identyfikując kluczowe różnice w ich charakterystykach widmowych i modulacyjnych, co uzasadniło konieczność stosowania dedykowanych algorytmów poprawiających detekcję i śledzenie celów. W pracy zaproponowano szereg autorskich rozwiązań algorytmicznych, obejmujących zarówno etap detekcji i klasyfikacji celów, jak i ich śledzenia, których skuteczność została zweryfikowana na podstawie badań symulacyjnych oraz eksperymentów z wykorzystaniem rzeczywistych danych pomiarowych. Jednym z ważnych elementów rozprawy jest nowatorska metoda klasyfikacji śmigłowców, wykorzystująca analizę Dopplerowskiego echa sygnału poprzez zastosowanie transformacji Fouriera oraz autokorelacji profilu prędkościowego. Zabieg ten pozwolił na uzyskanie obrazowania nazywanego w literaturze analizą Mikro-Dopplerowską, która umożliwia precyzyjną estymację parametrów wirnika nośnego w zróżnicowanych warunkach propagacyjnych (pasma DVB-T, FM, GSM). Przeprowadzone badania potwierdziły wysoką uniwersalność opracowanego rozwiązania, które wykazało skuteczność nie tylko dla sygnałów DVB-T, lecz również w trudniejszych warunkach propagacyjnych, przy wykorzystaniu sygnałów radia FM oraz GSM.

Autor rozprawy przytacza definicję systemu radiolokacji pasywnej, zgodnie z którą za pasywny system radarowy należy uznać każdy który nie emituje sygnałów własnych i korzysta jedynie z nadajników zewnętrznych. W zgodzie z tą definicją autor uznaje, że każdy odbiornik sygnałów ADSB (*ang. Automatic Dependent Surveillance Broadcast*) jest rodzajem radaru pasywnego. Jednak tego rodzaju systemy wykraczają poza obszar badawczy objęty dysertacją i w dalszej części rozprawy nie są omawiane.

Warstwa śledzenia celów została zaimplementowana dzięki zastosowaniu filtru Kalmana. Rozprawa rozważa stosowanie klasycznej (liniowej) oraz rozszerzonej (nieliniowej) wersji tego filtru do śledzenia trajektorii wykrytych celów. Opracowane algorytmy śledzenia poddane zostały rygorystycznym testom symulacyjnym w warunkach silnego zakłócenia detekcjami fałszywymi. Wyniki badań symulacyjnych oraz z użyciem sygnałów rzeczywistych potwierdziły, iż efektywność śledzenia jest funkcją nie tylko geometrii bistatycznej układu, ale również inherentnych właściwości sygnałów oświetlających. Rozprawa udowadnia wysoką użyteczność systemów radiolokacji pasywnej w nowoczesnym nadzorze przestrzeni powietrznej.

Autor postawił trzy zasadnicze tezy badawcze:

- Parametry detekcyjne wielopasmowego systemu radiolokacji pasywnej mogą być istotnie poprawione poprzez indywidualne dostosowanie metod przetwarzania sygnału w każdym paśmie operacyjnym. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie prawdopodobieństwa detekcji obiektów przy zachowaniu stałego prawdopodobieństwa fałszywego alarmu, co ma kluczowe znaczenie dla skuteczności i niezawodności systemu w warunkach rzeczywistych.
- Klasyfikacja typów celów niekooperatywnych, na przykład śmigłowców, jest możliwa w radarach pasywnych operujących w różnych pasmach. Skuteczność klasyfikacji może być poprawiona przez zastosowanie algorytmów śledzenia z odpowiednio zdefiniowanymi modelami ruchu. Dzięki temu możliwe jest bardziej niezawodne i precyzyjne rozróżnianie obiektów w zmiennych warunkach obserwacji.
- Integracja danych pomiarowych pochodzących z różnych pasm operacyjnych powinna uwzględniać charakterystyczne właściwości sygnałów w poszczególnych pasmach, takie jak zasięg i dokładność pomiaru. Dzięki odpowiedniemu uwzględnieniu tych cech w procesie fuzji informacji możliwa jest optymalizacja detekcji i klasyfikacji celów w systemie wielopasmowym.

W części badawczej rozprawy autor przedstawił wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych na sygnałach generowanych zgodnie z założeniami modelu ruchu obiektów lotniczych oraz modelu propagacji fal w pasmach operacyjnych - DVB-T/T2, GSM, FM - w scenariuszu bistatycznym. Następnie analizie poddano sygnały rzeczywiste zarejestrowane przez autorski system radiolokacji pasywnej. Autor zdecydował się przedstawić te wyniki w podziale na kolejne rozdziały, w których szczegółowo opisano warunki symulacji a następnie warunki prowadzenia eksperymentów z użyciem rzeczywistych rejestracji.

2.2 Ocena aktualności zagadnienia

Zagadnienia rozważane w rozprawie doktorskiej są niezwykle świeże pod względem naukowym i aktywnie rozwijane w praktyce inżynierskiej. Pasywna radiolokacja jest zagadnieniem niezwykle istotnym nie tylko w przypadku zastosowań militarnych. Rozwój transportu cywilnego lotniczego powoduje gwałtowny przyrost ilości różnego rodzaju obiektów takich jak drony rolnicze, taksówki powietrzne, małe prywatne samoloty i śmigłowce. W konsekwencji nasycenie przestrzeni powietrznej tym sprzętem stale rośnie co pociąga za sobą konieczność tworzenia nowych precyzyjnych systemów radiolokacji. Z dużym prawdopodobieństwem można oczekiwać, że będą to głównie systemy pasywne.

W rozprawie poświęcono sporo miejsca na kwestię poprawy detekcji celów co jest szczególnie istotnym zagadnieniem w przypadku radarów pasywnych. Jest to spowodowane niską wartością SNR (*ang. Signal-to-Noise-Ratio*), której nie można łatwo poprawić, gdyż radar pasywny nie ma żadnego wpływu na moc nadawanych sygnałów nadawanych przez nadajniki systemów radiowych, telewizyjnych czy komórkowych. Jest to problem, którego rozwiązanie jest aktualnie poszukiwane na całym świecie. Za równie aktualne należy uznać zagadnienie analizy sygnatur mikro-Dopplerowskich w celu klasyfikacji wykrytych obiektów powietrznych, co w efekcie umożliwi zastosowanie odpowiedniego modelu ruchu obiektu i przekłada się na bardziej precyzyjne śledzenia trajektorii. Prezentowane w rozprawie rozwiązania należy uznać za nowatorskie.

2.3 Przegląd rozdziałów

Rozdział 1 **Wstęp** obejmuje 10 stron i zawiera krótkie wprowadzenie do zagadnienia pasywne radiolokacji oraz konstrukcji radarów pasywnych. Omówiono również historię rozwoju systemów radarowych w ogóle. W rozdziale podana została definicja radaru pasywnego, a następnie sformułował cel oraz tezy badawcze rozprawy. Opisano również motywację autora do prowadzenia prac w tym obszarze wynikającą z udziału w kilku projektach badawczych skupionych wokół detekcji i śledzenia różnego rodzaju obiektów, w tym powietrznych, głównie w zastosowaniach militarnych.

Rozdział 2 **Przetwarzanie sygnału w radarze pasywnym** obejmujący 8 stron przedstawia opis architektury pasywnych systemów radiolokacji oraz omawia kluczowe algorytmy cyfrowego przetwarzania odebranych

sygnałów radarowych: korelacja, detekcja echa, śledzenie wykrytego celu. Rozdział skoncentrowany jest na opisie specyficznej w przypadku radarów pasywnych geometrii bistatycznej, która jest immanentnie związana z tym zagadnieniem.

Rozdział 3 **Optymalizacja detekcji w wielopasmowych systemach radiolokacji pasywnej** złożony z 48 stron obejmuje analizę widma sygnałów emitowanych przez systemy telewizji cyfrowej DVB-T/T2 oraz radia analogowego pracującego w paśmie FM. Autor przeprowadza analizę własności tych sygnałów i ich przydatności pod kątem użycia w radiolokacji pasywnej. W rozdziale autor proponuje rozwiązanie wykorzystujące charakterystyczne własności tych sygnałów, które umożliwiają poprawę detekcji obiektów/celów poprzez estymację poziomu SNR w bliskim otoczeniu wykrytego echa. Rozdział prezentuje wyniki uzyskane poprzez symulacje komputerowe w scenariuszu bistatycznym oraz wyniki uzyskane z użyciem celów kooperujących. Wykorzystanie informacji o rzeczywistej trajektorii lotu celów kooperujących umożliwia autorowi ocenę błędów detekcji i śledzenia tych celów.

Rozdział 4 **Wielopasmowa klasyfikacja celów niekooperujących** na który składa się 50 stron prezentuje zagadnienie pogłębionej analizy funkcji nieoznaczoności/korelacji wzajemnej. W rozdziale szczegółowo omówiono zagadnienia związane z symulacją numeryczną echa śmigłowców ze szczególnym uwzględnieniem kwestii okresowych zmian obserwowanej częstotliwości Dopplera związanej z obecnością wirnika głównego. Prowadzi to do analizy mikro-Dopplerowskiej. W rozdziale przeanalizowano zagadnienie detekcji i identyfikacji śmigłowców w oparciu o zjawisko mikro-Dopplera w poszczególnych pasmach operacyjnych rozważanych w dysertacji. Rozdział zawiera również opis zastosowania klasycznego filtra Kalmana do śledzenia trajektorii bistatycznej wykrytych celów z uwzględnieniem modelu ruchu zidentyfikowanego obiektu.

