RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

zaprasza na

PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Jędrzeja Jakuba Drozdowicza,

która odbędzie się w dniu **13 listopada 2023 roku,** o godzinie **13:00** w trybie stacjonarnym

Temat rozprawy:

„Single Channel 3D Synthetic Aperture Radar with Platform Trajectory Tuning"

Promotor: dr hab. inż. Piotr Samczyński, prof. uczelni – Politechnika Warszawska

Recenzenci: dr hab. inż. Piotr Kaniewski, prof. Wojskowej Akademii Technicznej

dr hab. inż. Ewa Świercz, prof. Politechniki Białostockiej

Obrona odbędzie się w Sali nr 229 Gmachu Elektroniki Politechniki Warszawskiej.

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

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej:

https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-do-30-kwietnia-2019-r/Dyscyplina-informatyka-techniczna-i-telekomunikacja-dziedzina-nauk-inzynieryjno-technicznych/mgr-inz.-Jedrzej-Jakub-Drozdowicz

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

Streszczenie

Radarowe systemy obrazujące są wykorzystywane w wielu dziedzinach, między innymi przemyśle, nauce oraz obronności. Radary stają się coraz mniejsze i tańsze, zyskując przy tym nowe pasma i możliwości. Miniaturyzacja radarów w połączeniu z rosnącą popularnością bezzałogowych platform latających otwiera nowy obszar badań nad miniaturowymi systemami radarowymi z syntetyczą aperturą na platformach latających.

Obecnie stosowane systemy radarowe z syntetyczną aperturą pozwalają uzyskiwać przede wszystkim zobrazowania dwuwymiarowe. Uzyskanie zobrazowania trójwymiarowego wymaga zastosowania co najmniej dwóch kanałów odbiorczych lub co najmniej dwóch równoległych przelotów. Pierwsze rozwiązanie jest trudne do zastosowania na niewielkiej platformie latającej ze względu na konieczność uzyskania odległości między antenami większej, niż wymiary platformy, natomiast rozwiązanie drugie zwiększa czas sondowania.

Niniejsza rozprawa opisuje metodę uzyskiwania trójwymiarowych zobrazowań radarowych z syntetyczną aperturą, z wykorzystaniem dostrajanej, nieprostoliniowej trajektorii platformy radaru. Najważniejszym elementem przedstawionej metody jest algorytm wyznaczania trajektorii uwzględniający model ruchu platformy radaru, dzięki któremu możliwe jest uzyskiwanie zobrazowań o zadanej jakości szybciej niż z wykorzystaniem trajektorii prostoliniowej. Zastosowano powszechnie stosowany w wielowirnikowcach i płatowcach model ruchu o ograniczonym zrywie oraz model planowania trasy oparty o punkty kontrolne. Prezentowana metoda pozwala na określenie trzech parametrów jakości zobrazowania – rozdzielczości, współczynnika scałkowanych listków bocznych oraz współczynnika szczytowego listka bocznego. Pozwala również przyporządkować tym parametrom wagi w celu ich priorytetyzacji. Aby poprawić jakość uzyskiwanych zobrazowań stosowane jest dostrajanie trajektorii wykorzystujące minimalizację funkcji kosztu.

Prezentowana metoda może znaleźć zastosowanie tam, gdzie istotnym czynnikiem jest czas pomiaru, czyli przede wszystkim w przemyśle i obronności. Dzięki niej możliwe jest także dodanie możliwości obrazowania trójwymiarowego istniejącym systemom radarowym.

Słowa kluczowe: *radar, radar z syntetyczną aperturą, obrazowanie, bezzałogowy statek powietrzny, modelowanie ruchu*

dr hab. inż. Piotr Kaniewski, prof. WAT
Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

Warszawa, 20.06.2023 r.

Rada Naukowa Dyscypliny
INFORMATYKA TECHNICZNA
I TELEKOMUNIKACJA
Sekretariat
Data wpływu 26.06.2023 r.
Numer.....

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

Tytuł rozprawy: Single Channel 3D Synthetic Aperture Radar with Platform Trajectory Tuning

Autor rozprawy: mgr inż. Jędrzej Drozdowicz

1. Podstawowe dane o kandydacie

a) data uzyskania tytułu magistra oraz nazwa jednostki organizacyjnej, w której tytuł ten był nadany

Kandydat uzyskał tytuł magistra w dniu 28 stycznia 2015 roku na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej.

b) informacja czy kandydat ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora, w tym – o ile wynika to z dokumentacji sprawy – informacja o przebiegu i zakończeniu wcześniejszego postępowania

Kandydat nie ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora.

c) przebieg pracy naukowo-zawodowej (miejsce pracy, zajmowane stanowiska)

Przebieg pracy naukowo-zawodowej Kandydata przedstawia się następująco:

