

**Rada Naukowa Dyscypliny  
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej**

zaprasza na  
publiczną obronę rozprawy doktorskiej

**mgr. inż. Krzysztofa Radeckiego**

która odbędzie się w dniu 5 lutego 2021 r. o godzinie 10.00  
w trybie zdalnym na platformie MS Teams\*

Tytuł rozprawy doktorskiej: „Szybki algorytm projekcji wstecznej oparty na współrzędnych barycentrycznych do zastosowań w aktywnych i pasywnych zobrazowaniach radarowych SAR”

promotor: dr hab. inż. Piotr Samczyński Wydział Elektroniki i  
Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej

recenzenci: dr hab. inż. Piotr Kaniewski, prof. uczelni Wydział Elektroniki  
Wojskowa Akademia Techniczna

dr hab. inż. Janusz Dudczyk, prof. uczelni Instytut Nauk  
Informatyczno-Technicznych Państwowa Uczelnia im. Stefana  
Batorego

\*obrona odbędzie się na platformie MS Teams. Osoby zainteresowane udziałem są proszone o kontakt z sekretarzem komisji doktorskiej dr hab. inż. Iloną Bluemke ( i.bluemke@ii.pw.edu.pl) nie później niż 12 godz. przed zaplanowaną obroną.

[https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%3ameeting\\_OTc1MDEyM2QtNzc0Ni00Y2IxLWFmMzktYzEzYWRjZmMyYzE2%40thread.v2/0?context=%7b%22id%22%3a%223b50229c-cd78-4588-9bcf-97b7629e2f0f%22%2c%22oid%22%3a%22781ca0f1-727b-4435-89cd-b26d7b9545d9%22%7d](https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%3ameeting_OTc1MDEyM2QtNzc0Ni00Y2IxLWFmMzktYzEzYWRjZmMyYzE2%40thread.v2/0?context=%7b%22id%22%3a%223b50229c-cd78-4588-9bcf-97b7629e2f0f%22%2c%22oid%22%3a%22781ca0f1-727b-4435-89cd-b26d7b9545d9%22%7d)

Na stronie internetowej wydziału [www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje](http://www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje) znajdują się streszczenie rozprawy oraz recenzje, jak również dostęp do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

W imieniu Rady Naukowej Dyscypliny

Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

Politechniki Warszawskiej

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kotulski

Przewodniczący Komisji Doktorskiej



**Tytuł:** Szybki algorytm projekcji wstecznej oparty na współrzędnych barycentrycznych do zastosowań w aktywnych i pasywnych zobrazowaniach radarowych SAR

**Autor:** mgr inż. Krzysztof Radecki

**Promotor:** dr hab. inż. Piotr Samczyński, prof. uczelni

**Streszczenie:**

W rozprawie przedstawiono nowatorską technikę uzyskiwania zobrazowań dla radaru z syntetyczną aperturą (ang. *Synthetic Aperture Radar* - SAR) za pomocą algorytmu projekcji wstecznej (ang. *Back Projection Algorithm* - BPA) wykorzystującego współrzędne barycentryczne. Radar SAR ma wiele zastosowań. Najczęściej jednak jest wykorzystywany do tworzenia zobrazowań Ziemi o wysokiej rozdzielczości. Zagadnienie, które do dziś przysparza wiele problemów, dotyczy przetwarzania obrazów SAR w systemach pracujących w czasie rzeczywistym.

Przez lata opracowanych zostało wiele algorytmów pozwalających na uzyskiwanie obrazów za pomocą radaru SAR. Najbardziej powszechnie stosowanym rozwiązaniem jest algorytm projekcji wstecznej, integrujący zarejestrowane dane radarowe. Jego zaletą jest możliwość uzyskiwania obrazów o wysokiej rozdzielczości. Wadą jest duży nakład obliczeniowy i czas potrzebny na wykonanie obliczeń. Stanowi to wciąż barierę w zastosowaniu techniki BPA w systemach czasu rzeczywistego.

Celem pracy było opracowanie techniki projekcji wstecznej o zredukowanym nakładzie obliczeniowym, umożliwiającym otrzymywanie obrazów SAR w czasie rzeczywistym. Przeprowadzona została dokładna analiza klasycznego algorytmu BPA oraz innych rozwiązań dostępnych w literaturze. Znaną zależnością jest fakt, że wraz ze wzrostem rozmiaru danych radarowych nakład obliczeniowy potrzebny do wykonania zobrazowania za pomocą klasycznej techniki BPA rośnie bardzo szybko. Opracowane rozwiązanie pozwala na zarządzanie liczbą surowych danych radarowych, jakie mają być wykorzystane przy tworzeniu zobrazowania. Efekt ten został uzyskany dzięki tworzeniu tzw. wirtualnej wiązki radaru z syntetyczną aperturą i określaniu za pomocą zaproponowanych współrzędnych barycentrycznych zakresu danych radarowych niezbędnych do uzyskania zobrazowania radarowego.

Opisana technika została zbadana pod względem możliwości szybkiego uzyskiwania zobrazowań SAR. Działanie techniki BPA, wykorzystującej współrzędne barycentryczne, zostało porównane z klasyczną techniką BPA z wykorzystaniem sygnałów symulowanych. Kolejnym krokiem była weryfikacja zaproponowanej w rozprawie techniki w rzeczywistych systemach radarowych SAR działających w trybie aktywnym oraz pasywnym. Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność działania opracowanej techniki przetwarzania zobrazowań SAR.

