

Białystok, 12 września 2021 r.

Dr hab. inż. Ewa Świercz, prof. PB  
Katedra Fotoniki, Elektroniki i Techniki Światłowej  
Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej  
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok

PW WEiTI Kancelaria  
wpłynęło dnia 22.09.21r.  
numer .....

*RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ*

*DLA RADY DYSCYPLINY Informatyka Techniczna i Telekomunikacja  
Politechniki Warszawskiej*

(Realizacja uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej z dnia 29 czerwca 2021 r. w sprawie wykonania recenzji rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Kamila Bączyka)

Tytuł rozprawy

**Radar pasywny z odwrotną syntetyczną aperturą**

Autor rozprawy

**Marcin Kamil Bączyk**

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

Cele naukowe i zakres rozprawy pt. „Radar pasywny z odwrotną syntetyczną aperturą” zostały jasno sformułowane i zostały zawarte w tezie rozprawy:

*Możliwe jest uzyskanie zobrazowania obiektu poruszającego się w przestrzeni powietrznej w radarze pasywnym pracującym w trybie z odwrotną syntetyczną aperturą, wykorzystującym jako źródło oświetlenia emisję cyfrowe, a w szczególności sygnał naziemnej telewizji cyfrowej DVB-T.*

*Możliwa jest poprawa rozróżnialności uzyskiwanych zobrazowań dzięki wykorzystaniu multistatycznego trybu pracy radaru pasywnego.*

Tematyka rozprawy doktorskiej jest bardzo szeroka i obejmuje następujące zagadnienia naukowe:

- analityczny opis metod realizujących pasywne obrazowanie obiektu poruszającego się, wraz z opisem oryginalnej, zaproponowanej przez autora modyfikacji metody we współrzędnych biegunowych PFA (ang. *Polar Format Algorithm*),
- szczegółową analizę metod poprawiania rozróżnialności zobrazowania w radarze pasywnym,

- propozycję i analizę algorytmów automatycznego ogniskowania multistatycznych zobrazowań radarowych,
- weryfikację zaproponowanych algorytmów obrazowania w formule odwrotnej apertury na danych rzeczywistych, z próbami analizy niezbędnych uproszczeń pozwalającymi na realizację skomplikowanych algorytmów zobrazowania w warunkach pomiarów rzeczywistych.

We wprowadzeniu doktorant przedstawił jasno motywy podjęcia badań związanych z tematyką rozprawy, których rezultaty zostały przedstawione w niniejszej rozprawie. Prezentowane w rozprawie analizy teoretyczne i badania w środowisku rzeczywistym z wykorzystaniem nadajników telewizji DVB-T lokują tę rozprawę w grupie rozpraw teoretyczno-doświadczalnych.

- 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 sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Recenzowana rozprawa zawiera 118 pozycji literatury, obejmujących tematykę realizowaną w pracy doktorskiej. Doktorant systematycznie publikował częściowe wyniki swoich badań na międzynarodowych forach naukowych związanych z tematyką radarową. Spośród 118 cytowanych pozycji literatury, 7 pozycji stanowią prace, w których Doktorant jest współautorem. Jeden z artykułów został opublikowany w prestiżowym czasopiśmie *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, pozostałe publikacje były prezentowane na międzynarodowych konferencjach radarowych. Doktorant wykazał się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy i praktyki. Dobór pozycji literaturowych recenzent uważa za istotny w odniesieniu do zagadnień realizowanych w ramach doktoratu; dobór ten i wskazuje na dostateczną wiedzę autora obejmującą zagadnienie poruszane w rozprawie. Wnioski z przeglądu literatury są sformułowane w sposób przekonujący i wskazują na umiejętność korzystania z odpowiednich źródeł literaturowych.

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

Zagadnienie, jakie postawił sobie Autor, to zobrazowanie obiektów w przestrzeni powietrznej w multistatycznym radarze pasywnym, działającym w trybie odwrotnej syntetycznej apertury, wykorzystując jako zewnętrzne źródło oświetlenia nadajniki naziemnej telewizji cyfrowej DVB-T (ang. *Digital Video Broadcasting – Terrestrial*). Dwie tezy rozprawy zostały teoretycznie przeanalizowane i praktycznie zweryfikowane przez symulacje algorytmów na zaproponowanych modelach sygnałów radarowych i przy próbach wykorzystania sygnałów zarejestrowanych w rzeczywistym środowisku nadajników sygnału DVB-T jako źródeł oświetlenia obiektu w radarze pasywnym z wykorzystaniem metod przetwarzania sygnałów, opisywanych w rozprawie.