- październik 2010 - grudzień 2010: Instytut Tele- i Radiotechniczny, stażysta
- październik 2011 - marzec 2014: Robotics Inventions, inżynier elektronik/programista
- kwiecień 2014 - lipiec 2016: Politechnika Warszawska - Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, inżynier
- sierpień 2016 - kwiecień 2021: Politechnika Warszawska - Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, kierownik projektu/główny badacz
- listopad 2018 - czerwiec 2022: Politechnika Warszawska - Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, asystent
- październik 2019 - marzec 2020: CNIT - Radar and Surveillance Systems Laboratory (Piza, Włochy), badacz wizytujący
- czerwiec 2022 - obecnie: GTS - Strike Technologies, inżynier FPGA

2. Informacje o ocenianej rozprawie

a) *tytuł rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę do ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora*

Tytuł rozprawy „Single Channel 3D Synthetic Aperture Radar with Platform Trajectory Tuning" został w mojej ocenie sformułowany prawidłowo. W pełni odpowiada on zawartości pracy i akcentuje jej najważniejsze aspekty.

b) *ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych*

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 118 stron i składa się z sześciu rozdziałów. Zawiera łącznie 93 rysunki i 8 tabel. Zasadnicze rozdziały pracy, zgodnie z powszechnie przyjętą konwencją, zostały poprzedzone informacją o finansowaniu prowadzonych przez Autora badań, podziękowaniami, streszczeniem, spisem treści oraz wykazem ważniejszych skrótów i oznaczeń, a na końcu rozprawy zamieszczono liczącą 93 pozycje bibliografię.

W rozdziale pierwszym znalazły się informacje zwyczajowo umieszczane na początku pracy, tzn. krótkie wprowadzenie, motywacje Autora do podjęcia badań w obszarze techniki obrazowania SAR 3D, sformułowanie problemu badawczego oraz celu i tez pracy, lista oryginalnych osiągnięć autora przedstawionych w rozprawie doktorskiej oraz informacje o układzie pracy.

Rozdział 2 zawiera podstawy teoretyczne wprowadzające do zagadnień poruszanych w dalszej części rozprawy. Znalazł się tu opis przyjętego w pracy układu współrzędnych, opis podstaw działania radaru i techniki SAR oraz InSAR, a także zagadnienia optymalizacyjnego, ważnego z punktu widzenia zaprezentowanej w pracy metody rozwiązania postawionego problemu. Dużo uwagi poświęcono przy tym omówieniu funkcji odpowiedzi systemu PSF (*Point Spread Function*), syntezie obrazu SAR oraz wpływowi rozmieszczenia punktów jednowymiarowej i dwuwymiarowej syntetycznej apertury na kształt funkcji PSF, a także omówieniu popularnych miar jakości zobrazowań SAR.

W rozdziale 3 Autor opisuje istniejące metody tworzenia zobrazowań SAR 3D, m.in. CSAR i MBSAR oraz opisywane w literaturze metody SAR 3D wykorzystujące pojedyncze, nieprostoliniowe trajektorie lotu nośnika radaru. Słusznie zauważa przy tym, że literatura dotycząca wykorzystania takich nieprostoliniowych trajektorii w obrazowaniu radarowym 3D jest skąpa, a prezentowane w przywołanych publikacjach rozwiązania posiadają szereg ułomności. Rozdział ten zawiera ponadto istotną część przedstawionego w pracy przeglądu literatury z zakresu rozprawy.

W rozdziale 4 Autor opisał własną, nowatorską metodę syntezy trójwymiarowych zobrazowań radarowych z syntetyczną aperturą podczas ruchu platformy wzdłuż trajektorii nieprostoliniowej, której kształt jest wyznaczany w wyniku optymalizacji funkcji celu, minimalizującej długotrwałość lotu i jednocześnie maksymalizującej parametry jakościowe uzyskiwanych zobrazowań SAR 3D (rozdzielczość poziomą i pionową oraz współczynniki PSLR i ISLR).

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, oceniających zaproponowaną metodę i porównujących ją z metodą MBSAR, oraz wyniki eksperymentu wykonanego z wykorzystaniem uproszczonego modelu fizycznego, odzwierciedlającego wybrane funkcjonalności rozważanego w rozprawie systemu obrazującego SAR 3D.

W rozdziale 6 zawarto podsumowanie rozprawy oraz wskazanie przewidywanych dalszych kierunków prac w jej obszarze tematycznym.

Poszczególne rozdziały merytoryczne mają prawidłowy układ treści, w którym we właściwej kolejności Autor opisuje rozważane zagadnienia i problemy, a następnie zastosowane narzędzia analityczne i uzyskane wyniki oraz wypływające z nich wnioski. Zachowana jest ciągłość wywodu. Nie występują istotne przeskoki i skróty myślowe. Prezentowane treści są poparte licznymi wzorami i rysunkami ułatwiającymi zrozumienie materiału. Układ pracy należy uznać za prawidłowy, właściwy dla rozprawy doktorskiej.

c) *ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej*

W pracy zamieszczono bibliografię liczącą 93 pozycje literaturowe, odnoszące 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 zobrazowań SAR 2D i 3D, zagadnień związanych z optymalizacją oraz publikacje dotyczące opisu dynamiki i modelowania ruchu wielowirnikowych BSP.