Rozdział 5 **Śledzenie w wielopasmowych systemach radiolokacji pasywnej** obejmuje 14 stron na których rozwiązano zagadnienie śledzenia wykrytych celów, ale tym razem w geometrii kartezjańskiej. W rozdziale autor wykorzystał model matematyczny przekształcenia geometrii bistatycznej do układu kartezjańskiego opisany w Rozdziale 3. Model ten zawiera nieliniowe równania co prowadzi do konieczności zastosowania filtra Kalmana w wersji nieliniowej. W rozdziale zaprezentowano możliwość użycia filtra EKF (*ang. Extended Kalman Filter*). Rozdział zawiera również wyniki eksperymentów symulacyjnych oraz z użyciem sygnałów rzeczywistych i celów kooperujących dostarczających pomiary referencyjne.

Rozdział 6 zatytułowany **Podsumowanie i kierunki dalszych prac**, który obejmuje 4 strony podsumowuje rozprawę doktorską. Autor w syntetyczny sposób opisuje osiągnięte rezultaty wskazując na wysoką użyteczność zaproponowanych algorytmów detekcji, śledzenia i klasyfikacji obiektów powietrznych. Rozdział wskazuje możliwe kierunki prowadzenia dalszych prac w tej dziedzinie. W rozdziale autor podsumowuje autorski wkład w rozwój dziedziny radiolokacji pasywnej.

2.4 Ocena analizy źródeł

Rozprawę uzupełnia spis literatury **Bibliografia**, która liczy 106 pozycji, w tym 12 pozycji autorstwa lub współautorstwa doktoranta. Literatura jest prawidłowo dobrana i wskazuje na obszerną wiedzę doktoranta w obszarze radiolokacji ze szczególnym uwzględnieniem zagadnienia pasywnych systemów radarowych. Autor w wielu miejscach w rozprawie powołuje się na odpowiednie pozycje wskazując na źródła wiedzy. Jednak jest to rozproszone po całym dziele co utrudnia ustalenie poziomu wiedzy doktoranta oraz jakości wnioskowania o otwartych zagadnieniach w dziedzinie radiolokacji. Brak całościowego przeglądu literatury światowej w postaci osobnego rozdziału należy uznać za mankament rozprawy.

3 Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska skoncentrowana jest na wykazaniu prawdziwości tez badawczych, które w skondensowanej formie można przedstawić następująco:

- Skuteczność i niezawodność detekcji celów można znacząco poprawić poprzez indywidualne dostosowanie metod przetwarzania sygnału w rozważanych pasmach operacyjnym nadajników okazjonalnych
- Klasyfikacja typów obiektów niekooperatywnych umożliwia zwiększenie precyzji śledzenia ich trajektorii przez zastosowanie odpowiadającego obiektowi modelu ruchu.
- Uwzględnienie charakterystycznych własności sygnałów w poszczególnych pasmach operacyjnych umożliwia optymalizację procesu fuzji danych w wielopasmowym systemie PCL.

W przekonaniu recenzenta tezy badawcze zostały przekonująco udowodnione.

3.1 Metodologia naukowa

Badania przeprowadzone przez doktoranta wykorzystują kombinację wielu rozwiązań algorytmicznych oraz wiedzę o specyfice sygnałów w pasmach operacyjnych, które zastosowano łącznie do analizy rejestrowanych sygnałów w celu poprawy jakości detekcji i klasyfikacji celów oraz w celu śledzenia trajektorii lotu w dziedzinach geometrii bistatycznej i kartezjańskiej. Warto dodać, że autor w dysertacji rozróżnia faktycznie dwie klasy obiektów: śmigłowiec lub inny obiekt (np. samolot).

Zastosowana metodologia naukowa opisana w rozdziałach 3, 4 i 5 składa się z następujących kroków:

Opracowanie modelu matematycznego Na tym etapie autor skupia się na analizie specyfice sygnałów oświetlających cel w zależności od wybranego pasma operacyjnego: DVB-T/T2, GS, FM. Analiza ta pozwala opracować model propagacji oraz ustalić kluczowe parametry funkcji nieoznaczoności/korelacji wzajemnej takie jak: rozdzielczość estymacji odległości, rozdzielczość estymacji prędkości, oczekiwany poziom sygnałów odbieranych przez radar, maksymalne oczekiwane zasięgi racy radaru itp. Dodatkowo do tego etapu należy zaliczyć również analizę wpływu obecności wirnika głównego śmigłowca na widmo sygnału echa tego celu.

Opracowanie modelu symulacyjnego Bazując na poprzednim etapie autor tworzy skomplikowane, autorskie symulatory rozważanego zjawiska fizycznego. Stopień komplikacji symulatorów i możliwości zmiany parametrów zasługują na duże uznanie.

Symulacje numeryczne Korzystając z autorskich symulatorów w każdym z rozważanym pasmie operacyjnym autor przeprowadza wielokrotne symulacje numeryczne pozwalające na wyciągnięcie wniosków dotyczących trybowania algorytmów detekcji echa z uwzględnieniem charakterystycznych cech sygnału w paśmie operacyjnym. Ponadto symulacje umożliwiają dobór odpowiednich wartości odchyłek standardowych dla błędów pomiaru prędkości i odległości, co jest niezbędne do prawidłowego funkcjonowania tradycyjnego filtra Kalmana oraz EKF.

Testy z wykorzystaniem danych rzeczywistych Na uwagę zasługuje fakt wykorzystania rzeczywistych sygnałów zarejestrowanych przy pomocy autorskiego urządzenia zbudowanego na bazie USRP (*ang. Universal Software Radio Peripheral*).

- Opracowany radar pasywny rejestruje rzeczywiste sygnały w wybranym paśmie operacyjnym.
- Korzystając z parametrów wyznaczonych z modeli matematycznego i symulacyjnego wyznaczane jest funkcja nieoznaczoności/korelacji wzajemnej. Następnie następuje detekcja echa oraz eliminacja fałszywych wykryć a w kolejnym kroku algorytm śledzący trajektorię podejmuje decyzję o kontynuacji bądź zaprzestaniu śledzenia celu wykorzystując przy tym informacje z klasyfikatora - śmigłowiec , inny obiekt.
- Wynik porównywany jest z danymi referencyjnymi pochodzącymi od celów kooperujących, co umożliwia ocenę jakości opracowanych przez autora algorytmów. Tak wyznaczona jakość detekcji czy śledzenia może być rozciągnięta na cele niekooperujące, jednak na etapie prowadzenia badań rzeczywiste cele kooperujące są niezbędne do oceny jakości funkcjonowania radaru pasywnego.

3.2 Kluczowe zagadnienia i znaczenie dla rozwoju dyscypliny

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska ma charakter głównie eksperymentalny, przy czym przez eksperyment należy w tym przypadku rozumieć również badania symulacyjne. Strona teoretyczna poruszanych zagadnień jest w rozprawie stosowana do uzyskania rezultatów, ale sama w sobie nie jest przedmiotem badań. Modele matematyczne użyte do budowy symulatorów wykorzystanych w badaniach nie są bezpośrednim przedmiotem badań. Dotyczy to zarówno modeli propagacji fal dla nadajnika okazjonalnego i echa odbitego od celu poruszającego się z zadaną prędkością jak i modelu użytych do symulacji echa w przypadku obecności wirnika głównego śmigłowca. Doktorant powołuje się na autorskie oprogramowanie napisane w Matlabie, które wyznacza sygnał odbierany przez radar pasywny lub bezpośrednio funkcję nieoznaczoności/korelacji wzajemnej, przy zadanych parametrach eksperymentu, tzn: pasmo operacyjne nadajnika okazjonalnego, odległość i prędkość celu, ewentualna obecność wirnika głównego w śmigłowcu (jeżeli symulowany jest śmigłowiec) i innych istotnych parametrów.

Kluczowe zagadnienia rozważane w rozprawie donoszą się bezpośrednio do postawionych tez badawczych. Autor szczególnie analizuje kwestie związane z detekcją echa odbitego od obiektów powietrznych w podziale na poszczególne pasma operacyjne iluminatora, tj. DVB-T/T2, FM, GSM. Pod uwagę wzięto pasmo zajmowane przez sygnał iluminatora oraz specyficzną strukturę nadawanych sygnałów. Wykorzystanie tych informacji

umożliwia autorowi zaproponowanie autorskich algorytmów powodujących zmniejszenie ilości fałszywych wykryć celów powietrznych. W tym celu autor zaproponował zastosowanie dwuwymiarowej funkcji wielomianowej, która aproksymuje zmienną średnią wartość szumu obecnego w funkcji nieoznaczoności/korelacji wzajemnej. Następnie lokalny poziom detekcji celu odnoszony jest do aproksymowanej powierzchni co zmniejsza prawdopodobieństwo oznaczenia lokalnego maksimum jako wykrytego celu zwanego plotem. Zabieg ten okazał się szczególnie skuteczny w przypadku sygnałów DVB-T/T2. W dalszej kolejności doktorant proponuje zastosowanie algorytmów śledzenia trajektorii wykrytych celów za pomocą filtracji Kalmana. W przypadku trajektorii bistatycznej wystarczający jest klasyczny liniowy filtr Kalmana. W zagadnieniach rozważanych w rozdziale 5, gdy śledzenie trajektorii odbywa się w geometrii kartezjańskiej należy zastosować nieliniowy filtr Kalmana EKF. W obu przypadkach autor proponuje rozwiązanie polegające na śledzeniu wykrytych trajektorii (każda kolejna trajektoria reprezentowana jest przez stan kolejnego filtru Kalmana), ale tylko wtedy, jeżeli w kolejnych ramkach odebranego sygnału stan filtru pokrywa się (odpowiednio) z detekcjami. Wówczas trajektoria śledzona przez konkretny filtr Kalmana jest kontynuowana. W przeciwnym wypadku plot uznawany jest za fałszywy. Doktorant zaproponował i przebadał symulacyjnie różne modele dynamiczne ruchu śledzonych celów. Ponadto zaproponował własne warunki inicjacji trajektorii (rozpoczęcie obliczeń w danym filtrze Kalmana) oraz zakończenia śledzenia trajektorii (zakończenie obliczeń). Od strony koncepcyjnej podejście to - polegające na wykorzystaniu informacji o możliwej ewolucji czasowej ruchu śledzonych celów - jest koncepcyjnie obecne w literaturze. Za element nowości należy uznać wprowadzenie do tej koncepcji klasyfikatora wykrytych celów, który odróżnia śmigłowiec od innych celów dzięki czemu filtr Kalmana śledzący trajektorię ruchu może zastosować prawidłowy dynamiczny model ruchu celu i w ten sposób trajektoria celów prawdziwych jest śledzona z większą precyzją, a trajektorie fałszywych plotów są szybciej wygaszane.