- 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?**

Jako oryginalne osiągnięcia własne, zaprezentowane w rozprawie i wcześniejszych publikacjach, recenzent wskazuje przede wszystkim kompleksowość analizy

przetwarzania sygnałów w bistatycznym i multistatycznym pasywnym radarze obrazującym. Zdaniem recenzenta oryginalny wkład naukowy Doktoranta obejmuje:

- szczegółową analizę algorytmu obrazowania we współrzędnych biegunowych PFA (ang. *Polar Format Algorithm*), dla którego analitycznie wyznaczono ograniczenia wynikające ze zmiennej geometrii sceny radiolokacyjnej reprezentowanej przez wektor położenia  $r_p$ ;
- modyfikacje algorytmu PFA pozwalające na zogniskowanie obrazu przy zachowaniu prawidłowej geometrii i nieznacznym wzroście złożoności obliczeniowej, wykorzystując reprezentację danych w przestrzeni falowej;
- adaptację techniki tomografii do zwiększenia rozróżnialności zarówno odległościowej jak i azymutalnej opartej na koherentnej integracji obrazowań dla różnych par nadajnik-odbiornik w radarze pasywnym;
- propozycję algorytmu ogniskowania obrazowania bazującego na wyznaczeniu dokładnej trajektorii ruchu obiektu w multistatycznej konfiguracji radaru pasywnego;
- współdziałanie w konstrukcji demonstratora multistatycznego radaru pasywnego wykorzystanego do rejestracji sygnałów rzeczywistych;
- weryfikację wybranych algorytmów w środowisku sygnałów rzeczywistych zarejestrowanych przez zbudowany demonstrator.

Dokonania Doktoranta przedstawione w rozprawie uważam za oryginalne i stanowiące pewien wkład w rozwój metod obrazowania w radarach pasywnych z odwrotną aperturą. Obrazowanie w multistatycznych radarach pasywnych nie jest często spotykane w literaturze światowej, więc recenzowana rozprawa stanowi cenne uzupełnienie tej tematyki.

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

Zdaniem recenzenta, przyjęty przez Doktoranta układ treści rozprawy jest przemyślany, a podział rozprawy na rozdziały jest prawidłowy. Nie budzi również zastrzeżeń poprawność redakcyjna rozprawy. Przyjęty układ treści w sposób konsekwentny wprowadza w tematykę obrazowania w systemach radarów pasywnych. Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów, dwóch dodatków oraz bibliografii.

Rozdział pierwszy jest wstępem, w którym Doktorant przedstawia motywację podjęcia tematyki obrazowania w systemach radarów pasywnych w technice odwrotnej apertury. W tym rozdziale definiowane są również dwie tezy rozprawy, cele rozprawy oraz przedstawiony jest krótki opis dokonań Doktoranta w tematyce określonej w tytule rozprawy.

W rozdziale drugim przedstawiono zasady pracy radaru pasywnego w geometrii bistatycznej. Zdefiniowano źródła i modele sygnałów, podkreślono potrzebę usuwania zakłóceń biernych. Po usunięciu zakłóceń biernych kolejnym etapem przetwarzania sygnału w radarze pasywnym jest obliczenie funkcji nieoznaczoności wzajemnej sygnału referencyjnego i sygnału pomiarowego.

Rozdział trzeci został poświęcony radarowi obrazującemu w trybie odwrotnej apertury. Zdefiniowany został model sygnału echa odbitego od obiektu oraz pokazano kompresję impulsu w radarze pracującym z falą ciągłą na płaszczyźnie  $(T, \omega)$  wyznaczając funkcję  $R_C(T, \omega)$  skompensowanego, wzajemnego widma gęstości mocy sygnału referencyjnego i pomiarowego. Wybór sygnału nadawanego przez system radarowy, a więc jego widmo oraz częstotliwość fali nośnej mają znaczący wpływ na