Zakres czasowy cytowanych publikacji obejmuje zasadniczo okres od lat 80-tych XX wieku do 2022 roku, ze zdecydowaną przewagą publikacji najnowszych, opublikowanych po 2000 roku. Cytowane są również pojedyncze, klasyczne artykuły z lat 50-tych, 60-tych i 70-tych. Cytowane publikacje pochodzą przede wszystkim z cenionych, wysoko punktowanych czasopism, takich jak IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Access, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, IET Radar, Sonar and Navigation, MDPI Electronics, MDPI Sensors, MDPI Remote Sensing oraz z uznanych konferencji międzynarodowych i krajowych, dotyczących głównie tematyki teledetekcyjnej, a w szczególności radarowej. W wykazie są też obecne pojedyncze klasyczne publikacje książkowe i prace doktorskie.

Warto zwrócić uwagę, że w bibliografii znajduje się aż 10 pozycji, których autorem lub współautorem jest Doktorant, w tym między innymi 3 artykuły opublikowane w uznanych czasopismach IET Radar, Sonar and Navigation (2019), IEEE Access (2021) i MDPI Sensors (2022). Dwie ostatnie z wymienionych publikacji są ściśle powiązane z tematyką rozprawy doktorskiej. Co szczególnie istotne, publikacja w czasopiśmie Sensors z 2022 roku, zatytułowana „Drone-Based 3D Synthetic Aperture Radar Imaging with Trajectory Optimization", której Doktorant jest pierwszym autorem, a współautorem jest Promotor rozprawy, prezentuje szkic metody oraz wyniki badań symulacyjnych, które w rozszerzonej postaci opisano w recenzowanej rozprawie doktorskiej. Zarówno sama metoda, jak i sposób jej badania, zostały już zatem poddane ocenie recenzentów

oraz edytorów wymienionego czasopisma i jak wskazuje fakt akceptacji artykułu, spotkały się z ich uznaniem.

Podsumowując, przeprowadzona analiza literatury dobrze odzwierciedla stan wiedzy światowej w dziedzinie rozprawy. Dyskusja zawartości poszczególnych źródeł jest również prawidłowa i zawiera zarówno opis rozwiązań proponowanych przez innych autorów, jak i ich krytyczną analizę oraz prezentowane na ich tle własne, oryginalne propozycje rozwiązań. Zarówno liczbę cytowanych publikacji, ich wybór i sposób analizy przez Autora należy zatem uznać za właściwe.

d) *wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata*

W przedstawionej do recenzowania rozprawie Autor postawił sobie za cel opracowanie nowej metody otrzymywania zobrazowań SAR 3D z wykorzystaniem jednokanałowego radaru zainstalowanego na wielowirnikowej platformie latającej wykonującej pojedynczy przelot wzdłuż odpowiednio skonstruowanej trajektorii nieprostoliniowej, określonej w kategoriach uporządkowanego zbioru punktów zmiany trasy (punktów kontrolnych). Cel ten został w jasny sposób sformułowany w pierwszym rozdziale pracy.

Wieloetapowa metoda i algorytm konstruowania takiej trajektorii, zmierzające do uzyskania założonych parametrów jakościowych trójwymiarowego zobrazowania SAR, dla założonego obszaru zainteresowania ROI (*Region of Interest*), przy możliwie krótkim, ale praktycznie realizowalnym z punktu widzenia możliwości manewrowych nośnika radaru, przelocie, stanowią najważniejsze, nowatorskie elementy rozwiązania zaprezentowanego przez Doktoranta.

Rozwiązania podobnego zagadnienia były już jak wspomniano w recenzji prezentowane w literaturze, jednak charakteryzują się one wieloma ograniczeniami, zatem dalsze prace w tym obszarze są bardzo istotne. Sprawia to, że cel pracy jest ważny zarówno z poznawczego, jak i praktycznego punktu widzenia.

e) *wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych*

Opisana w pracy metoda obrazowania radarowego jest wieloetapowa. Na wstępie definiowany jest scenariusz pomiarowy, w którym określane są rozmiary obserwowanego obszaru, parametry radaru, szerokość charakterystyki antenowej w dwóch płaszczyznach, parametry dynamiczne platformy latającej oraz oczekiwane parametry jakościowe zobrazowania (rozdzielczość pozioma i pionowa, współczynnik maksymalnego listka bocznego PSLR i współczynnik sumarycznych listków bocznych ISLR).

Autor przyjmuje, że ruch nośnika radaru odbywa się w obu osiach płaszczyzny prostopadłej do odcinka łączącego jej środek z ROI, a następnie bazując na przyjętym scenariuszu i znanych relacjach geometrycznych wyznacza wymaganą odległość syntetycznej apertury do ROI i wymiary płaszczyzny zawierającej tę aperturę, zapewniające uzyskanie właściwego zakresu obserwacji i oczekiwanych rozdzielczości.