**dr hab. inż. Piotr Kaniewski, prof. WAT**

Instytut Radioelektroniki

Wydział Elektroniki

Wojskowej Akademii Technicznej

ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2

00-908 Warszawa

Warszawa, 2 grudnia 2020 r.

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

**Tytuł rozprawy:** Szybki algorytm projekcji wstecznej oparty na współrzędnych barycentrycznych do zastosowań w aktywnych i pasywnych obrazowaniach radarowych SAR

**Autor rozprawy:** mgr inż. Krzysztof Radecki

**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)?**

W przedstawionej do recenzowania rozprawie doktorskiej, mgr inż. Krzysztof Radecki postawił sobie za cel opracowanie zmodyfikowanego algorytmu projekcji wstecznej (BPA) umożliwiającego szybsze uzyskiwanie obrazowań SAR w porównaniu z klasycznym algorytmem BPA. Doktorant sformułował przy tym jedną tezę: „Dzięki zastosowaniu zaproponowanego w rozprawie nowatorskiego szybkiego algorytmu projekcji wstecznej BPA, opartego na barycentrycznym modelu wyznaczania współrzędnych między obrazowanymi obiektami a nośnikiem radaru SAR, oraz wykorzystaniu współczesnych urządzeń dedykowanych do obliczeń równoległych, możliwa jest implementacja techniki BPA w aktywnych i pasywnych systemach radarowych SAR działających w czasie rzeczywistym”.

W celu udowodnienia powyższej tezy, Autor zrealizował szereg zadań badawczych. Zadania te zasadniczo pokrywają się z elementami pracy, które zostały wymienione jako główne dokonania własne Doktoranta w obszarze tematycznym rozprawy. Obejmują one:

- opracowanie techniki projekcji wstecznej wykorzystującej współrzędne barycentryczne,
- przeprowadzenie analizy złożoności obliczeniowej algorytmów SAR pod względem możliwości wykorzystania w systemach czasu rzeczywistego,
- weryfikację i badania opracowanego algorytmu na danych symulowanych,



- implementację algorytmu dla radaru aktywnego i testy z wykorzystaniem sygnałów radarowych zarejestrowanych w kampanii pomiarowej w Płocku w 2015r.,
- implementację algorytmu dla radaru pasywnego i testy z wykorzystaniem sygnałów radarowych zarejestrowanych podczas ćwiczeń NATO Science and Technology Organization pod kryptonimem APART-GAS 2019 w Słupsku.

Postawiona w pracy teza jest zrozumiała i jednoznacznie wskazuje zarówno na cel prowadzonych przez Doktoranta badań, jak i na zastosowane narzędzia do jego realizacji. Jest też skonstruowana w sposób umożliwiający jej udowodnienie w wyniku realizacji ww. zadań badawczych. Tym samym należy stwierdzić, że zagadnienie naukowe rozpatrzone w pracy zostało sformułowane w jasny i poprawny sposób.

Recenzowana praca zawiera zarówno elementy o charakterze teoretycznym, jak i praktycznym. Do istotnych osiągnięć teoretycznych zaprezentowanych w pracy zaliczam przede wszystkim przedstawienie oryginalnej koncepcji techniki projekcji wstecznej wykorzystującej współrzędne barycentryczne, możliwej do zastosowania w systemach SAR pracujących w czasie rzeczywistym, a także zaproponowanie zależności umożliwiających szacowanie nakładów obliczeniowych wymaganych do uzyskania obrazowań SAR za pomocą różnych algorytmów.

Elementy praktyczne pracy obejmują między innymi przeprowadzenie i analizę wyników badań symulacyjnych klasycznego algorytmu BPA oraz zaproponowanego przez Autora zmodyfikowanego algorytmu BPA dla kilku prostych scenariuszy z obserwowanymi scenami zawierającymi pojedynczy lub wiele regularnie rozmieszczonych obiektów punktowych.

Do ważnych elementów praktycznych rozprawy należy zaliczyć również uzyskane przez Autora i zaprezentowane w pracy wyniki eksperymentów, polegających na przetwarzaniu rzeczywistych sygnałów radarowych pochodzących z radaru aktywnego i pasywnego za pomocą ww. algorytmów BPA i BPA wykorzystującego współrzędne barycentryczne. Przetwarzane dane radarowe zostały zarejestrowane podczas dwóch kampanii pomiarowych prowadzonych przez zespoły, których aktywnym członkiem był m.in. Autor recenzowanej rozprawy.

Biorąc pod uwagę zawartość pracy zaliczam ją do kategorii prac teoretyczno-eksperymentalnych.

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

W pracy zamieszczono bogatą bibliografię liczącą 120 pozycji literaturowych, odnoszących się do wszystkich najważniejszych zagadnień poruszanych w pracy. Można tu znaleźć publikacje dotyczące techniki radarowej, a w szczególności techniki radarów z syntetyczną aperturą i algorytmów stosowanych do uzyskiwania obrazowań SAR, zagadnień związanych z techniką obliczeniową, w tym z wykorzystaniem platform wspierających obliczenia równoległe, a także zagadnień związanych z grafiką komputerową, gdzie znajdują szerokie zastosowanie wykorzystane przez Autora współrzędne barycentryczne.



Zakres czasowy cytowanych publikacji obejmuje okres od lat osiemdziesiątych XX wieku do bieżącego roku, przy czym zdecydowanie dominują publikacje najnowsze, z bieżącej i poprzedniej dekady XXI wieku. Cytowane publikacje pochodzą przede wszystkim z cenionych, wysoko punktowanych czasopism, m.in. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on Image Processing, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Transactions on Signal Processing, IEEE Sensors Journal, IET Radar, Sonar & Navigation, IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, czy Acta Numerica oraz z uznanych konferencji międzynarodowych i krajowych, dotyczących głównie tematyki teledetekcyjnej, a w szczególności radarowej. W wykazie są też obecne pojedyncze klasyczne publikacje książkowe dotyczące techniki radarowej.

