

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:	<b>Wielopasmowy system radiolokacji pasywnej</b>
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 trymowania 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 filtra Kalmana), ale tylko wtedy, jeżeli w kolejnych ramkach odebranego sygnału stan filtra 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 eksponencie. 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  $\sigma_p$  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 'falszywa 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  $\sigma_R$ , 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  $\sigma_R$ . Autor podał regułę (3.38), ale brakuje wyjaśnienia jak można wyznaczyć  $\Delta f$  rzeczywistego sygnału i jak go powiązać z regułą (3.38). W przypadku symulacji dokładnie znamy  $\Delta f$ . 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  $\Phi$  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  $\Theta[\mathbf{i}_r, \mathbf{i}_v]_{i_r=\mathbf{R}}$  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 dyskretne. 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  $\Phi$  a nie  $\Theta$  gdyż  $\Theta$  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  $\sigma_v$ . 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 inżynierjno-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