Następnie na wyznaczonej powierzchni Doktorant wyznacza punkty kontrolne, które mają zostać kolejno osiągnięte przez platformę. Punkty te są przez platformę osiągane jedynie w przybliżeniu (zależnie od przyjętego tzw. promienia akceptacji), w wyniku realizacji przelotu zgodnie z przedstawionym w rozdziale 4.7.2 algorytmem uwzględniającym możliwości dynamiczne wielowirnikowego BSP. Uwzględnienie

możliwości manewrowych BSP (jego maksymalnego zrywu, przyspieszenia i prędkości w różnych kierunkach) oraz definiowanie trajektorii w kategoriach zbioru punktów zmiany trasy jest podejściem bardzo praktycznym, umożliwiającym bezpośrednie wykorzystanie wyznaczanych trajektorii w sterownikach BSP. Zagadnienie to jest pomijane w propozycjach literaturowych przez co prezentowane w nich kształty trajektorii mogą być w praktyce nierealizowalne lub wymagać użycia bardzo specyficznych platform latających.

W proponowanej przez Autora metodzie stosowane jest podejście polegające na wyznaczeniu trajektorii wstępnej, a następnie na jej iteracyjnym „dostrajaniu" poprzez modyfikowanie początkowego rozmieszczenia punktów zmiany trasy. Doktorant stosuje w tym celu metodę optymalizacji Neldera-Meada, dzięki której iteracyjnie zmieniane są współrzędne punktów kontrolnych w dążeniu do minimalizacji funkcji kosztu, przy czym funkcję kosztu w rozprawie zdefiniowano jako sumę ważoną pięciu cząstkowych funkcji kosztu odnoszących się do poszczególnych parametrów jakościowych zobrazowania SAR oraz do długotrwałości lotu BSP.

Przyjęta metoda optymalizacji jest adekwatna do rozwiązywanego zagadnienia, a swoboda doboru współczynników wagowych funkcji kosztu umożliwia dobór trajektorii lotu zależnej od wymagań misji, dając użytkownikowi opisywanego systemu SAR 3D elastyczność w zakresie decydowania w jakim stopniu istotne są w danej aplikacji parametry jakościowe zobrazowań, a w jakim stopniu czas trwania lotu.

W mojej ocenie zaproponowana przez Doktoranta metoda rozwiązania sformułowanego w pracy problemu oraz realizujące jej fragmenty algorytmy oraz narzędzia matematyczne stosowane w tej metodzie są prawidłowo dobrane i właściwie użyte.

f) ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Opisaną w rozprawie metodę obrazowania SAR 3D zbadano zarówno metodą symulacji komputerowej, jak i przeprowadzając eksperyment z wykorzystaniem uproszczonego modelu fizycznego systemu SAR 3D. Zakres badań symulacyjnych obejmował przyjęcie scenariusza opisującego wymiary ROI i jego odległość od radaru, parametry radaru, parametry modelu dynamiki platformy i oczekiwane rozdzielczości zobrazowania SAR 3D. Następnie wyznaczono wymiary syntetycznej apertury i liczbę punktów kontrolnych oraz niezbędne w procesie optymalizacji zakresy i wagi optymalizowanych parametrów w funkcji kosztu. Proces strojenia był przeprowadzany wielokrotnie (we wszystkich symulacjach 10-krotnie), dla różnych początkowych położeń punktów kontrolnych.

Wyniki badań symulacyjnych zebrane w rozdziale 5.1 zostały zobrazowane w czytelny sposób. Graficznie przedstawiono przebiegi funkcji kosztu w kolejnych iteracjach dla różnych początkowych położeń punktów zmiany trasy, zaś wartości parametrów jakościowych (rozdzielczości, PSLR, ISLR) oraz funkcji kosztu na początku i na końcu procesu optymalizacji zestawiono w tabelach. Badania przeprowadzono dla różnych parametrów funkcji kosztu i metody optymalizacji, modyfikując wartości graniczne współczynników PSLR i ISLR oraz parametry T_p i T_c określające warunki zakończenia procesu optymalizacji.

Dla wybranych przypadków rozmieszczenia punktów kontrolnych, dla których dla różnych ustawień w procesie optymalizacji uzyskiwano ostatecznie najmniejszą wartość funkcji kosztu, zobrazowano dodatkowo kształty początkowych i końcowych trajektorii (na początku i końcu jej „dostrajania") oraz odpowiadające im przekroje funkcji PSF.

Zakres wykonanych badań jest zatem dość szeroki, a przedstawione wyniki zostały opisane w tekście pracy i w większość przypadków zawierają wypływające z tych badań wnioski. Przedstawione wyniki wskazują na potencjalnie znaczną użyteczność metody zaprezentowanej w pracy. Potwierdzają to również wyniki porównania metody będącej przedmiotem rozprawy z metodą MBSAR, przedstawione w rozdziale 5.2.

Pewną wadą zaprezentowanych badań symulacyjnych jest ich ograniczenie do pojedynczego scenariusza, co zmniejsza uniwersalność wypływających z nich wniosków. Doktorant wykonywał w tym scenariuszu 10 eksperymentów dla różnych warunków początkowych, określających początkowe rozmieszczenie punktów kontrolnych, w każdym przypadku uzyskując inne wartości początkowej funkcji kosztu. Podczas optymalizacji wartość funkcji kosztu w każdym przypadku malała, jednak na wyniku końcowym bardzo silnie ważyła jej wartość początkowa.