zobrazowanie. Bazując na wyznaczonej funkcji wzajemnej widmowej gęstości mocy opisano kilka metod obrazujących poruszający się obiekt w różnych płaszczyznach (współrzędne kartezjańskie  $(x, y)$ , współrzędne czas-częstotliwość  $(T, \omega)$ , współrzędne opóźnienie-prędkość Dopplera  $(\tau, v_D)$ ) podkreślając ich wady i zalety. W tym rozdziale przedstawiono również autorską modyfikację metody PFA, zwaną metodą falową. Wyniki symulacji pokazano na przykładzie czterech scenariuszy ruchu obrazowanego punktu. W symulacjach wykazano, że na zobrazowanie ma wpływ zarówno sygnał, jak i wzajemne położenie nadajnika i odbiornika oraz trajektoria ruchu obiektu. Problemem zobrazowania jest złożoność numeryczna algorytmu obrazującego, dlatego też rozważono możliwe uproszczenia i modyfikacje, aby uzyskać zadawalające zobrazowanie przy rozsądnej złożoności numerycznej algorytmu.

Rozdział czwarty jest wprowadzeniem do wielokątowego spojrzenia realizowanego przez multistatyczny system radarowy obiektu poruszającego się, co pozwala na zwiększenie rozdzielczości obrazów, podobnie jak w zagadnieniach obrazowania tomograficznego. Analiza odbioru sygnałów przez wiele odbiorników systemów pasywnych sygnałów, generowanych przez kolejne kanały standardu naziemnej telewizji cyfrowej pozwoliła na sformułowanie warunków zwiększenia rozdzielczości odległościowej i prędkościowej kosztem zwiększonej złożoności algorytmów.

W rozdziale piątym przedstawiono autorski algorytm ogniskowania multistatycznych zobrazowań radarowych. Błędy określenia trajektorii ruchu oraz błędy wyznaczenia wektora prędkości obiektu są krytyczne w zobrazowaniu obiektu. W zaproponowanej metodzie prędkość chwilowa obiektu estymowana jest na podstawie analizy sygnałów rejestrowanych w danej chwili przez wiele odbiorników. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych opracowanej przez autora metody estymacji dokładnej trajektorii obrazowanego obiektu.

W rozdziale szóstym zaprezentowano analizę rzeczywistych sygnałów dostarczanych przez telewizję cyfrową, a odebranych przez wiele odbiorników w celu zobrazowań autentycznych obiektów latających. Przedstawiono syntetyczne algorytmy obrazowania z modyfikacjami wynikającymi z realiów pomiarowych odebranych przez odbiorniki ech odbitych od obiektu, a koniecznymi do uzyskania zogniskowanych obrazów.

Rozdział siódmy jest podsumowaniem zawierającym wnioski końcowe i kierunki dalszych badań.

Należy podkreślić bardzo szeroki zakres tematyczny rozprawy wynikający z konieczności wprowadzenia opisu wielu skomplikowanych zależności między sygnałami a modelami poruszających się obiektów, na które te sygnały oddziałują w radarze pasywnym w celu uzyskania zogniskowanego obrazu obiektu o akceptowalnej rozróżnialności.

Doktorant przeprowadził szczegółową analizę teoretyczną wszystkich elementów składowych radaru pasywnego, wprowadzając wiele uzasadnionych uproszczeń, uzyskując równania przydatne zarówno do realizacji symulacyjnej systemu radarowego, jak i do oceny zobrazowania w środowisku rzeczywistym. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych potwierdzają poprawność przyjętych koncepcji opisu zarówno modeli sygnałów, jak i obiektów (punktowych, wielopunktowych) w badaniach symulacyjnych. Natomiast w eksperymentach rzeczywistych nie zawsze udaje się zachować ograniczenia i konieczne warunki poprawnego zobrazowania.

Doktorant podjął próby wyjaśnienia przyczyn niedokładnych rzeczywistych zobrazowań. Pomiarów sygnałów radarowych podlegają zniekształceniom wynikającym z realnych możliwości sprzętowych i zmiennych warunków środowiskowych w realizacji założonych eksperymentów. Rozproszone układy nadajników i odbiorników wprowadzały inne opóźnienia dla różnych par nadajnik-odbiornik. W eksperymentach