3.3 Jakość argumentacji i prezentacji osiągnięć

Struktura ocenianej rozprawy doktorskiej została zaprojektowana w sposób przemyślany i spójny, nie budząc istotnych zastrzeżeń z punktu widzenia logiki wywodu ani zasad poprawnej kompozycji pracy naukowej. Autor prowadzi czytelnika przez kolejne zagadnienia w uporządkowanym ciągu rozumowania, przechodząc od podstaw teoretycznych radiolokacji pasywnej, poprzez analizę właściwości sygnałów iluminatorów okazjonalnych, aż do implementacji i weryfikacji zaproponowanych algorytmów detekcji, klasyfikacji oraz śledzenia obiektów. Taki układ pracy sprzyja stopniowemu budowaniu zrozumienia złożonych zagadnień i umożliwia właściwe osadzenie prezentowanych rozwiązań w kontekście systemów PCL.

Na każdym etapie rozprawy autor rozwija argumentację w sposób logiczny i konsekwentny, wykazując się szeroką wiedzą z zakresu cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz radiolokacji pasywnej. Widoczna jest dobra znajomość specyfiki systemów bistatycznych i wielopasmowych, a także świadomość ograniczeń wynikających z właściwości sygnałów iluminatorów. Na szczególne podkreślenie zasługuje trafna obserwacja, że parametry oraz struktura sygnałów iluminatora mogą być wykorzystane do ograniczenia prawdopodobieństwa detekcji obiektów fałszywych, co świadczy o dojrzałym i analitycznym podejściu do rozważanego problemu.

Autor w sposób systematyczny wprowadza zagadnienia związane ze specyfiką poszczególnych pasm operacyjnych, uzasadniając konieczność stosowania odmiennych metod przetwarzania dla sygnałów takich jak DVB-T/T2, FM czy GSM. Przyjęte wybory metodologiczne są jasno umotywowane i logicznie wynikają z przeprowadzonych analiz teoretycznych. Proponowane rozwiązania algorytmiczne nie mają charakteru arbitralnego, lecz stanowią konsekwencję jasno sformułowanych założeń badawczych.

Istotnym atutem pracy jest sposób weryfikacji zaproponowanych metod. Autor konsekwentnie popiera swoje tezy wynikami badań symulacyjnych, a następnie konfrontuje je z rezultatami uzyskanymi na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych, co znacząco zwiększa wiarygodność prezentowanych wniosków oraz ich potencjalną przydatność praktyczną.

Tekst rozprawy utrzymany jest w precyzyjnym, jednoznacznie technicznym stylu, adekwatnym do tematyki pracy i jej docelowego grona odbiorców. Złożone koncepcje detekcji i śledzenia trajektorii obiektów przedstawiono w sposób klarowny dla czytelników zaznajomionych z tą dziedziną. Organizacja treści zapewnia płynne przejście od rozważań teoretycznych do aspektów implementacyjnych, a czytelne wykresy i ilustracje skutecznie uzupełniają wyjaśnienia tekstowe, ułatwiając interpretację wyników. Przejrzystość prezentacji istotnie podnosi wartość poznawczą rozprawy, czyniąc ją użyteczną zarówno dla badaczy, jak i inżynierów zajmujących się implementacją algorytmów radiolokacji pasywnej.

4 Oryginalne osiągnięcia rozprawy

W dysertacji autor przedstawił kilka oryginalnych osiągnięć, które rozwijają dziedzinę pasywnej radiolokacji. Są to autorskie algorytmy przetwarzania sygnałów radarowych dostosowane do specyfiki pasm operacyjnych i

modeli dynamiki ruchu obiektów powietrznych.

Podstawę stanowi unikalny algorytm detekcji echa w przypadku korzystania z sygnału DVB-T/T2. Algorytm ten za pomocą dwuwymiarowej funkcji wielomianowej aproksymuje powierzchnię funkcji nieoznaczoności/korelacji wzajemnej, co poprawia warunki detekcji celów w stosunku do klasycznych metod CFAR.

Kolejnym algorytmem z tej grupy jest algorytm identyfikacji i śledzenia fałszywych ech pochodzących o sygnałów pilotów wbudowanych w strukturę sygnału DVB-T/T2. Doktorant zrezygnował z klasycznego rozwiązania polegającego na rekonstrukcji sygnału DVB-T/T2 w odbiorniku pasywnym co jest rozwiązaniem wymagającym sporej mocy obliczeniowej. Zaproponowana metoda identyfikacji a następnie śledzenia tych fałszywych ech nie wymaga dużej mocy obliczeniowych co znacząco obniża koszty budowy radaru pasywnego.

W przypadku pasma sygnałów FM doktorant przedstawił wartościową i kompletną analizę wpływu dynamicznej zmiany pasma FM na wielkość komórek detekcji, a następnie wskazał metodę doboru rozmiaru okna detekcji w wymiarach prędkości i odległości bistatycznych.

Bardzo ciekawym osiągnięciem jest zaprezentowany algorytm klasyfikacji śmigłowców, który wykorzystuje obecność zjawiska mikro-Dopplera powodowanego przez wirnik główny śmigłowca. Warto nadmienić, że autor na tej podstawie jest w stanie estymować prędkość obrotową wirnika, co w niektórych przypadkach może wskazywać na konkretny typ śmigłowca. Opracowany algorytm wykrywania śmigłowców jest uniwersalny w tym sensie, że może pracować na sygnałach ze wszystkich rozważanych pasm operacyjnych.

Bardzo cennymi są również autorskie algorytmy wyznaczania prędkości bistatycznej śmigłowca. Istniejące metody skupiały się na estymacji prędkości kadłuba, która w różnych warunkach pomiaru może być silnie zniekształcona lub znajdować się poniżej progu detekcji. Doktorant zaproponował dwa algorytmy. Jeden wykorzystuje własność symetrii echa w przekroju prędkościowym. Drugi algorytm dopasowuje idealny profil mikro-Dopplerowski do danych pomiarowych. W obu przypadkach uzyskano dokładność estymacji prędkości śmigłowca nieosiągalną w metodach klasycznych śledzących jedynie kadłub. Co więcej wykazano, że można wykryć śmigłowiec nawet, gdy echo w funkcji nieoznaczoności/korelacji wzajemnej jest silnie zniekształcone.

Doktorant opracował również wielomodowy i wielohipotezowy algorytm śledzenia trajektorii, który umożliwia śledzenie i klasyfikację celu w czasie rzeczywistym. Algorytm ten wymaga dalszych badań eksperymentalnych.

4.1 Dorobek projektowy i publikacyjny doktoranta

Według danych zawartych w bazie *Web of Science (WoS) - ResearcherIDGBP-5966-2022* na dzień 20/01/2026 doktorant jest współautorem 13 publikacji naukowych. Dwa artykuły zostały opublikowane w czasopiśmie naukowym znajdujących się na liście JCR: *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING: IF=5.3* na liście czasopism MNiSW 160pkt, cytowana 9 razy i *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING: IF=8.6*, na liście czasopism MNiSW 200pkt, cytowana 7 razy. Jedenaście pozycji stanowią publikacje konferencyjne, wśród których 4 to artykuły gdzie pierwszym lub jedynym autorem jest doktorant. Konferencje w których doktorant brał dotychczas udział to: INTERNATIONAL RADAR SYMPOSIUM (IRS), NTERNATIONAL MICROWAVE AND RADAR CONFERENCE (MIKON), SIGNAL PROCESSING SYMPOSIUM (SPSYMPO). Łączna liczba cytowań wynosi 38 bez autocytaowań. Wszystkie publikacje są związane z dziedziną radiolokacji, w tym ponad połowa publikacji dotyczy bezpośrednio zagadnienia PCL. Jest to znaczący dorobek publikacyjny świadczący o wiedzy i sporych umiejętnościach prowadzenia badań naukowych w dyscyplinie ITT.

Na uwagę zasługuje również udział doktoranta w kilku dużych projektach B+R dotyczących rozwoju technologii radiolokacyjnych aktywnych i pasywnych. Są to (zgodnie z deklaracją autora):

- DOB-BIO9/25/01/2018 – Perymetria na obszarach podmokłych, przybrzeżnych, rzekach.
- 5105/EDA/2020/0 – RING: 3D Radar Imaging for Non-cooperative target Recognition.
- LIDER13/0266/2022 – PASAR: Lotniczy pasywny radar z syntetyczną aperturą działający w czasie rzeczywistym, wykorzystujący zewnętrzne oświetlacze w postaci sygnałów telewizji cyfrowej DVB-T2.

W szczególności drugi projekt realizowany w zespole międzynarodowym pozwala sądzić, że doktorant posiada umiejętność funkcjonowania w dużych międzynarodowych zespołach badawczych.

5 Uwagi krytyczne, polemiczne oraz sugestie rozwojowe

Ogólna ocena rozprawy jest bardzo dobra. Autor w sposób jasny i klarowny przedstawił założenia i następnie konsekwentnie realizował badania eksperymentalne. Uwagi krytyczne i polemiczne nie umniejszają w sposób znaczący wartości rozprawy.

5.1 Obserwacje polemiczne

A - W streszczeniu kilkakrotnie podkreślono autorski charakter opracowanych algorytmów, jednak brak jest jednoznacznego wskazania, na czym polega ich nowość w odniesieniu do istniejących w literaturze rozwiązań z zakresu radiolokacji pasywnej PCL. W szczególności nie jest jasne, czy proponowane metody stanowią zasadniczo nowe podejście, czy też są modyfikacją i adaptacją znanych technik DSP dostosowanych do specyfiki systemów wielopasmowych. W recenzowanej pracy istotne byłoby precyzyjne zdefiniowanie wkładu własnego na tle aktualnego stanu wiedzy. Sporą część wątpliwości rozwiąłoby udostępnienie kodów źródłowych i danych pomiarowych, na których doktorant opierał swoje wnioski.