W przypadku rozważanego scenariusza (szczególnie przy rozszerzonych wartościach granicznych PSLR i ISLR w funkcji kosztu) widoczne jest, że dla większości z 10 eksperymentów wartości końcowe funkcji kosztu są zbliżone i intuicyjnie można przyjąć, że wybranie najlepszego przypadku z jedynie 10 eksperymentów jest podejściem wystarczającym, chociaż nie zostało to w pracy ściśle uzasadnione. Nie wiadomo jednak, czy w innych scenariuszach przebiegi funkcji kosztu zachowywałyby się podobnie, a w konsekwencji czy liczba 10 eksperymentów byłaby wówczas wystarczająca, czy też jej zwiększenie pozwoliłoby na uzyskanie trajektorii, dla których funkcja kosztu byłaby wyraźnie niższa. Przeprowadzenie symulacji dla większej liczby scenariuszy zwiększyłoby pewność co do przyjętego rozwiązania.

Należy ponadto zauważyć, że zarówno liczba eksperymentów, jak i granice parametrów jakościowych (tabele 5.2 i 5.4) są przez Autora dobierane arbitralnie i wskazane byłoby przeprowadzenie w przyszłości badań dających ściślejsze wskazówki co do ich doboru.

Wadą prezentowanych w pracy wyników jest również brak wyszczególnienia w tabelach 5.3, 5.5 i 5.6 czasu przelotu, który był obok parametrów jakościowych zobrazowań jednym z najważniejszych optymalizowanych parametrów, a także brak komentarza i wniosków do badania opisanego w rozdziale 5.1.4, dotyczącego wpływu parametrów T_p i T_c na przebieg zależności funkcji kosztu od liczby iteracji.

Jakkolwiek należy docenić próbę eksperymentalnego zweryfikowania zaproponowanej w rozprawie metody syntezy zobrazowań radarowych SAR 3D, konstrukcja stanowiska badawczego, parametry radaru (istotnie różniące się od przyjętych podczas symulacji) oraz brak możliwości wymuszeniu ruchu anten radarowych wzdłuż rozważanej w rozprawie trajektorii nieprostoliniowej sprawiają, że uzyskane podczas eksperymentu wyniki wskazują jedynie na możliwość uzyskiwania zobrazowań SAR 3D podczas ruchu nośnika wzdłuż takiej trajektorii, jednak nie pozwalają na ich odniesienie do wyników badań symulacyjnych i ocenę parametrów systemu obrazującego.

Pomimo wyżej przedstawionych zastrzeżeń dotyczących badań symulacyjnych oraz eksperymentu z fizycznym modelem urządzenia uważam, że przedstawione w rozprawie wyniki badań jednoznacznie wskazują na prawidłowość przyjętej koncepcji dotyczącej metody obrazowania SAR 3D i jej potencjalnie wysoką przydatność w praktyce.

g) *informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań*

Synteza zobrazowań SAR 3D wymaga zastosowania technik interferometrycznych, w których typowo wykonywane są pojedyncze przeloty platformy wyposażonej w wielokanałowy system radarowy lub wielokrotne przeloty platformy wyposażonej w system jednokanałowy, po oddalonych od siebie (często równoległych) trajektoriach.

Oba wymienione rozwiązania są kłopotliwe lub wręcz niemożliwe do zastosowania w przypadku coraz powszechniej konstruowanych systemów radarowych instalowanych na niewielkich wielowirnikowych platformach latających. Systemy wielokanałowe są w takim przypadku problematyczne ze względu na wymaganą separację odległościową anten oraz ograniczenia w odniesienia do masy i poboru energii z pokładowego źródła zasilania, natomiast wielokrotne przeloty wydłużają czas misji i również zwiększają pobór energii. W wielu aplikacjach wydłużenie czasu przelotu BSP jest ponadto nieakceptowalne ze względów operacyjnych. Przykładowo w wojskowych systemach obrazujących, wykorzystywanych w warunkach bojowych, długotrwałość misji wydłuża czas do uzyskania danych rozpoznawczych i zwiększa prawdopodobieństwo wykrycia oraz zniszczenia platformy przez przeciwnika.