Warto zwrócić uwagę, że w bibliografii znajduje się aż 12 pozycji, których autorem lub współautorem jest Doktorant, w tym między innymi artykuły opublikowane w tak uznanych czasopismach jak IET Radar, Sonar & Navigation oraz IEEE Sensors Journal. Co szczególnie ważne, publikacja w IEEE Sensors Journal z 2019 roku, zatytułowana „Fast Barycentric-Based Back Projection Algorithm for SAR Imaging”, której Doktorant jest pierwszym autorem, prezentuje szkic algorytmu projekcji wstecznej wykorzystującego współrzędne barycentryczne, będącego przedmiotem recenzowanej rozprawy, a także zawiera wybrane wyniki badań symulacyjnych i eksperymentów z wykorzystaniem rzeczywistych sygnałów radarowych, które w poszerzonym zakresie Autor zawarł w swojej pracy doktorskiej. Zarówno koncepcja algorytmu, jak i sposób jego badania, zostały już zatem poddane ocenie recenzentów oraz edytorów wymienionego czasopisma i jak wskazuje fakt akceptacji artykułu, spotkały się z ich uznaniem.

Cytowane w rozprawie źródła dotyczą zarówno zagadnień teoretycznych, jak i aplikacyjnych, w tym praktycznych zastosowań opisywanych w publikacjach systemów SAR, metod i algorytmów przetwarzania sygnałów oraz danych. Zakres przeprowadzonej analizy literaturowej należy uznać zatem za właściwy, dobrze odzwierciedlający stan wiedzy światowej w dziedzinie rozprawy. Wnioski z przeglądu źródeł zawierają nie tylko opis rozwiązań proponowanych przez innych autorów, ale również, co szczególnie ważne w pracy naukowej, ich krytyczną analizę, na tle której Autor przedstawia własną koncepcję. Wnioski są formułowane w sposób jasny i przekonujący, a całość przedstawionej analizy świadczy o dużej wiedzy autora w dziedzinie rozprawy.

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

Sformułowane przez Autora zagadnienie polegało na opracowaniu zmodyfikowanej wersji klasycznego algorytmu projekcji wstecznej, w celu przyspieszenia obliczeń zmierzających do uzyskiwania obrazowań SAR i umożliwienia dzięki temu jego implementacji w aktywnych i pasywnych systemach radarowych SAR działających w czasie rzeczywistym.



Analizując powyższe zagadnienie, Doktorant zauważył, że obrazując wybrany punkt obserwowanego obszaru, należy przetwarzać dane radarowe zarejestrowane tylko w takich położeniach nośnika radaru, dla których punkt ten znajduje się w wiązce radarowej. W innych położeniach nośnika nie są bowiem rejestrowane sygnały użyteczne z punktu widzenia obrazowania tego punktu. Rezygnując zatem z przetwarzania danych zarejestrowanych podczas lotu w pozostałych częściach trajektorii, możliwe staje się zmniejszenie nakładów obliczeniowych algorytmu BPA, bez pogorszenia jakości otrzymywanych obrazów. Jest to założenie w pełni uzasadnione.

Zaproponowany w rozprawie algorytm projekcji wstecznej wykorzystujący współrzędne barycentryczne, w którym wyznaczana jest wirtualna wiązka syntetycznej apertury o początku w obrazowanym punkcie, pozwala na istotne ograniczenie zakresu przetwarzanych danych radarowych, a tym samym zredukowanie liczby operacji arytmetycznych niezbędnych podczas tworzenia obrazowań SAR. Ma on ponadto szereg cech szczególnie korzystnych z punktu widzenia aplikacyjnego. Ze względu na niezależne rekonstruowanie wszystkich punktów obrazu, algorytm może być implementowany na platformach obliczeniowych dedykowanych do obliczeń równoległych, co pozwala zasadniczo skrócić czas obliczeń. Ponadto, przy odpowiednio dobranej szerokości wirtualnej wiązki, algorytm charakteryzuje się mniejszą wrażliwością na niedokładną znajomość parametrów lotu nośnika radaru SAR niż klasyczny algorytm BPA. Ważną cechą opisaną w pracy metody jest możliwość równoczesnego wpływania na czas obliczeń i jakość obrazowania poprzez zmianę szerokości wirtualnej wiązki. Wybór szerszej wiązki wydłuża wprawdzie czas obliczeń, ale zbliża jakość uzyskiwanych obrazów do jakości obrazów z klasycznego algorytmu BPA. Z drugiej strony, jeśli realizowane zadanie obserwacyjne nie wymaga wysokiej szczegółowości obrazowania, dzięki użyciu węższej wiązki można istotnie skrócić czas wyznaczania obrazów SAR.

Użycie w zaproponowanym algorytmie współrzędnych barycentrycznych, chętnie stosowanych w modelowaniu geometrycznym w grafice komputerowej, istotnie ułatwiło realizację zadania polegającego na wyznaczeniu zakresu stanów położenia platformy z radarem, dla których należy przetwarzać zarejestrowane dane radarowe podczas rekonstrukcji każdego z punktów obrazu. Zmniejszenie liczby niezbędnych do wykonania operacji arytmetycznych zostało wykazane w wyniku przeprowadzonej w rozdziale 4.3 analizy nakładu obliczeniowego i dodatkowo potwierdzone porównaniem czasów wykonania zaimplementowanych algorytmów w wersji sekwencyjnej i zrównoleglonej (tabela 5.1).