B - Zaproponowana metoda identyfikacji śmigłowców oparta na analizie mikro-Dopplera wydaje się bardzo obiecująca, jednak w rozprawie nie poruszono kwestii odporności tej metody na interferencje wielodrogowe. Wątpliwości budzi również kwestia rozróżniania śmigłowców od innych celów wyposażonych w elementy wirujące, np. dronów wielowirnikowych.

C - W równaniach (2.8) oraz (2.9) zastosowano przeskalowanie (podstawienie) z częstotliwości Dopplera na prędkość obiektu $f_D = \frac{v_r}{c} f_c$. Jednak w tym wypadku wyznaczamy prędkość radialną/bistatyczną obiektu względem odbiornika. Wówczas wykresy trajektorii mogą nas wprowadzać w błąd, gdyż zmiana kierunku prędkości obiektu bez zmiany jej wartości będzie obserwowana jako zmiana prędkości radialnej/bistatycznej. Czy autor uwzględnił ten efekt w algorytmie zaproponowanym w rozdziale 5, gdzie śledzenie trajektorii odbywa się w układzie kartezjańskim. W rozprawie nie znalazłem wyjaśnienia tego zjawiska.

D - Autor zauważył problem oceny jakości algorytmów śledzenia, ale nie zaproponował żadnej miary, która obiektywnie oceni tę jakość - str.28 2.3.3.

E - Ciekawość recenzenta budzą dodatkowe 'piki/echa' w profilu czasowym - Rysunek 4.13, tzn. te poza zidentyfikowanym wirnikiem głównym. Dla CPI=200 ms pik występuje dla około 85 ms, natomiast dla CPI=400 ms, już go nie obserwujemy, za to pojawiają się inne dla 116 ms ($2 \cdot 58$) oraz 146 ms i 196 ms. Czy Pan zastanawiał się jak interpretować te dodatkowe 'piki/echa'? Analogiczna sytuacja jest obserwowana na Rysunku 4.16 i 4.19 z tym, że w przypadku sygnałów FM oraz GSM piki oddalone są o wielokrotność czasu 62.5 ms.

5.2 Uwagi szczegółowe

1. W jakim celu umieszczono w pracy równania (2.2) oraz (2.3)? Przecież znamy tylko R_{tr} oraz sumę $R_1 + R_2$ dokładnie rzecz ujmując znamy (z korelacji wzajemnej R) i wiemy, że $R + R_{tr} = R_1 + R_2$
2. Równanie (2.8) - występuje brak konsekwencji w oznaczeniach względem wcześniejszych wzorów i w efekcie zmieniono: $R- > r$ oraz $V- > v$
3. Równanie (2.8) - kolejna niekonsekwencja polegająca na braku '-' w eksponentach. Zwyczajowo znak ten jest przyjęty przy transformacji z dziedziny czasu do częstotliwości.
4. Opisując testy (Rozdział 3.1.2.2) wykonane na danych rzeczywistych warto podać rozdzielczość plotów wynikającą z konkretnych parametrów systemu w tym przypadku $\Delta R \approx 30$ m, natomiast $\Delta V \approx 3$ m/s. Ułatwi to czytelnikowi zrozumienie wyводу oraz wyników zamieszczonych w postaci wykresów.
5. Biorąc pod uwagę powyższe Rysunek 3.9 jest trudny do interpretacji ze względu na dużą ilość niebieskich punktów (plotów).
6. Na stronach 39-40 autor wskazuje, że wykonał porównanie klasycznego algorytmu CA-CFAR oraz SO-CFAR z opracowanym algorytmem estymacji szumu, ale nie pokazał wyników w sposób graficzny, a jedynie w postaci Tabeli 3.1, co pozostawia pewien niedosyt poznawczy.
7. Zależność (3.17) - wielkość σ_p opisana jako 'parametr algorytmu'? Warto wskazać jakieś fizyczne wyjaśnienie oraz podać rząd wielkości
8. Analogiczna uwaga do (3.23)
9. (3.19) i (3.20) - użyto wielkości SNR jako pojedynczej liczby podczas kiedy w (3.7) jest on definiowany jako płaszczyzna - brak spójności opisu matematycznego. W tym przypadku trzeba się zdecydować, albo SNR jest rodzajem średniego SNR wyliczonym dla całej płaszczyzny, albo jest lokalną wartością SNR związaną z położeniem celu we współrzędnych $[R, V]$, np. rozumianą tak jak w algorytmie CFAR? Tyle, że wtedy każdy cel powinien mieć swój własny filtr Kalmana, własny stan i własna wartość SNR. Jak to jest u Pana?
10. Strona 51, pierwsza linia - cytuję: 'Drugi cel przecina się z trajektorią celu drugiego w niewielkiej odległości...' - prawdopodobnie chodziło o trzeci cel.

11. Rysunek 3.13 jest niejasny.
 - Nie jest jasne jak interpretować dwie kropki leżące na prawdziwej trasie celu 3, oznaczone w legendzie jako 'fałszywa trasa'.
 - Opisując założenia symulacji autor odwołuje się do fałszywego echa pochodzącego od sygnału pilota z Rysunku 3.11, ale tam fałszywe echo leżało w odległości około 90 km, a na rysunku 3.13 zaznaczono je dla odległości około 39 km.
12. Nie jest jasne czy wyniki prezentowane na Rysunek 3.18 i 3.19 z miejscowości Ulm zostały uzyskane dla celów kooperujących. Jeżeli tak, to należało porównać uzyskane wyniki z rzeczywistymi trajektoriami.
13. Rysunek 3.20 - zapewne chodziło o zdemodulowany sygnał a nie 'zdemolowany'.
14. W Rozdziale 3.2.3 wskazano na dużą wagę estymacji efektywnej szerokości pasma sygnału FM, która zmienia się w czasie. W konsekwencji szerokość pasma bezpośrednio związana jest z odchyleniem standardowym σ_R , które jest używane by prowadzić prawidłową estymację stanu w filtrze Kalmana śledzącym trajektorię. Autor nie wskazał jednak jasnego związku między bieżącą (zmienną w czasie) szerokością pasma sygnału FM a wielkością σ_R . Autor podał regułę (3.38), ale brakuje wyjaśnienia jak można wyznaczyć Δf rzeczywistego sygnału i jak go powiązać z regułą (3.38). W przypadku symulacji dokładnie znamy Δf . Skoro literatura [5] podaje taki związek, dlaczego autor go nie przytoczył w pracy?
15. Str.81 - Szkoda, że autor nie wskazał jak uzyskuje sygnał $y[n]$ ('zawierający echo obiektu'). Czy jest to tylko fragment z całego czasu CPI? Jaki jest sens matematyczny tych operacji? Bez tego wyjaśnienia trudno jest ocenić poprawność stwierdzeń zapisanych w kolejnych akapitach na stronie 81 i 82.
16. Str.86, ostatnia linia - Czy nie jest bardziej prawidłowe w oznaczeniu $|\Phi[\mathbf{i}_r, \mathbf{i}_v]$ przesunięcie oznaczenia modułu na koniec, poza nawias $[\cdot]$ otaczający współrzędne tj.: $|\Phi[\mathbf{i}_r, \mathbf{i}_v]|$? Zwykle taki zapis spotykany jest w publikacjach.
17. Macierz Φ jest zespolona. Na rysunkach prezentowany jest zawsze moduł. Czy w fazie nie kryją się jakieś dodatkowe informacje? Czy istnieją publikacje na ten temat?
18. Str.88, pierwszy akapit - Czy nie chodziło przypadkiem o sygnał z rysunku 4.7, gdyż na 4.8 jest zaprezentowana znormalizowana funkcja autokorelacji $\Theta[\mathbf{i}_r, \mathbf{i}_v]_{i_r=R}$ a nie sygnał?
19. Rysunek 4.9 - na stronie 88 twierdzi Pan, że na rysunek przedstawia sygnał przefiltrowany (jak się domyślam z rysunku 4.7), ale pod rysunkiem jest opis 'Pochodna funkcji autokorelacji ...' dodatkowo oś OX opisana jest jako 'częstotliwość Dopplera' co sugeruje, że na wykresie jest profil prędkościowy, czyli zgodnie z domysłem przefiltrowany sygnał z rysunku 4.7. Jak to jest w istocie? Co prezentuje rysunek 4.9?
20. (4.14) - niekonsekwentne nawiasy. Powinny być nawiasy $[\cdot]$, gdyż i_r oraz i_t są w istocie dyskretnie. Albo w tekście trzeba zmienić i konsekwentnie używać (\cdot) , również we wzorach.
21. Str.98 - oczywista pomyłka edytorska w drugiej linii. Zapewne chodziło o 30 dB lub 33 dB.
22. Str 104 - niekonsekwencja w (4.17) lub legendzie na Rysunku 4.24. Czy chodziło Panu o $|\Phi[\mathbf{i}_r, \mathbf{n}]\Phi[\mathbf{i}_r, \mathbf{i}_v - \mathbf{n}]|$ czy o $|\Phi[\mathbf{i}_r, \mathbf{i}_v]\Phi[\mathbf{i}_r, \mathbf{n} - \mathbf{i}_v]|$. Dodatkowo w (4.17) powinno być zaznaczone sprzężenie albo moduł musi być nałożony na każdą funkcję $\Phi[\cdot]$ osobno. W innym przypadku korelacja nie ma sensu fizycznego.
23. Str.105, linia 8 - Prawdopodobnie chodziło o funkcję Φ a nie Θ gdyż Θ to gotowa autokorelacja, której nie trzeba ponownie korelować z samą sobą; korelowane są profile prędkości.
24. Str.105 - Mam wątpliwość dotyczącą użyteczności Metody 2. Należy zwrócić uwagę, że w celu uzyskania dobrych wyników w tej metodzie należy znać nie tylko trajektorię śmigłowca, ale również: 'geometrię obserwacji' czyli kąty obrotu i pochyłeń śmigłowca w czasie pomiaru, oraz konkretny model śmigłowca. Zatem przydatność tej metody można wykazać tylko w przypadku celów kooperujących.
25. Str.131 - w parametrach symulacji przyjęto $\sigma_R \approx 7$ m - skąd ta wartość? Czy nie powinna ona odpowiadać rozmiarowi komórki w dziedzinie odległości bistatycznej - $\Delta R = \frac{c}{BW} = \frac{3e8}{7.61e6} \approx 39.4$ m? Analogiczne pytanie dotyczy σ_v . Wiadomo, że $\Delta V = \lambda/CPI = 3e8/500e6/0.2 = 3$ m/s.