W związku z tym podejmowane są próby wykonywania trójwymiarowych zobrazowań SAR z wykorzystaniem systemów jednokanałowych przy zastosowaniu pojedynczego przelotu nośnika radaru wzdłuż nieprostoliniowej trajektorii lotu. Zagadnienie naukowe podjęte w pracy wpisuje się w ten ważny obszar badań i dzięki potencjalnym korzyściom, polegającym na skróceniu czasu misji przy zachowaniu wysokiej jakości uzyskiwanych zobrazowań, ma istotny wymiar praktyczny.

h) *informacja o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej*

Rozprawa prezentuje wysoki poziom merytoryczny i została starannie przygotowana, tym niemniej po zapoznaniu się z nią nasuwają się również pewne uwagi krytyczne:

- Doktorant na str. 19 sformułował dwie tezy. O ile druga teza jest istotna, zrozumiała i jednoznacznie wskazuje na omawianą w pracy metodę oraz cel jej stosowania, pierwsza teza, mówiąca, że możliwe jest otrzymywanie trójwymiarowych zobrazowań radarowych z wykorzystaniem jednokanałowego radaru przy nieprostoliniowej trajektorii lotu platformy wydaje się zbyt oczywista, a przykłady jej dowodzące znajdują się w publikacjach omówionych przez Autora w analizie literatury. W podsumowaniu pracy, w rozdziale 6, Doktorant sam stwierdza, że teza ta została potwierdzona w wyniku analizy stanu wiedzy w dziedzinie rozprawy i w wyniku przeprowadzonych eksperymentów. Teza ta wydaje się zatem nadmiarowa i w rozprawie wystarczające byłoby moim zdaniem przedstawienie tylko drugiej tezy.

- W pracy występują drobne błędy w niektórych wzorach. We wzorze 2.8 występuje współczynnik „2π" zamiast „4π", natomiast we wzorach 4.2 i 4.3 występują funkcje tangens, podczas gdy powinny być tam funkcje kotangens.
- Odległość pomiędzy powierzchnią syntetycznej apertury i ROI jest oznaczana niekonsekwentnie, symbolem 'R' w rozdziale 4.6.1, zaś symbolem 'r' w kolejnych rozdziałach i ponownie jako 'R' we wzorze 5.3 oraz symbolem 'r_0' w tabeli 5.1 i wzorze 5.4. Ponadto symbole 'r' i 'r_0' nie występują w wykazie oznaczeń na początku rozprawy.
- W opisie scenariusza badań pojawiają się pewne nieścisłości lub niedopowiedzenia. W tabeli 5.1 na str. 80 jako pionowy rozmiar ROI podano 5 m, a prawdopodobnie powinno to być 10 m, o czym wzmiankę można znaleźć dopiero na str. 95. Powoduje to m.in., że wynik wyznaczenia liczby punktów kontrolnych zgodnie ze wzorem 5.4 różni się od stosowanej w badaniach prawidłowej liczby N = 10.
- Na str. 87 rys. 5.6 został omyłkowo opisany jako „Figure 5.1.4".
- Na str. 101 tabela 5.7 została omyłkowo opisana jako „Table 5.3.4.1".

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

i) ocena czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Tematyka rozprawy wpisuje się w szeroki nurt prac naukowych oraz implementacyjnych dotyczących tworzenia trójwymiarowych zobrazowań SAR, prowadzonych w wielu ośrodkach badawczych na całym świecie. Różne metody tworzenia tego typu zobrazowań, m.in. omówione w rozprawie metody CSAR i MBSAR oraz metody wykorzystujące pojedyncze, nieprostoliniowe trajektorie lotu nośnika radaru, np. trajektorię z manewrem HAT, czy trajektorię sinusoidalną, są opisywane w dostępnej literaturze. Opisy metod obrazowania SAR 3D dla jednokanałowych systemów radarowych wykonujących pojedynczy przelot wzdłuż trajektorii nieprostoliniowej są jednak, jak już wspomniano, pod wieloma względami ułomne, a zatem dążenie do opracowania metody doskonalszej, czym zajmował się Doktorant w ramach swojej pracy, jest ze wszech miar uzasadnione.

Według wiedzy recenzenta, opisana w rozprawie metoda i algorytm konstruowania trajektorii pojedynczego przelotu platformy radarowej, umożliwiające uzyskiwanie założonych parametrów jakościowych trójwymiarowych zobrazowań SAR (nie tylko rozdzielczości, lecz również współczynników PSLR i ISLR), przy możliwie jak najkrótszym przelocie wielowirnikowego BSP będącego nośnikiem radaru, a przy tym uwzględniające realistyczny model dynamiki platformy (model ograniczonego zrywu) nie były dotychczas opisywane w literaturze innej niż publikacje własne Autora.

Wspomnianą metodę i algorytm uważam za szczególnie oryginalne elementy rozprawy, świadczące o dogłębnym zrozumieniu istoty problemu i zdolności Doktoranta do formułowania własnych, oryginalnych koncepcji rozwiązań problemów naukowych. Do samodzielnego i oryginalnego dorobku Doktoranta zaliczam również zamieszczone w pracy wyniki badań symulacyjnych i eksperymentów praktycznych.

j) ocena czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Jędrzeja Drozdowicza pt. „Single Channel 3D Synthetic Aperture Radar with Platform Trajectory Tuning" 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 nowej metody otrzymywania zobrazowań SAR 3D z wykorzystaniem jednokanałowego radaru zainstalowanego na wielowirnikowej platformie latającej wykonującej pojedynczy przelot wzdłuż trajektorii nieprostoliniowej. Recenzowana praca spełnia zatem wszystkie wymagania opisane w art. 187 Ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce".

3. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę oryginalność zaprezentowanych metod i wyników, wysoką pozycję rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową, jej poziom merytoryczny i techniczny, a także utylitarność zaprezentowanych rozwiązań, uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jędrzeja Drozdowicza **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim z wyraźnym nadmiarem** i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

.....

/podpis/

Białystok, 14 lipca 2023 r.

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

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORKIEJ DLA RADY DYSCYPLINY

Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej

Realizacja uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej z dnia 21 marca 2023 r. w sprawie wykonania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Jędrzeja Drozdowicza.

Tytuł rozprawy

Single Channel 3D Synthetic Aperture Radar with Platform Trajectory Tuning

Autor rozprawy:

Jędrzej Drozdowicz

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)?**

Mgr inż. Jędrzej Drozdowicz w rozprawie doktorskiej **Single Channel 3D Synthetic Aperture Radar with Platform Trajectory Tuning** rozpatrzył problem strojenia nieliniowej trajektorii poruszającej się platformy z nadajnikiem i odbiornikiem radarowym na potrzeby zobrazowań 3D SAR. Generalnie poruszany przez doktoranta temat jest rozszerzeniem możliwości klasycznej metody zobrazowania 2D SAR z prostoliniową aperturą 1D. Problemem jest wprowadzenie trzeciego wymiaru, który wymaga złożenia obserwacji obrazowanego obiektu pod różnymi kątami, a więc złożenia co najmniej dwóch odbić (odebranych w dwóch kanałach) na dwóch różnych wysokościach tzn. z dwóch różnych pionowych położeń anteny i obliczenia wysokości obiektu (wysokości interferometrycznej) z tych dwóch odbić na podstawie różnicy faz. Ten sam efekt można uzyskać w czasie przelotu czujnika radarowego z jednym kanałem odbiorczym na co najmniej dwóch różnych wysokościach. Zazwyczaj czujnik do obrazowania SAR jest umieszczany na ruchomej platformie, np. na bezzałogowym statku powietrznym (UAV), na samolocie lub na satelicie.

Klasyczna koncepcja wielobazowej interferometrii 3D SAR (MBSAR-multi-baseline SAR) zwana również tomografią SAR, bazująca na regularnie spróbkowanej w azymucie i elewacji trajektorii apertury 2D została w rozprawie doktorskiej twórczo zmodyfikowana poprzez wprowadzenie nieliniowej trajektorii ruchu czujnika radarowego umieszczonego na ruchomej platformie, co pozwoliło na uzyskanie zobrazowania 3D SAR o akceptowanej jakości ze znaczną redukcją danych do przetwarzania i w znacznie krótszym czasie niż przy tradycyjnym zobrazowaniu MBSAR, przy realizacji trajektorii w wielu przelotach platformy.

Dwie tezy naukowe zostały sformułowane w rozprawie doktorskiej następująco:

1. *"It is possible to obtain three-dimensional radar imaging of a region of interest using a single single-channel radar and a non-rectilinear trajectory of the radar platform"*. (Możliwe jest uzyskanie trójwymiarowego zobrazowania radarowego interesującego obszaru, przy użyciu pojedynczego jednokanałowego radaru i nieprostoliniowej trajektorii platformy radarowej).

2. *"It is possible to tune the trajectory of the radar platform to improve imaging quality or reduce sounding time, if the radar parameters, radar platform motion model, dimensions of the area of interest, and required imaging quality parameters are known"*. (Możliwe jest dostrojenie trajektorii platformy radarowej w celu poprawy jakości zobrazowania lub skrócenia czasu sondowania, jeśli parametry radaru, model ruchu platformy radarowej, wymiary obszaru zainteresowania i wymagane parametry jakości obrazowania są wstępnie ustalone).

Dwie tak postawione tezy rozprawy określiły kierunek badań teoretycznych i eksperymentalnych prowadzący do ich udowodnienia. Doktorant w tezach jasno formułuje swój problem badawczy, który dotyczy opracowania algorytmu wyznaczania trajektorii z uwzględnieniem modelu ruchu zapewniającego zakładaną dobrą jakość zobrazowania 3D wyszczególnionego obszaru obrazowania (ROI). Dobra jakość zobrazowania to nie tylko dobra rozdzielczość funkcji rozproszenie punktowego (PSF) określana parametrami σ_v i σ_H, ale również wytłumienie maksymalnego piku listka bocznego (PSLR) i sumarycznych listków bocznych (ISLR). Te wymagania, z odpowiednimi współczynnikami ważącymi, są składowymi funkcji kosztu, minimalizacja której pozwala na ustawienie punktów nawigacyjnych nieliniowej trajektorii w celu uzyskania dobrej jakości zobrazowania. Bardzo istotnym elementem algorytmu Doktoranta jest uwzględnienie dynamiki ruchu platformy w realizacji nieliniowej trajektorii. Doktorant przyjął nieliniowy model ruchu trzeciego rzędu, co jest rozsądnym założeniem dla platformy realizowanej przez typowe UAV. Ruch małego i zwrotnego bezzałogowego wielowirnikowca teoretycznie może zrealizować złożoną nieliniowość trajektorii, zapewniając obserwację wielokątową obiektu, a więc możliwość oceny pionowego wymiaru w zobrazowaniu 3D.