Biorąc pod uwagę powyższe fakty, uważam, że Autor w pełni rozwiązał sformułowane w pracy zagadnienie i prawidłowo dobrał metody jego rozwiązania oraz weryfikacji uzyskanych wyników.

#### **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?**

Tematyka rozprawy wpisuje się w szeroki nurt prac naukowych oraz implementacyjnych dotyczących techniki SAR, prowadzonych w wielu ośrodkach badawczych na całym świecie. Technika radarów z syntetyczną aperturą jest znana od wielu lat i stale rozwijana. Jednym z istotnych problemów związanych z jej praktycznym wykorzystaniem są wysokie wymagane



nakłady obliczeniowe, występujące zwłaszcza w przypadku oferujących wysoką jakość obrazowania, ale jednocześnie najbardziej wymagających obliczeniowo algorytmów, takich jak rozważany w rozprawie algorytm BPA o złożoności obliczeniowej  $O(N^3)$ . Pomimo stałego rozwoju techniki komputerowej jest to problem wciąż aktualny, a zatem dążenie do opracowania algorytmów bardziej efektywnych obliczeniowo jest ze wszech miar uzasadnione.

W literaturze światowej można znaleźć liczne publikacje, w szerokim zakresie cytowane również przez Autora, dotyczące modyfikacji klasycznego algorytmu BPA. Większość opisywanych w nich rozwiązań bazuje na podziale tworzonego zobrazowania na podobszary, które są następnie łączone. Znane są również prace, w których rozważa się przeformułowanie problemu syntezy obrazu SAR w taki sposób, aby umożliwić jego efektywną implementację na platformach obliczeniowych wspierających obliczenia równoległe.

Według wiedzy recenzenta, opisana w pracy technika projekcji wstecznej wykorzystująca współrzędne barycentryczne nie była dotychczas opisywana w literaturze innej niż publikacje własne Autora. Rozwiązanie to uznaję za szczególnie oryginalne, świadczące o dogłębnym zrozumieniu znanych algorytmów oraz umiejętności identyfikacji ich słabości, a także wskazujące na zdolność do formułowania własnych, autorskich koncepcji rozwiązań złożonych problemów naukowych. Do samodzielnego i oryginalnego dorobku Doktoranta zaliczam również wyprowadzenie zależności służących do szacowania nakładów obliczeniowych algorytmów syntezy obrazów SAR, a także ocenę działania opracowanego algorytmu z wykorzystaniem symulowanych i rzeczywistych sygnałów radarowych.

##### **5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?**

Recenzowana praca liczy 132 strony i składa się z sześciu rozdziałów. W rozdziale pierwszym znalazły się informacje zwyczajowo umieszczane na początku pracy, tzn. krótkie wprowadzenie, motywacje Autora do podjęcia badań, cel i teza pracy, wypunktowany wkład własny oraz informacje o układzie pracy. Kolejne dwa rozdziały zawierają zarówno znane wiadomości teoretyczne, dotyczące techniki radarowej i klasycznych algorytmów SAR, jak i wyniki własnych dociekań, dotyczące analizy nakładu obliczeniowego niezbędnego do uzyskiwania obrazów SAR. Proporcje pomiędzy wiadomościami literaturowymi i wynikami własnymi w tych rozdziałach są prawidłowe, a dzięki umiejętnemu ich połączeniu, pracę odbiera się jako opracowanie kompletne, które mogłoby mieć również zastosowanie w dydaktyce. Rozdział czwarty, prezentujący najważniejsze osiągnięcie naukowe rozprawy, tj. algorytm BPA wykorzystujący współrzędne barycentryczne, jest napisany w sposób jasny, zwięzły i w pełni zrozumiały, między innymi dzięki uzupełnieniu go dobrze dobranymi przykładami i rysunkami. Opis wyników badań symulacyjnych i eksperymentów z wykorzystaniem rzeczywistych sygnałów radarowych zawarto w piątym rozdziale pracy, a konkluzje i podsumowanie rozprawy znalazły się w rozdziale szóstym.

Układ pracy jest zasadniczo poprawny, chociaż zastrzeżenie może budzić brak wydzielonego rozdziału prezentującego stan wiedzy w dziedzinie rozprawy, który zwykle stanowi jeden z pierwszych rozdziałów prac doktorskich. W recenzowanej rozprawie analiza



literatury jest natomiast rozproszona we wszystkich rozdziałach pracy. Nie jest to jednak problem bardzo istotny, ponieważ sama analiza literatury została przeprowadzona właściwie i prawidłowo odzwierciedla stan wiedzy w obszarze badań prowadzonych przez Doktoranta.

Pracę czyta się z płynnie, między innymi dzięki przemyślanemu, linearnemu układowi treści, który nie wymaga od czytelnika wertowania i przeszukiwania stron. Zachowana jest ciągłość wyводу; nie występują istotne przeskok i skróty myślowe, które utrudniałyby czytelnikowi śledzenie treści. Autor formułuje myśli w postaci na ogół krótkich zdań, o właściwej konstrukcji gramatycznej. Posługuje się właściwą terminologią i poprawnym językiem technicznym. Praca zawiera wystarczającą liczbę zależności matematycznych, a przy tym nie jest nimi przeładowana. Zastosowana notacja jest zrozumiała i łatwa do zapamiętania, dzięki czemu rzadko konieczne jest sięganie do umieszczonego na początku rozprawy wykazu skrótów i oznaczeń. Zrozumienie prezentowanego materiału ułatwiają stosunkowo proste, ale dobrze wykonane i opisane rysunki poglądowe.

