



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.