6 Podsumowanie i konkluzja końcowa

Doktorant mgr inż. Marek Ciesielski w sposób oryginalny i nowatorski wykazał prawdziwość trzech tez badawczych sformułowanych w rozprawie doktorskiej. Tezy te, przy pobieżnej lekturze, mogą sprawiać wrażenie oczywistych i intuicyjnie prawdziwych, co może wynikać z dużego doświadczenia badawczego i inżynierskiego doktoranta oraz właściwego sformułowania problemów badawczych. Jednak ich pogłębiona analiza ujawnia istotną złożoność zagadnień oraz liczne aspekty, które nie posiadają jednoznacznych i bezpośrednich rozwiązań. W kolejnych rozdziałach rozprawy doktorant przeprowadził szczegółową analizę postawionych tez, konsekwentnie odnosząc się do ograniczeń systemów radiolokacji pasywnej oraz specyfiki sygnałów iluminatorów okazjonalnych. Poprzez szeroko zakrojone badania symulacyjne, a następnie eksperymenty z wykorzystaniem rzeczywistych danych pomiarowych, autor nie tylko potwierdził prawdziwość sformułowanych tez, lecz również wskazał istotne warunki, parametry oraz założenia systemowe, których spełnienie umożliwia skuteczną detekcję, śledzenie oraz klasyfikację obiektów powietrznych w systemach PCL. Takie podejście świadczy o dojrzałości naukowej doktoranta oraz o umiejętności krytycznej analizy uzyskanych wyników.

Podsumowując stwierdzam, że doktorant mgr inż. Marek Ciesielski, udowodnił postawione tezy badawcze. Ponadto zaproponował kilka autorskich algorytmów w obszarze pasywnej radiolokacji. Tym samym wniósł znaczący wkład w rozwój dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Recenzowana dysertacja spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023 poz. 742 z późn. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia ww. warunki Ustawy z wyraźnym nadmiarem. W związku z tym wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Marka Ciesielskiego do dalszych etapów procedowania postępowania doktorskiego.

Szlachetko Bogusław



dr hab. inż. Janusz DUDCZYK, prof. WAT
Instytut Systemów Łączności
Wydział Elektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna

KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY NAUKOWEJ DYSCYPLINY INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Wielopasmowy system radiolokacji pasywnej**

Autor rozprawy: **mgr inż. Marek CIESIELSKI**

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza pracy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Rozprawa doktorska mgra inż. Marka Ciesielskiego dotyczy opracowania projektu oraz implementacji i analizy algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów w aspekcie wielopasmowego systemu radiolokacji pasywnej PCL (ang. *Passive Coherent Location*) na bazie opracowanych przez Autora następujących zagadnień:

- analizy charakterystyk sygnałów użytecznych dla radarów pasywnych, takich jak DVB-T/T2 oraz FM, pod kątem ich przydatności do detekcji celów powietrznych;
- systemu śledzenia opartego na Rozszerzonym Filtrze Kalmana EKF (ang. *Extended Kalman Filter*);
- autorskiej metody klasyfikacji opartej na analizie przekroju Dopplerowskiego echa, wykorzystującej transformatę Fouriera oraz autokorelację profilu prędkościowego, w tym:
 - algorytmu detekcji echa w sygnale DVB-T;
 - algorytmu śledzenia i klasyfikacji fałszywych ech od pilotów *scattered* w sygnałach DVB-T;
 - algorytmu klasyfikacji helikopterów;
 - algorytmu estymacji prędkości bistatycznej śmigłowca;
 - wielomodelowego i wielohipotezowego algorytmu śledzenia helikopterów.

Praca składa się z wprowadzenia (w którym został przedstawiony cel i zakres pracy, krótki opis historii radarów pasywnych z uwzględnieniem ich wad i zalet oraz tezy rozprawy i motywacja własna Autora dysertacji) oraz pięciu kolejnych rozdziałów wraz z podsumowaniem, w których zostały opisane wnioski końcowe i potencjalne kierunki dalszego rozwoju.

Dysertabilną część rozprawy stanowią rozdziały trzeci, czwarty i piąty dotyczące odpowiednio: analizy różnic w przetwarzaniu sygnałów FM i DVB-T dla potrzeb detekcji celów oraz propozycji autorskich algorytmów detekcji obiektu/filtracji fałszywych detekcji oraz klasyfikacji obiektów ze szczególnym uwzględnieniem wykrywania helikopterów (metody wykrywania łopaty wirnika) wraz z propozycjami autorskich algorytmów identyfikacji obiektu w różnych pasmach (DVB-T, FM, GSM). W rozdziale piątym Autor dokonał analizy śledzenia obiektów

z wykorzystaniem filtra EKF w wielopasmowym systemie radiolokacji pasywnej opracowując implementację algorytmu śledzącego oraz analizę wyników symulacji dla różnych konfiguracji nadajników w aspekcie stabilności śledzenia w funkcji geometrii i liczby par bistatycznych.

Autor sformułował *explicite* trzy tezy, którym poświęcił odpowiednio trzeci, czwarty i piąty rozdział pracy, w następującym brzmieniu:

Teza 1: „Optymalizacja detekcji w wielopasmowych systemach radiolokacji pasywnej: parametry detekcyjne wielopasmowego systemu radiolokacji pasywnej mogą być istotnie poprawione poprzez indywidualne dostosowanie metod przetwarzania sygnału w każdym paśmie operacyjnym. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie prawdopodobieństwa detekcji obiektów przy zachowaniu stałego prawdopodobieństwa fałszywego alarmu, co ma kluczowe znaczenie dla skuteczności i niezawodności systemu w warunkach rzeczywistych”.

Teza 2: „Wielopasmowa klasyfikacja celów niekooperujących: klasyfikacja typów celów niekooperatywnych, na przykład śmigłowców, jest możliwa w radarach pasywnych operujących w różnych pasmach. Skuteczność klasyfikacji może być poprawiona przez zastosowanie algorytmów śledzenia z odpowiednio zdefiniowanymi modelami ruchu. Dzięki temu możliwe jest bardziej niezawodne i precyzyjne rozróżnianie obiektów w zmiennych warunkach obserwacji”.

Teza 3: „Śledzenie w wielopasmowych systemach radiolokacji pasywnej: Integracja danych pomiarowych pochodzących z różnych pasm operacyjnych powinna uwzględniać charakterystyczne właściwości sygnałów w poszczególnych pasmach, takie jak zasięg i dokładność pomiaru. Dzięki odpowiedniemu uwzględnieniu tych cech w procesie fuzji informacji możliwa jest optymalizacja detekcji i klasyfikacji celów w systemie wielopasmowym”.

Sformułowanie powyższych tez jest logiczne i racjonalne, szczególnie biorąc pod uwagę fakt, iż w obecnym czasie poszukuje się efektywnych rozwiązań detekcji i klasyfikacji celów w szeroko pojętych obszarach Walki Radioelektronicznej (WRE).

Opiniowana rozprawa doktorska ma charakter teoretyczno-doświadczalny, o czym świadczy analiza teoretyczna oraz praktyczna adaptacja opracowanych rozwiązań w technologii radiolokacji pasywnej. Recenzent pragnie zauważyć, iż Doktorant nabył dużego doświadczenia zarówno merytorycznego jak i praktycznego w zakresie realizacji kilku projektu, tj. DOBR/0043/R/ID1/2012/03, DOB-BIO9/25/01/2018, 5105/EDA/2020/0-RING oraz LIDER13/0266/2022 – PASAR, których celem było opracowanie systemu radiolokacji pasywnej na potrzeby zestawów rakietowych Obrony Przeciwlotniczej ZROP, perymetrii na obszarach podmokłych/przybrzeżnych/rzekach, obrazowanie radarowe do rozpoznawania celów niekooperujących oraz lotniczy pasywny radar z syntetyczną aperturą (czasu rzeczywistego), wykorzystujący zewnętrzne oświetlacze w postaci sygnałów telewizji cyfrowej DVB-T2. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż we wskazanych powyżej przedsięwzięciach projektowych Doktorant brał czynny udział i miał znaczący wkład w opracowaniu oraz integracji opracowanych rozwiązań w zastosowaniu sprzętowym. Doktorant aktywnie uczestniczył również na arenie międzynarodowej w grupie roboczej NATO SET-322, której celem jest opracowanie metryk i narzędzi testowych dla algorytmów śledzenia wielosensorowego.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł /w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle/ świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Bibliografia zawiera 106 pozycji, w tym artykuły, książki, materiały konferencyjne oraz źródła internetowe, które w ocenie recenzenta są dobrane właściwie, a bogaty spis literatury oraz wynikająca z nich obszerna analiza aktualnego stanu nauki i badań w skali światowej,

świadczy o dużej wiedzy i kompetencjach Doktoranta. Tym samym, Autor pracy w poprawny sposób powołuje się na literaturę w treści swej dysertacji.