Praca jest przygotowana starannie i prawidłowo sformatowana, chociaż jak to się często zdarza w dłuższych opracowaniach, Autor nie ustrzegł się drobnych błędów, w tym głównie skrótów myślowych i nieścisłych sformułowań, np.:

- „pomiar odebranej fali elektromagnetycznej” (str. 12), gdzie chodzi zapewne o pomiar jej wybranych parametrów,
- „efektywniejszym rozwiązaniem na wykonanie filtracji jest wymnożenie sygnału radarowego przez odpowiedź impulsową filtru dopasowanego w dziedzinie częstotliwości” (str. 29), gdzie należałoby raczej mówić o mnożeniu widma sygnału i transmitancji filtru,
- „rozdzielność [...] zależy od prędkości światła  $c$ , od ...” (str. 39), co odnosi się do wzoru (2.39) – w przypadku, gdy wielkość po prawej stronie zależności (w tym przypadku prędkość światła) jest traktowana jako stała, mówi się o zależności zmiennej po lewej stronie od zmiennych po prawej stronie ( $B$  i  $\gamma$ ), a nie od stałych ( $c$ ),
- „podczas pomiarów symulacyjnych” (str. 69),
- „mapa optyczna Google Earth” (str. 108).

Ponadto w całej pracy kropka dziesiętna jest używana zamiast przecinka, co jest przyjęte w publikacjach anglojęzycznych, ale niezgodnie z notacją stosowaną w polskiej literaturze technicznej. Zauważalne są też usterki w formatowaniu wykazu literatury. Niektóre cytowane publikacje zawierają niepełne dane, np. niekompletne tytuły lub brak miejsca publikacji, np. [12] i [60], a ponadto tytuły, w tym występujące w nich skróty, takie jak „SAR”, „GPU” itp., są zapisane małymi literami.

Wymienione w tej części recenzji uwagi, odnoszące się do układu pracy, jej formatowania, poprawności językowej i redakcyjnej, nie zmieniają ogólnie bardzo pozytywnego odbioru rozprawy doktorskiej i nie wpływają istotnie na jej ocenę. Rozprawa jako całość wskazuje na umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawiania wyników prac badawczych prowadzonych przez Doktoranta.

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

Praca napisana jest na wysokim poziomie merytorycznym i starannie przygotowana, tym niemniej po zapoznaniu się z nią nasuwają się również pewne uwagi krytyczne:



- Analiza nakładu obliczeniowego algorytmów SAR przedstawiona w rozprawie opiera się na dość daleko idących uproszczeniach. Przykładowo, do liczby operacji arytmetycznych wynikających z mnożenia i sumowania dodawana jest złożoność obliczeniowa transformaty FFT wynosząca  $N \log_2 N$  (np. wzór 2.23), która nie jest tożsama z liczbą wykonywanych operacji. Faktyczna liczba operacji arytmetycznych, takich jak mnożenie i dodawanie, zależy od zastosowanej implementacji algorytmu FFT i jest kilkakrotnie większa niż  $N \log_2 N$ . Ponadto operacje dodawania i mnożenia traktowane są w pracy jako równoważne pod względem wymaganych nakładów obliczeniowych. Tymczasem wymienione operacje wykonywane są na liczbach zespolonych, a zatem dodawanie dwóch liczb zespolonych oznacza w rzeczywistości dwie operacje zmiennoprzecinkowe dodawania, natomiast mnożenie dwóch liczb zespolonych oznacza sześć operacji zmiennoprzecinkowych (cztery operacje mnożenia i dwie operacje dodawania). Doktorant zdaje sobie sprawę z ograniczeń przeprowadzonych oszacowań nakładów obliczeniowych, o czym świadczy fakt, że wspomina o nich na str. 33 rozprawy, a uzyskiwane za pomocą wyznaczonych wzorów nakłady obliczeniowe traktuje w kategoriach porównawczych. Ponadto, podobne podejście przyjęto we wszystkich oszacowaniach liczby operacji, a zatem można przyjąć, że ich wyniki są w pewnym stopniu podobnie obciążone. Tym niemniej, w uzyskanych wzorach na liczbę operacji arytmetycznych różnych algorytmów zmieniają się też proporcje składników, a zatem np. zredukowanie liczby operacji FFT w innym stopniu zmniejszy obciążenie jednostki obliczeniowej niż np. zredukowanie o tyle samo procent liczby sumowań. Z tego względu chętnie poznałbym opinię Doktoranta oceniającą w jakim stopniu przyjęte uproszczenia wpływają na przedstawione w pracy wyniki porównań nakładów obliczeniowych różnych algorytmów.
- Autor porównuje zaproponowany algorytm BPA wyłącznie z klasycznym algorytmem BPA, unikając porównań z innymi zmodyfikowanymi algorytmami BPA, które również oferują redukcję nakładów obliczeniowych kosztem obniżonej jakości obrazowania. Jak argumentuje Autor, w dostępnej literaturze nie stosuje się takich porównań algorytmów zmodyfikowanych, traktując jako punkt odniesienia jedynie klasyczny algorytm BPA ze względu na jego najwyższą jakość (str. 87). Z aplikacyjnego punktu widzenia porównanie jakości uzyskiwanych obrazowań SAR i stopnia redukcji nakładów obliczeniowych różnych zmodyfikowanych algorytmów SAR byłoby jednak interesujące i ułatwiłoby zespołom opracowującym systemy SAR podejmowanie świadomych decyzji w zakresie wyboru takich algorytmów.
- We wzorach, w których szacowano liczbę wykonywanych operacji arytmetycznych pominięto podstawę logarytmu wynoszącą 2, tymczasem logarytm bez podanej podstawy jest interpretowany jako logarytm o podstawie 10.
- W zależności (5.1) zamiast znaku '+' powinien być prawdopodobnie '-', ponieważ obecnie zależność ta nie zgadza się ze wzorem punktów widocznym na rys. 5.9.