nadajnikami były stacje nadawcze naziemnej telewizji cyfrowej. Sygnał referencyjny i sygnał oświetlający obiekt były różne, co wymuszało potrzebę szczególnego podejścia algorytmicznego do przetwarzania sygnału pomiarowego zawierającego echo odbite od obiektu. W warunkach rzeczywistego eksperymentu antena pomiarowa rejestruje również echa odbite od obiektów niepożądanych, co zmusza system do uruchomienia specjalistycznych procedur usunięcia niepożądanych ech i wydzielenia sygnału echa od pożądanego obiektu. Dopiero tak przygotowane echo było poddawane algorytmom obrazowania obiektu. Dodatkowe trudności algorytmów obrazowania opisywane przez Doktoranta wynikają z różnic poziomu rejestrowanego sygnału przez każdy z odbiorników systemu multistatycznego. Informacja o poziomach wzmocnienia torów odbiorczych zostaje utracona w trakcie przeprowadzania samych pomiarów, ze względu na niedoskonałości systemu rejestrującego. Każdy odbiornik widzi obiekt pod różnym kątem bistatycznym i w innych płaszczyznach obserwacji, więc inne fragmenty obiektu są oświetlane i przesłaniane, stąd pojawiają się różnice w zobrazowaniach w warunkach rzeczywistych.

Tak więc w rozprawie w sposób konsekwentny przedstawiono etapy postępowania, które prowadzą do prób uzyskania dobrze zogniskowanego obrazu obiektu. W opisie eksperymentów przeanalizowano skutki niezachowania założeń o prostoliniowej trajektorii ruchu obiektu (samolotu) oraz niezachowania stałej prędkości w czasie integracji. Propozycja Doktoranta pozwala na ograniczenie odstępstw od założonych warunków przez na przykład podział echa na fragmenty, w których można założyć prostoliniowość trajektorii i stałość prędkości w przetwarzaniu tych fragmentów. Przetwarzanie fragmentów można później zintegrować. Końcowe zobrazowanie w warunkach systemu multistatycznego może być otrzymane przez niekoherentne złożenie zobrazowań z każdego odbiornika, co zostało pokazane w eksperymencie analizowanym w rozprawie.

Stwierdzam, że Doktorant w sposób przekonujący uzasadnił zalety, trudności i ograniczenia przy obrazowaniu w rzeczywistych multistatycznych systemach pasywnych. W efekcie uzyskano kompleksowe opracowanie radaru pasywnego z odwrotną aperturą.

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

Rozprawa ma charakter analityczno–doświadczalny. Zarówno część analityczna, jak i doświadczalna jest przedstawiona bardzo dobrze, z wyszczególnieniem możliwych uproszczeń w analizie zależności i wskazaniem trudności w realizacjach rzeczywistych pomiarów. Idea multistatycznego radaru pasywnego z odwrotną aperturą jest rzadko rozważana w literaturze, stąd wniosek, że temat podjęty przez Doktoranta wypełnia pewną lukę teoretyczną i doświadczalną dotyczącą zobrazowania w czasie rzeczywistym w takim systemie radarowym. Słabszą stroną rozprawy jest jedynie zbyt skrótowe wyprowadzenie niektórych zależności z pominięciem etapów pośrednich pomiędzy zamieszczonym opisem a wnioskiem oraz niezbyt dokładne sformułowanie pewnych opisów.

Poniżej omówiono wybrane uwagi dyskusyjne i komentarze krytyczne, które należy wyjaśnić na obronie rozprawy doktorskiej.

Str. 48-49 – zdanie: *Na rysunku 3.5 przedstawiono wynik zobrazowania metodą projekcji wstecznej* jest mało informacyjne, ponieważ we wzorze (3.24) obliczana jest wartość współczynnika odbicia  $\rho$  pojedynczego punktu  $\mathbf{P}$  z funkcji  $R_C(T, \omega, \mathbf{P})$ , natomiast obrazowanie punktu  $\mathbf{P}$  przedstawione jest w płaszczyźnie  $(x, y)$ . Proszę o bliższe

informacje o współrzędnych obrazowania  $(x, y)$  punktów P.