We wprowadzeniu (rozdział 1), formułując cel i tezę pracy, Autor powołując się na literaturę przedstawił w jasny i zrozumiały dla czytelnika sposób, zagadnienia dotyczące podjętej dziedziny badań. Krótko scharakteryzował historię radarów pasywnych wraz z uwzględnieniem wad i zalet ww. technologii (pkt. 1.5, str. 15+20). Doktorant, w przejrzysty sposób opisał podstawowe zagadnienia dotyczące przetwarzania sygnału w radarze pasywnym, powołując się na literaturę przedmiotu [1,2 5,13+18, 21+29]. Na uwagę zasługuje gruntowna analiza literatury światowej w rozdziale (3), w których przedstawiane zostały aspekty wpływu rodzaju sygnału oświetlającego, tj. transmisje cyfrowe DVB-T oraz analogowe radio FM na efektywność detekcji w systemach radiolokacji pasywnej.

Przedstawione przez Autora podjęcie badań (pkt. 1.3, str. 13 Motywacja) uważam za uzasadnione i przekonujące oraz wynikające z poprawnej oceny stanu wiedzy fachowej w przedmiotowym obszarze, w tym także istotnych osiągnięć badaczy polskich. Tym samym, analiza źródeł literaturowych oraz stanu wiedzy została wykonana przez Doktoranta poprawnie, a wnioski płynące z tego przeglądu zostały sformułowane skrupulatnie i rzetelnie.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Odnosząc się do głównych tez dysertacji oraz mając na uwadze cyfrowe przetwarzanie sygnału w radarze pasywnym, korelację sygnału odebranego z sygnałem referencyjnym, detekcję echa oraz proces śledzenia, Doktorant wskazał wpływ szerokości pasma nadajników okazjonalnych na rozróżnialność odległościową oraz dokładność wyznaczania odległości bistatycznej. Poza tym, mając na uwadze klasyczne techniki przetwarzania obrazów adaptowane na potrzeby radiolokacji (detekcja progowa czy technika dynamicznie dostosowująca próg detekcji do lokalnych warunków tła – CFAR), zaproponował rozszerzenie klasycznych metod detekcji o algorytmy dopasowane do charakterystyki wybranych pasm transmisyjnych DVB-T i DVB-T2. Autor dysertacji, w aspekcie śledzenia radarowego, uwypuklił również brak jednolitych metryk pozwalających miarodajnie ocenić efektywność danego algorytmu śledzącego w różnych scenariuszach operacyjnych, szczególnie w sytuacji wykorzystywania przez radary pasywne wielu źródeł transmisji i wielu odbiorników, przez co złożoność procesu śledzenia diametralnie się komplikuje. Zbadane przez Autora różnice pomiędzy sygnałami FM i DVB-T w aspekcie radarów pasywnych, podkreślają konieczność specyficznego podejścia do przetwarzania różnych źródeł sygnału w systemach wielopasmowych poprzez integrację danych pochodzących z różnych par bistatycznych, potęgując precyzję detekcji obiektów w skomplikowanym środowisku elektromagnetycznym, szczególnie współczesnego pola walki. Tym samym potwierdził On wszystkie tezy rozprawy. Z tego powodu, domena algorytmów śledzących jest dominująca w nowoczesnych systemach lokalizacji pasywnej.

Podejście zaprezentowane przez Doktoranta jest ciekawe i nowatorskie nie mające swego odzwierciedlenia w „doniesieniach” literaturowych w skali międzynarodowej. Zatem zagadnienia, które rozpatrywał Doktorant zostały szczegółowo rozważone, w pełni uzasadnione i rozwiązane.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

W opinii recenzenta, poczynione przez Autora analizy w przedmiotowej dysertacji oraz w autorskich i współautorskich publikacjach [21, 26, 30, 43+45, 67+68, 81, 104] można uznać za w pełni oryginalne. Zaproponowanie i opracowanie nowatorskich metod ulepszających skuteczność detekcji, klasyfikacji oraz śledzenia obiektów niekooperujących



w wielopasmowym systemie radiolokacji pasywnej, w tym: algorytm detekcji echa w sygnale DVB-T, algorytm śledzenia i klasyfikacji fałszywych ech od pilotów scattered w sygnałach DVB-T, algorytm klasyfikacji helikopterów, dwa algorytmy estymacji prędkości bistatycznej śmigłowca oraz wielomodelowy i wielohipotezowy algorytm śledzenia helikopterów można uznać za samodzielny i w pełni oryginalny dorobek Autora.

Recenzent pozytywnie ocenia także możliwość zastosowania technicznego uzyskanych przez Doktoranta wyników w procesie rozpoznania i klasyfikacji wirnikowych BSP. Mając na myśli technologie, jakie towarzyszą WRE oraz technikom akwizycji, przetwarzania i rozpoznawania obiektów, osiągnięte przez Autora wyniki mogą zostać wykorzystane praktycznie. Powyższe świadczy o istotnym wkładzie własnym Autora pracy i znacząco poszerza wiedzę w zakresie wybranych zagadnień technik detekcji, śledzenia i rozpoznania w dziedzinie PCL.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Rozprawa doktorska wraz z bibliografią oraz wykazem stosowanych skrótów ma objętość 153 stron i jest napisana w sposób ścisły i zwięzły. Układ pracy, kolejność i kompletność poszczególnych rozdziałów recenzent uważa za dostosowany do tematyki i zakresu badań, jakie zostały podjęte przez Autora. Rozprawa jest przygotowana w języku polskim i pod względem poprawności językowej nie budzi większych zastrzeżeń, natomiast omówienie badań przeprowadzonych przez Autora jest na tyle klarowne i wyczerpujące, że pozwala na ich pełną ocenę w procesie recenzji.

W odniesieniu do podstawowych zasad pisowni polskiej, należy wskazać niewielką liczbę błędów, jakie znajdują się w rozprawie. Wprawdzie nie umniejszają one wartości merytorycznej pracy i przeważnie nie przeszkadzają w odbiorze treści, niemniej, należy zwrócić na nie uwagę:

- a) brak należytej staranności w zakresie poprawności dotyczącej składu i łamania tekstu. Błąd techniczny, jaki często można zaobserwować w pracy to tzw. „sierota”, czyli spójnik pozostawiony na końcu wiersza (str. 5, 11, 12, 13, itd.). Uznaje się to za błąd rażący i w każdym przypadku podlega korekcie. Sieroty dzielą się na jednoliterowe i wieloliterowe. W zależności od wymaganego stopnia poprawności tekstu, korekcie należy poddawać spójniki i partykuły o długości od jednej do trzech liter;
- b) błąd literowy/redakcyjny (zwany również błędem składu) charakteryzujący się zdublowanym fragmentem wyrazu, str. 122, ostatni akapit pkt 4.1.5.7, „...*Problem ten został jednak skutecznie rozwiązany dzięki wykorzystaniu algorytmu śledzenia, który integruje informacje o typie obiektu w dłuższym horyzoncie czasowym.acji.*”
- c) brak jednoznaczności w stosowaniu prefiksu wyrażającego wielokrotność (podwielokrotność) jednostek miar opartych o system metryczny, np. $f_c = 522\text{MHz}$ (Rys. 3.1, str. 30), zależność 5.14, str. 130, itp.: między wartością liczbową a literowym oznaczeniem miary, czyli skrótem lub skrótowcem, stawia się spację, natomiast między wartością liczbową a oznaczeniem miary za pomocą symbolu albo połączenia skrótu/skrótowca i symbolu spacji nie stawia się. Zgodnie z tą Radą Języka Polskiego, należałoby skorygować zapis dotyczący wartości liczbowych w aspekcie literowych oznaczeń miary.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Praca nie posiada zasadniczych wad, które znacząco obniżyłyby jej wartość. Jednak biorąc pod uwagę aspekt merytoryczny niniejszej dysertacji, polegający na opracowaniu przez Doktoranta szeregu algorytmów poprawiających skuteczność detekcji, klasyfikacji i śledzenia obiektów w wielopasmowym systemie radiolokacji pasywnej, pojawia się zagadnienie złożoności obliczeniowej opracowanych algorytmów. Złożoność tę, można rozpatrywać

w aspekcie czasu bądź pamięci, przy jednoczesnym określeniu klasy tej złożoności, np. logarytmicznej $\Theta(\log n)$, liniowej $\Theta(n)$, kwadratowej $\Theta(n^2)$, sześcienniej $\Theta(n^3)$ czy wielomianowej $\Theta(nk+nk-1 + \dots + n)$. W szeroko pojętej algorytmice, problemy złożoności obliczeniowej bezpośrednio przekładają się na możliwość „wykonania” algorytmu na współczesnych maszynach obliczeniowych, a ponadto istotnie wpływają na czas obliczeń. Czas obliczeń, a tym samym czas odpowiedzi systemu od momentu wykrycia sygnału do momentu wygenerowania informacji zwrotnej o rodzaju obiektu (jego cechach, przynależności, stopniu zagrożenia, itd.) jest parametrem kluczowym. Mając na myśli potencjalne wykorzystanie opracowanych rozwiązań zwiększających skuteczność detekcji, klasyfikacji i śledzenia obiektów niekooperujących, powyższe zagadnienie staje się bardzo istotne.

Doktorant posługuje się pojęciem „optymalizacja”, np. „...optymalizacja detekcji w wielopasmowych systemach radiolokacji pasywnej...” - str. 13, „...optymalizacja detekcji i klasyfikacji celów w systemie wielopasmowym...” - str. 29, nie tłumacząc znaczenia tego pojęcia w aspekcie pracy doktorskiej. Mając na uwadze śledzenie w wielopasmowych systemach radiolokacji pasywnej zagadnienie „optymalizacji detekcji” sprowadza się do dwukryterialnej quasi-optymalizacji, a nie do rozumianej domyślnie, optymalizacji wielokryterialnej. Zatem właściwym określeniem procesu szeroko pojętej poprawy, powinno być określenie „quasi-optymalizacja” detekcji i klasyfikacji.