Powyzsze uwagi nie wpływają jednak istotnie na wysoką ogólną ocenę rozprawy.

## 7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

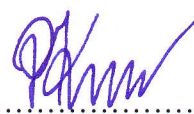
Algorytmy syntezy obrazów SAR, w tym w szczególności rozważany w rozprawie algorytm BPA, są stosunkowo intensywne obliczeniowo co utrudnia ich stosowanie w systemach obrazujących czasu rzeczywistego. Zagadnienie naukowe podjęte w pracy, dotyczące zastosowania współrzędnych barycentrycznych w algorytmie BPA w celu redukcji wymaganych nakładów obliczeniowych, jest ze wszech miar uzasadnione i może mieć istotny wymiar praktyczny. Uważam zatem, że wyniki badań przedstawione w recenzowanej pracy charakteryzują się wysoką przydatnością dla nauk technicznych.

## 7. 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**

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Radeckiego pt. „Szybki algorytm projekcji wstecznej oparty na współrzędnych barycentrycznych do zastosowań w aktywnych i pasywnych zobrazowaniach radarowych SAR” prezentuje wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej Kandydata do stopnia naukowego doktora w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja oraz dowodzi posiadania przez Niego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Jej przedmiotem jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego obejmującego opracowanie nowatorskiego algorytmu projekcji wstecznej wykorzystującego współrzędne barycentryczne. Tym samym recenzowana praca spełnia wszystkie wymagania opisane w art. 187 Ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym”.

Biorąc pod uwagę oryginalność wyników, wysoką pozycję rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową, jej poziom merytoryczny i techniczny, a także użyteczność zaprezentowanych rozwiązań, rozprawę doktorską mgr. inż. Krzysztofa Radeckiego zaliczam do kategorii **spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem** i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.



.....  
/podpis/



## **KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: **Szybki algorytm projekcji wstecznej oparty na współrzędnych barycentrycznych do zastosowań w aktywnych i pasywnych zobrazeniach radarowych SAR**

Autor rozprawy: **mgr inż. Krzysztof RADECKI**

### **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. Krzysztofa Radeckiego dotyczy techniki otrzymywania zobrażeń dla radaru z syntetyczną aperturą SAR (ang. *Synthetic Aperture Radar*) w czasie rzeczywistym przy wykorzystaniu opracowanego przez Autora nowatorskiego algorytmu propagacji wstecznej BPA (ang. *Back Projection Algorithm*) wykorzystującego współrzędne barycentryczne.

Praca składa się z wprowadzenia (w którym przedstawiony został cel, teza pracy i wkład własny Autora dysertacji) oraz czterech kolejnych rozdziałów wraz z podsumowaniem, w których opisana została akwizycja danych radarowych SAR, algorytmy przetwarzania (SAR zognioskowany oraz niezognioskowany), analiza nakładu obliczeniowego uzyskiwanych zobrażeń dla radaru pasywnego PSAR (ang. *Passive SAR*) oraz techniki propagacji wstecznej BPA, porównując tym samym nakłady obliczeniowe ww. algorytmów.

Dysertabilną częścią rozprawy jest czwarty rozdział pracy dotyczący algorytmu propagacji wstecznej wykorzystującego współrzędne barycentryczne oraz badania na sygnałach rzeczywistych, jakie Doktorant przeprowadził.

Autor sformułował explicite jedną tezę, której poświęcił odpowiednio trzeci, czwarty i piąty rozdział pracy, w następującym brzmieniu: „*Dzięki zastosowaniu zaproponowanego w rozprawie szybkiego algorytmu projekcji wstecznej BPA, opartego na barycentrycznym modelu wyznaczania współrzędnych między obrazowanymi obiektami a nośnikiem radaru SAR oraz wykorzystaniu współczesnych urządzeń dedykowanych do obliczeń równoległych, możliwa jest implementacja techniki BPA w aktywnych i pasywnych systemach radarowych SAR działających w czasie rzeczywistym*”.

Sformułowanie powyższej tezy jest logiczne i racjonalne, szczególnie biorąc pod uwagę fakt, iż w obecnym czasie poszukuje się efektywnych rozwiązań w szeroko pojętych obszarach przetwarzania danych, co daje możliwość adaptacji „lżejszych” platform obliczeniowych.

Opiniowana rozprawa doktorska ma charakter praktyczny, o czym świadczy konkretne wykorzystanie opracowanego szybkiego algorytmu projekcji wstecznej opartego na współrzędnych barycentrycznych przy użyciu symulatora surowych danych radarowych SAR/InSAR (opracowanego przez zespół z Politechniki Warszawskiej w badaniach symulacyjnych) oraz w badaniach z wykorzystaniem sygnałów rzeczywistych rejestrowanych za pomocą radaru aktywnego (na częstotliwości 35 GHz) i radaru pasywnego rejestrującego sygnał naziemnej telewizji cyfrowej DVB-T. W ww. badaniach sygnałów rzeczywistych w pierwszym przypadku nośnikiem radaru był samolot Wilga PZL-104, natomiast w drugim przypadku (dla radaru pasywnego) system był instalowany na samolocie Cessna, w czasie ćwiczeń NATO APART-GAS 2019. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż zarówno w pierwszej jak i w drugiej adaptacji platformy, Doktorant brał czynny udział i miał znaczący wkład w integracji tych systemów na wskazanych powyżej platformach lotniczych.