Str. 55 – zdanie: *Na podstawie zależności (3.31a) oraz (3.31b) oraz znajomości modelu ruchu możliwe jest odtworzenie obrazu w przestrzennym układzie kartezjańskim jest zdaniem recenzenta skrótem myślowym, ponieważ wzory (3.31a) oraz (3.31b) przedstawiają równania wyznaczające opóźnienie punktu P,  $\tau_P$  i częstotliwość Dopplera  $\Omega_D$ . Obraz w płaszczyźnie  $(\tau_P, \Omega_D)$  jest oczywisty, natomiast obraz we współrzędnych kartezjańskich  $(x$  (odległość bistatyczna?),  $y$  (prędkość bistatyczna?)) już nie. Proszę o bardziej szczegółowy opis rys. 3.8.*

Str. 58 – fraza: *Zwiększanie czasów integracji poza liniową modulację fazy w wyrażeniu (3.21) skutkuje rozmyciem obrazu danego punktu jest niezbyt szczęśliwie zredagowana. Czy chodzi o pominięcie składowych kwadratowych fazy ze względu na czas, pozostawiając tylko składowe liniowe? Proszę o bardziej szczegółowe wyjaśnienie.*

Str. 65 – fraza *Aby znaleźć zniekształcenie obrazu, jakie wprowadza zadana trajektoria, należy wyznaczyć pochodną funkcji fazy w powyższym wzorze dla wektorów  $k$ , dla których wyznaczona jest wartość funkcji  $R_C(k)$  jest zdaniem recenzenta intuicyjnie niejasna i wzór (3.43) wymaga głębszego wyjaśnienia. Dlaczego pochodna fazy określa pozycję punktu  $r_{P,Trg}(k)$ ?*

Str. 68 – Raczej trudno wyciągnąć wnioski z frazy: *Należy zauważyć, że we wzorze (3.41) składnik związany z parametrem  $\phi_{2,k}(k)$  zmienia się znacznie wolniej niż  $\phi_{1,k}(k)$ . analizując równanie (3.41). Proszę o komentarz.*

Str. 82 – zdanie: *Wyznaczając krzywe dane wyrażeniami (3.59) oraz (3.67) lub (3.69), można w łatwy sposób oszacować parametr algorytmu, jakim jest rozmiar pojedynczego fragmentu przetwarzanych danych wejściowych, dla którego dokładność generowanego obrazu spełnia żądane wymagania wymaga doprecyzowania. Co należy rozumieć przez rozmiar pojedynczego fragmentu danych? Czy dotyczy to szerokości przyjętego okna  $W_{j,k}(k)$ ?*

Proszę również o doprecyzowanie sformułowań: *koherentne i niekoherentne złożenie zobrażeń*. Analiza poprawy rozróżnialności i poprawy zogniskowania obrazów w opcji radaru multistatycznego nie budzi zastrzeżeń. Podobnie opis scenariusza eksperymentów rzeczywistych nie wymaga głębszych komentarzy.

Recenzentowi brakuje w rozprawie odniesienia do oprogramowania. Dużą część pracy stanowią analizy symulacyjne, więc można byłoby pokazać reprezentatywne algorytmy od strony software'owej, na przykład w postaci pseudokodu.

## 7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Cel badawczy postawiony przez Autora jest ambitny i został zrealizowany, ale wymaga dalszych szczegółowych analiz w celu poprawy jakości zobrażenia. Doktorant podejmuje problem o niewątpliwie istotnym znaczeniu praktycznym, zwłaszcza w zastosowaniach wojskowych. Radar bez nadajników jest tańszy i trudno wykrywalny, co jest zaletą na polu walki. Zastosowanie technik i algorytmów przetwarzania sygnałów w radarze pasywnym, zaproponowanych w rozprawie, może być wskazówką do modernizacji i zwiększenia funkcjonalności produkowanych w Polsce

radarów pasywnych. Jednakże temat zobrazowania jest nadal otwarty i wymaga dalszych intensywnych badań, również z wykorzystaniem innych źródeł oświetlenia obiektu.

**8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:**

- a) niespełniająca wymagań,
- b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c) spełniająca wymagania,
- d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,
- e) **wybitnie dobra zasługująca na wyróżnienie.**

W przekonaniu recenzenta opiniowana rozprawa pokazuje wynik samodzielnego rozwiązania problemu badawczego, a jej treść i poziom merytoryczny świadczy o dużej wiedzy Autora w podstawowej dyscyplinie naukowej, w której ulokowana jest rozprawa.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w Artykule 13, ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 z 2003 r., poz. 595 z późn. zm.) oraz w stosownych przepisach wykonawczych wydanych na podstawie w/w Ustawy.

Zgodnie z zapisem Art. 179 ust. 1 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669) wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Kamila Bączka do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej.

Ewa Szniur