W pkt. 2.3.2, str. 27 Autor pracy użył pojęcia „identyfikacja” w odniesieniu do detekcji potencjalnych odbić sygnału od obiektów w dalszym łańcuchu przetwarzania danych w radarze pasywnym oraz, w dalszej kolejności, „identyfikacja” fałszywych celów (str. 51) oraz „identyfikacja” fałszywych ech, (Rys. 3.17), itd. Wydaje się, iż w ww. przypadkach pojęcie „identyfikacji” nie ma nic wspólnego z procesem wykrycia echa, czy też automatycznym zdetekowaniem fałszywych ech. W teorii grupowania, rozpoznania wzorców i klasyfikacji danych/obiektów, pojęcie identyfikacji określa bardzo precyzyjnie rozróżnienie poszczególnych egzemplarzy tego samego typu obiektu, co w przypadku badań przeprowadzonych przez Doktoranta nie ma zastosowania, tak samo jak detekcja i „identyfikacja” helikoptera (pkt 4.1.3).

Powyższe błędy nie umniejszają wartości merytorycznej pracy i przeważnie nie przeszkadzają w odbiorze treści, niemniej, należałoby zdefiniować ich rozumienie (optymalizacji/identyfikacji) w kontekście niniejszej dysertacji.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Jak już zostało wspomniane we wcześniejszych fragmentach recenzji, rozprawa wnosi istotny wkład w zakresie technik radiolokacyjnych, a w szczególności wykorzystania potencjału wielopasmowych systemów radiolokacji pasywnej w praktyce. Z całą pewnością można wskazać dwa obszary użyteczności rozprawy. Pierwszy z nich to nauki techniczne, w którym zawartość koncepcyjna pracy poszerza zbiór metod i sposobów pozwalających na skuteczne wykrywanie, śledzenie oraz klasyfikację obiektów. Drugi obszar, bardzo istotny ze względu na bezpieczeństwo i obronność kraju, to quasi-optymalizacja metod detekcji obiektów w technologii radiolokacji pasywnej. Mając na uwadze szczególną cechę radaru pasywnego jaką jest niskie prawdopodobieństwo detekcji tego typu sensora na polu walki, zasadnym jest wykorzystanie technik maksymalizujących skuteczność wykrywania obiektów w obszarze rozpoznania i WRE.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- ~~a. Nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy~~
- ~~b. Wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania~~
- ~~c. Spełniająca wymagania~~

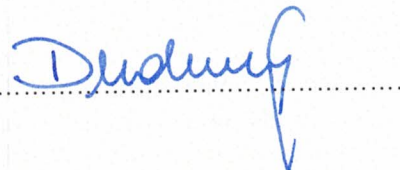
- d. Spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
e. ~~Wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie~~

Po zapoznaniu się z przedłożoną do recenzji rozprawą doktorską mgra inż. Marka CIESIELSKIEGO, stwierdzam, że praca **spełnia wymagania z wyraźnym nadmiarem**, a tym samym spełnia wymagania art. 13, ust. 1 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami, gdzie mowa o oryginalnym rozwiązaniu problemu naukowego, ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w danej dyscyplinie naukowej oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z tym, stawiam wniosek o przyjęcie tego opracowania jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie mgra inż. Marka CIESIELSKIEGO do jej obrony publicznej.

Jednocześnie na obronie publicznej, w zależności od prezentacji pracy i odpowiedzi Doktoranta na postawione pytania, pozostawiam sobie możliwość wnioskowania o zmianę kategorii i wybór kategorii.

Warszawa, 04 lutego 2026 r.



Łódź, 30 stycznia 2025 r.

dr hab. inż. Łukasz Januszkiewicz prof. uczelni

Politechnika Łódzka,

Wydział Elektrotechniki Elektroniki Informatyki i Automatyki

Instytut Elektroniki

Al. Politechniki 8

93-590 Łódź,

Recenzja rozprawy doktorskiej
Dla Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej

Tytuł rozprawy:

Wielopasmowy system radiolokacji pasywnej

Autor:

mgr inż. Marek Ciesielski

Promotor:

prof. dr hab. inż. Mateusz Malanowski



Podstawą sporządzenia recenzji jest Uchwała nr 79/2025 z dnia 23 września 2025 r. Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, Politechniki Warszawskiej, w sprawie powołania komisji doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr inż. Markowi Ciesielskiemu oraz dokumentacja w tej sprawie dostarczona 15 grudnia 2025 r.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Marka Ciesielskiego poświęcona jest rozwijaniu algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów na potrzeby wielopasmowego systemu radiolokacji pasywnej. Celem szczegółowym badań jest umożliwienie wykrywania, klasyfikacji oraz śledzenia obiektów ze szczególnym uwzględnieniem śmigłowców. Rezultatem badań są oryginalne algorytmy przetwarzania sygnałów opracowane przez autora. Podjęta tematyka badawcza mieści się w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Ponadto jest aktualna i istotna, szczególnie w kontekście rozwijania systemów bezpieczeństwa i obronności.

Rozprawa ma postać monografii liczącej 155 stron. Została podzielona na 6 rozdziałów i opatrzona wykazem najważniejszych skrótów i użytych symboli. Rozdział 1 (wstęp) zawiera sformułowane w opisowy sposób tezy rozprawy. Brzmia one następująco:

1. Parametry detekcyjne wielopasmowego systemu radiolokacji pasywnej mogą być istotnie poprawione poprzez indywidualne dostosowanie metod przetwarzania sygnału w każdym paśmie operacyjnym. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie prawdopodobieństwa detekcji obiektów przy zachowaniu stałego prawdopodobieństwa fałszywego alarmu, co ma kluczowe znaczenie dla skuteczności i niezawodności systemu w warunkach rzeczywistych.
2. Klasyfikacja typów celów niekooperatywnych, na przykład śmigłowców, jest możliwa w radarach pasywnych operujących w różnych pasmach. Skuteczność klasyfikacji może być poprawiona przez zastosowanie algorytmów śledzenia z odpowiednio zdefiniowanymi modelami ruchu. Dzięki temu możliwe jest

bardziej niezawodne i precyzyjne rozróżnianie obiektów w zmiennych warunkach obserwacji.

3. Integracja danych pomiarowych pochodzących z różnych pasm operacyjnych powinna uwzględniać charakterystyczne właściwości sygnałów w poszczególnych pasmach, takie jak zasięg i dokładność pomiaru. Dzięki odpowiedniemu uwzględnieniu tych cech w procesie fuzji informacji możliwa jest optymalizacja detekcji i klasyfikacji celów w systemie wielopasmowym.

Kolejne rozdziały rozprawy zawierają opis przeprowadzonych badań i ich wyniki, które miały na celu udowodnienie postawionych tez. W rozdziale 2 zawarto informacje dotyczące radaru pasywnego oraz podstawowych zagadnień cyfrowego przetwarzania sygnałów w systemach tego typu. Rozdział 3 poświęcony jest analizie cech sygnałów emisji FM i DVBT w kontekście ich przydatności do detekcji celów w systemach radarów pasywnych. Zawarto tu również opisy autorskich algorytmów detekcji obiektu i filtracji fałszywych detekcji oraz wyniki eksperymentów weryfikujących ich działanie, zarówno symulacyjnych, jak i pomiarowych. Rozdział 4 dotyczy wielopasmowej klasyfikacji celów niekooperujących, ze szczególnym uwzględnieniem detekcji śmigłowców. Autor przedstawia tu liczne symulacje echa helikopterów oraz opisy autorskich algorytmów identyfikacji obiektu za pomocą sygnałów z różnych systemów bezprzewodowych (DVB-T, FM, GSM). Rozdział 5 zawiera wyniki badań Doktoranta w obszarze śledzenia obiektów w wielopasmowych systemach radiolokacji pasywnej. W ostatnim, 6 rozdziale zawarte jest podsumowanie pracy. Autor nakreśla w nim również kierunki dalszych badań.

Układ rozprawy jest logiczny i czytelny. Praca napisana jest dość poprawnym językiem, właściwym dla prac naukowych. Występują w niej nieliczne błędy stylistyczne i gramatyczne. Zawiera konieczne ilustracje oraz liczne wykresy prezentujące wyniki symulacji i pomiarów.

Autor zasadniczo we właściwy sposób odwołuje się do źródeł literaturowych, cytując łącznie 105 pozycji (w wykazie jest 106 pozycji jednak 104 jest powtórzeniem 81). Należą do nich również publikacje, których współautorem jest kandydat: 8 artykułów przedstawionych na konferencjach międzynarodowych i jeden artykuł opublikowany w czasopiśmie naukowym z listy JCR. Zastrzeżenia budzi jednak

umieszczenie na liście bibliografii pozycji 60: „Program OFF Czarek Radio TOK FM. red. Cezary Łasiczka, dr hab. inż. Mateusz Malanowski, Jak wykrywać samoloty za pomocą radiowych rozgłośni rockowych?, 2016” co nie jest źródłem literaturowym. Również pozycje 65 (Wikipedia) i 66 (tygodnik „Polityka”) nie wskazują na źródła publikacji naukowych lub dokumentacji technicznych, używanych jako odniesienie w rozprawach naukowych.

Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa jest obszerną monografią prezentującą wyniki pracy naukowej doktoranta nad szerokopasmowymi systemami radarów pasywnych. Jej cel badawczy obejmuje opracowanie algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów przeznaczonych dla wielopasmowego systemu radiolokacji pasywnej, umożliwiającego wykrywanie, klasyfikację oraz śledzenie obiektów niekooperujących, ze szczególnym uwzględnieniem śmigłowców.

Zebrane w rozprawie wyniki badań pozwalają autorowi udowodnić postawione we wstępie tezy badawcze.