**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 120 pozycji, w tym artykuły i książki, które w mojej ocenie 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, formułując cel i tezę pracy oraz dwóch kolejnych rozdziałach, Autor powołując się na literaturę przedstawił algorytmy przetwarzania danych pomiarowych na potrzeby systemów radarowych SAR (niezogniskowany oparty na filtracji dolnoprzepustowej, zogniskowany oparty na filtracji dopasowanej, technikę projekcji wstecznej) oraz uwypuklił problem przetwarzania obrazów SAR w czasie rzeczywistym. Szczególnie należy zauważyć gruntowną i bardzo wnikliwą analizę literatury światowej w podrozdziale 3.3., w którym wskazano został nakład obliczeniowy algorytmu BPA oraz modyfikacje tego algorytmu w celu minimalizacji złożoności obliczeniowej. Autor, nie tylko wskazał niedostatki analizowanych algorytmów (np. implementacja algorytmu factorized BPA opracowanego przez K. Moona i D. Longa wykazała gorszą rozróżnialność obrazowania w porównaniu z rozwiązaniem uzyskanym za pomocą klasycznego algorytmu projekcji wstecznej) ale i słusznie wywiódł z tego potrzebę opracowania nowatorskiego algorytmu wykorzystującego współrzędne barycentryczne, w celu zmniejszenia liczby wykonywanych operacji matematycznych podczas uzyskiwania obrazowania SAR.

Przedstawione przez Autora uzasadnienie kontynuacji badań (Rozdział 4) uważam za uzasadnione i przekonujące oraz wynikające z poprawnej oceny stanu wiedzy fachowej w przedmiotowym obszarze, w tym także istotnych osiągnięć badaczy polskich.

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

Algorytm propagacji wstecznej wykorzystujący współrzędne barycentryczne został dokładnie przedstawiony w Rozdziale 4 dysertacji. Głównym założeniem było zmniejszenie liczby operacji arytmetycznych w procesie uzyskiwania obrazowania SAR przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej dokładności względem algorytmu klasycznego BPA. Głównym założeniem przyjętym przez Doktoranta było stwierdzenie, że punkty znajdujące się poza obszarem oświetlanym przez antenę radaru nie podlegają rekonstrukcji, przez co nie są one rejestrowane jako sygnały użyteczne. Sam mechanizm, który umożliwia podjęcie decyzji, czy dany rekonstruowany punkt znajduje się wewnątrz wiązki antenowej (czy też poza nią) został opracowany przy wykorzystaniu współrzędnych barycentrycznych. 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 i w pełni rozwiązane przy użyciu właściwych narzędzi matematycznych oraz z powodzeniem zaimplementowane w postaci biblioteki MEX środowiska Matlab w język C/C++ z wykorzystaniem narzędzi CUDA. Należy zauważyć również fakt, iż została wykonana implementacja zrównoleglona (dla klasycznego algorytmu BPA jak i algorytmu wykorzystującego technikę współrzędnych barycentrycznych), w której każdy punkt obrazowania był przetwarzany niezależnie od pozostałych, a wyznaczone czasy przetwarzania opracowanego algorytmu wykorzystującego współrzędne barycentryczne (podrozdział 4.3, Tabele 4.1÷4.3) można uznać jako akcelerację zrównoleglonego algorytmu BPA.

**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 mojej opinii, poczynione przez Autora analizy w przedmiotowej dysertacji jak i w samodzielnych i współautorskich publikacjach można uznać za w pełni oryginalne. Zaproponowanie i opracowanie nowatorskiej metody projekcji wstecznej wykorzystującej współrzędne barycentryczne, przeprowadzenie analizy złożoności obliczeniowej algorytmów SAR, weryfikacja opracowanego algorytmu zarówno w badaniach symulowanych jak i w „rzeczywistym poligonie pomiarowym”



jednoznacznie świadczy o istotnym wkładzie własnym Autora pracy i znacząco poszerza wiedzę w zakresie wybranych zagadnień technik zobrazowań SAR.

Na wysoką ocenę zasługują również publikacje naukowe w czasopismach indeksowanych z listy JCR, których Doktorant jest współautorem. Szczególnie należy wymienić dwie publikacje, tj.: *Passive SAR Imaging using DVB-T Illumination for Airborne Applications* (czasopismo Radar, Sonar and Navigation) oraz *Fast Barycentric-Based Back Projection Algorithm for SAR Imaging* (czasopismo IEEE Sensors Journal). Pan mgr inż. Krzysztof Radecki w przypadku tej drugiej publikacji jest pierwszym autorem, więc zakładam, że wiodącym.

Pozytywnie oceniam także zastosowania techniczne uzyskanych przez Doktoranta wyników do przetwarzania obrazów SAR. Mając na myśli technologie jakie towarzyszą Walce Elektronicznej EW (ang. *Electronic Warfare*) oraz szeroko pojętemu zagadnieniu akwizycji, przetwarzania i rozpoznawania sygnałów w obszarach IMINT/ELINT/SIGINT osiągnięte przez Autora wyniki mogą zostać wykorzystane praktycznie.

#### **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 132 stron i jest napisana w sposób ścisły i zwięzły. Układ pracy, kolejność i kompletność poszczególnych rozdziałów uważam 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 moich zastrzeżeń, natomiast omówienie badań przeprowadzonych przez Autora jest na tyle klarowne i wyczerpujące, że pozwala na ich pełną ocenę przez recenzenta.

W odniesieniu do zasad polskiego zwyczaju zapisu oznaczeń matematycznych i fizycznych, należy wskazać pewną liczbę błędów, jakie znajdują się w rozprawie. Wprawdzie nie umniejszają one wartości merytorycznej pracy i przeważnie nie przeszkadzają w odbiorze treści, niemniej jednak jestem w obowiązku zwrócić na nie uwagę:

- a) brak jednoznaczności w stosowaniu prefiksu wyrażającego wielokrotność/podwielokrotność jednostek miar opartych o system metryczny, np.  $f_{PRF} = 1\text{kHz}$  (str. 13), a dalej  $f_{PRF} = 2\text{KHz}$  (str. 63);
- b) 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 zapisy dotyczące wartości liczbowych w aspekcie literowych oznaczeń miary, np. 1kHz, 1GHz, 5s, itp.
- c) Rys. 5.17. (str. 100) – brak opisu osi na tym rysunku.

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

Praca nie posiada zasadniczych wad, które znacząco obniżyłyby jej wartość. Niemniej jednak, pragnę zwrócić uwagę na kilka istotnych faktów, jakie nasunęły mi się w trakcie jej recenzowania, tj.:

- a) w pkt. 1.1. (str. 15) Autor pisze o systemach SAR na potrzeby urządzeń pracujących w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem mobilnych platform dedykowanych obliczeniom równoległym i wspierających architekturę CUDA (ang. *Compute Unified Device Architecture*). Również w Rozdziale 5, (str. 89) Autor pisze, iż implementacja algorytmów została wykonana w postaci biblioteki MEX środowiska Matlab napisanej w języku C/C++ z wykorzystaniem narzędzi CUDA, a środowiskiem uruchomieniowym był Laptop Lenovo E540 wyposażony w kartę graficzną GT 740M. Opis tego środowiska uruchomieniowego został rozszerzony w postaci bardziej szczegółowego opisu na str. 98 – domniemywam, iż chodzi o ten sam zestaw uruchomieniowy.  
Autor pracy w enigmatyczny sposób przeszedł z analizy matematycznej dotyczącej algorytmu projekcji wstecznej wykorzystującego współrzędne barycentryczne do badań symulacyjnych, w tym implementacji, nie tłumacząc dokładnie narzędzi CUDA jakie wykorzystał, biblioteki MEX środowiska Matlab, czy tzw. zrównoleglenia/przyspieszenia obliczeń.
- b) Doktorant w Rozdziale 2 przedstawił analizę nakładu obliczeniowego uzyskiwanych zobrazowań dla SAR niezogniskowany, SAR zogniskowany oraz pasywnego SAR.



Analogicznie w Rozdziale 3 dokonał analizy nakładu obliczeniowego BPA/factorized. W gruncie rzeczy, Autor wyznacza tzw. „model kosztów” proponowanego rozwiązania BPA, optymalizując opracowany algorytm w funkcji celu jaką jest akceleracja działania tego algorytmu na konkretnej platformie sprzętowej. W pierwszym akapicie podrozdziału 2.3 (str. 33) podaje On warunki brzegowe dla ww. „modelu kosztów”.

W efekcie Doktorant uzyskuje wyniki czasów obrazowania sceny symulacyjnej (Tabela 5.1) oraz opisy uzyskanych wartości czasów na stronach 103÷111 w podrozdziale 5.2. nie tłumacząc metodyki jaka posłużyła do wyznaczenia wartości poszczególnych czasów działania algorytmów. Oczywiście można się domyślać sposobu wyznaczenia ww. wartości czasu, niemniej jednak metoda badawcza również i w tym przypadku powinna zostać opisana.

- c) W podrozdziale 5.1.1. (str. 90) zostało napisane, iż w symulacji dla jednego punktu odbijającego zostało wykorzystane działanie anteny dookólnej. Uważam, iż należałoby wskazać, jaki typ/parametry anteny dookólnej został wykorzystany w tym badaniu. Analogiczna sytuacja ma miejsce w podrozdziale 5.1.2. Scena zawierająca wiele punktów odbijających (str. 95).

## 7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Jak już wspomniałem we wcześniejszych fragmentach recenzji, rozprawa wnosi istotny wkład w zakresie technik uzyskiwania zobrazowań dla radaru z syntetyczną aperturą. Z całą pewnością można wskazać dwa obszary użyteczności rozprawy, tj.: nauki techniczne (zawartość koncepcyjna pracy poszerza zbiór algorytmów wykorzystywanych w aktywnych i pasywnych systemach radarowych SAR działających w czasie rzeczywistym) oraz obronność kraju (ze względu na specyfikę technik radarowych SAR istnieje możliwość wykorzystania w obszarze rozpoznania obrazowego i walki elektronicznej EW).

## 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. Krzysztofa Radeckiego, stwierdzam, że praca jest **wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie** i spełnia wymagania art. 13 .1 Ustawy o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach 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. Krzysztofa Radeckiego do jej obrony publicznej.

Skierniewice, 08 listopada 2020 r.

  
.....  
Janusz Dudczyk