Teza 1, która dotyczy poprawy parametrów detekcyjnych systemu wielopasmowego, udowodniona została w rozdziale 3, w którym opisano wyniki analizy wykorzystania sygnałów pochodzących od nadajników systemów radiofonii FM i telewizji DVB-T. Autor, za pomocą opracowanych przez siebie algorytmów, uwzględniając charakterystyczne cechy sygnału w poszczególnych pasmach poprawił detekcję obiektów i estymację parametrów celów. Zwiększył prawdopodobieństwo wykrycia celu w stosunku do klasycznych rozwiązań przy zachowaniu stałego prawdopodobieństwa fałszywego alarmu.

Teza 2, o możliwości klasyfikacji typów celów niekooperatywnych i jej skuteczności, udowodniona została w rozdziale 4. Wyniki opisanych tam badań wykazują, że radar pasywny wykorzystujący różne pasma może zostać wykorzystany do skutecznego rozpoznawania wybranego rodzaju celów niekooperatywnych, jakimi są śmigłowce. Autor z powodzeniem zastosował opracowaną przez siebie metodę analizy echa

obiektu wykorzystującą składowe charakterystyczne sygnału, pochodzące od elementów wirujących. Możliwa jest dzięki temu identyfikacja wybranych rodzajów statków powietrznych nawet w przypadku dużego zaszumienia sygnału.

Teza 3, o integracji danych pomiarowych z różnych pasm z uwzględnieniem charakterystycznych parametrów tych sygnałów, została udowodniona wynikami badań zebranych w rozdziale 5. Zawiera on wyniki analizy wpływu konfiguracji nadajników i odbiorników w systemie wielopasmowym na jakość estymacji położenia obiektów oraz skuteczność ich śledzenia. Autor dowodzi w tym miejscu, że efektywne wykorzystanie danych z różnych pasm wymaga uwzględnienia w algorytmie parametrów tych sygnałów. Wykazuje, że zastosowanie dwuetapowych algorytmów śledzenia pozwalają ograniczyć błędy asocjacji w systemie.

Rozprawa doktorska mgr inż. Marka Ciesielskiego, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim jest przetwarzanie sygnałów w wielopasmowych radarach pasywnych w celu poprawy detekcji obiektów, ich identyfikacji i śledzenia.

Do jego oryginalnych osiągnięć można zaliczyć opracowanie wymienionych poniżej algorytmów przetwarzania sygnałów na potrzeby radarów pasywnych.

1. Algorytm detekcji echa w sygnale DVB-T na podstawie dopasowania wielomianu do funkcji nieoznaczoności wzajemnej. Algorytm umożliwia zmniejszenie prawdopodobieństwa fałszywych alarmów i poprawę skuteczności detekcji celów.
2. Algorytm śledzenia i klasyfikacji fałszywych ech w systemach wykorzystujących sygnały DVB-T, który umożliwia identyfikację i eliminację fałszywych detekcji.
3. Algorytm klasyfikacji helikopterów, oparty na analizie cech charakterystycznych echa wirnika głównego. Pozwala rozróżniać helikoptery od innych statków powietrznych.
4. Algorytmy estymacji prędkości bistatycznej śmigłowca. Pierwszy wariant bazuje na symetrii echa, drugi na dopasowaniu profilu prędkościowego echa do danych pomiarowych. Dzięki nim możliwe jest zwiększenie dokładności estymacji prędkości bistatycznej obiektu.

5. Wielomodelowy i wielohipotezowy algorytm śledzenia helikopterów, który integruje estymację współrzędnych bistatycznych z klasyfikacją celu. Jego zadaniem jest śledzenie i klasyfikacja celu w czasie rzeczywistym.

Wszystkie algorytmy są oryginalnym i wartościowym wkładem autora w dziedzinę informatyki technicznej i telekomunikacji.

Na szczególne podkreślenie zasługuje szeroki zakres przeprowadzonych badań, który obejmował zarówno zagadnienia związane z detekcją, klasyfikacją, jak i śledzeniem celów. Ponadto badania uwzględniły 3 różne standardy transmisji sygnałów okazjonalnych: system transmisji analogowej FM, oraz systemy transmisji cyfrowej DVB-T i GSM. Ze względu na rozpowszechnienie tych standardów, opracowanie przez autora sposobów ich wykorzystania w systemie radaru pasywnego jest szczególnie wartościowe. Osiągnięcia Doktoranta w obszarze klasyfikacji śmigłowców są bardzo cenne z aplikacyjnego punktu widzenia, ponieważ tego typu statki powietrzne są bardzo często wykorzystywane zarówno w ruchu cywilnym, jak i wojskowym. Wyniki tych badań będzie można zapewne kontynuować tak, aby możliwe było identyfikowanie również bezzałogowych statków powietrznych.

Realizując opisane w rozprawie prace, Doktorant wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych z wykorzystaniem metod właściwych dla przyjętego obszaru badawczego. W szczególności, Doktorant wykazał się umiejętnością przeprowadzania symulacji komputerowych w środowisku Matlab. Doktorant dokonał również weryfikacji eksperymentalnej prac teoretycznych stosując technikę pomiarową do akwizycji danych z radaru pasywnego, pracującego w wielu pasmach. Świadczy to o dobrym opanowaniu narzędzi symulacyjnych, jak i na umiejętności prowadzenia eksperymentów pomiarowych.

Uwagi krytyczne

Rozprawa nie ma istotnych wad, które znacząco umniejszałyby wysoką wartość naukowo-techniczną przeprowadzonych przez autora badań. Poniżej wymieniam zauważone braki lub mankamenty rozprawy.

1. Tytuł rozdziału 3 „Optymalizacja detekcji w wielopasmowych systemach radiolokacji pasywnej”.

Optymalizacja w sensie matematycznym to proces polegający na znalezieniu ekstremum zadanej funkcji celu. Warto uściślić, że autor wykorzystuje w swojej pracy pojęcie optymalizacji w sensie niesformalizowanym, po prostu jako proces ulepszania rzeczywistych systemów, procesów lub urządzeń.

2. Charakterystyka sygnałów standardów DVB-T, GSM, FM.

Istotnym aspektem prowadzonych badań jest wykorzystanie sygnałów emitowanych przez nadajniki pracujące w różnych pasmach i standardach transmisji. W pracy brakuje dokładniejszego opisu specyfiki tych sygnałów. Autor nie przedstawia widma takich sygnałów, typowych spektrogramów oraz parametrów czasowych transmisji cyfrowej (czas trwania ramki, interwał ochronny etc.).

3. Utwór muzyczny jako sygnał testowy.

W rozdziale 3.2.1. p.t. „Wpływ treści audycji na detekcję obiektu w radarze pasywnym” autor rozważa związek pomiędzy sygnałem modulującym nadajnika radiofonicznego z modulacją częstotliwościową, a parametrami detekcji. Jako sygnał testowy autor wykorzystuje fragment utworu muzycznego i prezentuje widmo jednej sekundy tego utworu. Czy w przypadku analizy wpływu, jaki ma zmieniający się sygnał modulujący (jak autor pisze „treści audycji”) na wyniki detekcji nie warto przeprowadzić długotrwałej rejestracji takich sygnałów, na podstawie której można opisać statystycznie jego właściwości? W przeciwnym razie istnieje obawa, że wybór innego utworu muzycznego nawet z tego samego gatunku muzyki mógłby zaowocować innymi wynikami analizy. Czy zdaniem autora wykorzystanie nadajników radiofonii DAB do detekcji obiektów również uzależniałoby wyniki detekcji od zawartości sygnału transmitowanego?

4. Charakterystyka sygnału stacji bazowej GSM

W rozdziale 4 opisana jest detekcja i identyfikacja śmigłowca za pomocą sygnału emitowanego przez stację bazową systemu radiokomunikacji ruchomej GSM. Ponieważ systemy tego typu mają parametry transmisji zmienne w czasie to nasuwają się

następujące pytania. Czy w czasie rejestracji sygnału emitowane były przez stację bazową jedynie kanały kontrolne (np. BCCH) czy również kanały przenoszące ruch telekomunikacyjny (np. TCH/F)? Czy w przypadku tego systemu zmiany w liczbie emitowanych częstotliwości i alokowanych kanałów oraz adaptacyjne zmiany mocy nadajnika w przypadku emisji kanałów przenoszących ruch (które nie występują w systemach DVB-T i FM) będą wpływały na parametry detekcji?

5. Opis eksperymentu pomiarowego

Wartościowym osiągnięciem pracy jest wykorzystanie danych pomiarowych do weryfikacji opracowanych algorytmów. Pewien niedosyt pozostawia jednak brak dokładniejszego opisu warunków przeprowadzenia eksperymentów. Korzystne byłoby zamieszczenie w pracy ilustracji prezentujących położenie nadajnika i odbiornika. Zabrakło również dokładnego scharakteryzowania wykorzystanej aparatury pomiarowej, w tym zastosowanych anten.

6. Powtarzanie wzorów

W rozprawie powtórzono wzory numerując je podwójnie. Zależność 3.19 jest identyczna z 3.37, 2.10 jest identyczna z 4.15, 2.11 z 4.16. W tekstach naukowych warto unikać takich niejednoznaczności.

Podsumowane

Rozprawa doktorska mgr inż. Marka Ciesielskiego spełnia z nadmiarem wymagania Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i w związku z tym wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim jest przetwarzanie sygnałów w wielopasmowych systemach radiolokacji pasywnej.

Rozprawa doktorska mgr inż. Marka Ciesielskiego wnosi istotny wkład w stan wiedzy w obszarze radiolokacji pasywnej. Wysoko oceniam osiągnięcia doktoranta w zakresie doskonalenia algorytmów umożliwiających zwiększanie dokładności i pewności działania systemów tego rodzaju. Ponadto tematyka pracy jest aktualna i istotna, oraz ma duży potencjał aplikacyjny, szczególnie w kontekście rozwijania systemów bezpieczeństwa i obronności.

Biorąc pod uwagę oryginalność osiągniętych rozwiązań, szeroki zakres przeprowadzonych badań oraz ich rzetelne udokumentowanie w rozprawie, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.



Łukasz Januszkiewicz