Udowodnienie tez rozprawy było zadaniem ambitnym, wymagającym zastosowania zaawansowanych algorytmów przetwarzania sygnałów, uzupełnionych o oryginalne, autorskie rozwiązania teoretyczne i symulacyjne. Zdaniem recenzenta, cele rozprawy i zadania badawcze zostały sformułowane poprawnie, a podjęta w pracy próba opracowania złożonego, wieloaspektowego algorytmu syntezy nieliniowej apertury 2D jest zadaniem naukowym odpowiadającym wymaganiom stawianym rozprawie doktorskiej.

Prezentowane w rozprawie podejście teoretyczne i eksperyment w środowisku rzeczywistym, z wykorzystaniem symulatora ruchu platformy radarowej zgodnie z zaprojektowaną trajektorią, nadają rozprawie charakter teoretyczno-doświadczalny.

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 przekonywujący?

Spis literatury zawiera 93 pozycje, w tym 10 pozycji, w których Doktorant jest autorem lub współautorem. Wszystkie zamieszczone pozycje stanowią właściwe tło naukowe

do poruszanej w rozprawie tematyki. Analiza przytoczonych pozycji literaturowych pokazuje, że Doktorant dokonał właściwego wyboru. Są to nie tylko klasyczne pozycje książkowe, głównie o tematyce radarowej, ale również pozycje z renomowanych czasopism zagranicznych i prestiżowych międzynarodowych konferencji. Lista zamieszczonych publikacji wskazuje na to, że dobór tych publikacji był przemyślany i wskazuje na wysoki poziom wiedzy specjalistycznej, z której doktorant umiejętnie korzystał.

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

Problem rozpatrywany w rozprawie doktorskiej jest złożony i wymaga wieloaspektowego spojrzenia na zobrazowanie 3D w radarach z syntetyczną aperturą. Zobrazowanie 2D SAR z liniową aperturą 1D w kierunku azymutalnym jest punktem wyjściowym do poszukiwań wprowadzenia dodatkowego wymiaru, pozwalającego na przestrzenne zobrazowanie obiektu. Ten dodatkowy wymiar Doktorant uzyskał wprowadzając wymiar pionowy, tworząc aperturę 2D realizowaną przez nieliniową trajektorię ruchu sensora radarowego. Dodatkowo realizację nieliniowej trajektorii Doktorant powiązał z możliwościami dynamiki ruchu platformy, właściwie zakładając jej ograniczenia (model dynamiki 3-go rzędu). W tym obszarze badawczym stanowi to oryginalne rozwiązanie zaproponowane przez Doktoranta. Realizacja planu badawczego przedstawionego w tezach jest pozytywnie zweryfikowana w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnie potwierdzona w środowisku obiektów rzeczywistych.

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?

Za główne osiągnięcie Doktoranta, które również zostało wskazane przez Doktoranta w treści pracy (str. 20), recenzent uważa opracowanie kompletnego algorytmu zobrazowania 3D SAR z wykorzystaniem przelotu platformy z jednym czujnikiem radarowym po nieliniowej trajektorii i jego weryfikację w środowisku symulacyjnym i rzeczywistym.

Realizacja głównego osiągnięcia prowadziła przez realizację osiągnięć cząstkowych:

- opracowanie koncepcji nieliniowej trajektorii ruchu czujnika w interferometrii SAR o wysokiej rozdzielczości [20],
- opracowanie autorskiego algorytmu strojenia trajektorii w celu poprawy parametrów obrazowania,
- uwzględnienie modelu ruchu platformy radarowej w realizacji nieliniowej trajektorii [28, 29],
- opracowanie pełnego symulatora 3D SAR [30],
- weryfikacja opracowanej metody na danych symulacyjnych i eksperymentalnych [29].

Wyniki prac Doktoranta były prezentowane w publikacjach w prestiżowych czasopismach i prezentowane na renomowanych konferencjach obejmujących tematykę obrazowania SAR. Aktualność problemu naukowego, badanego w rozprawie, została więc pozytywnie zweryfikowana przez społeczność naukową.

Zdaniem recenzenta, opiniowana rozprawa stanowi samodzielne i oryginalne rozwiązanie problemu badawczego, potwierdzając tym samym umiejętność prowadzenia przez Doktoranta pracy naukowej. Treść rozprawy i jej merytoryczny poziom świadczą o dużej wiedzy teoretycznej i umiejętnościach Doktoranta w zakresie podstawowej dyscypliny naukowej, w której jest ulokowana rozprawa.

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

Należy podkreślić, że praca została napisana poprawnie w języku angielskim i zawiera 118 stron podzielonych na streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, listę skrótów, listę symboli użytych w pracy, sześć rozdziałów i bibliografię.

Pierwszy rozdział INTRODUCTION zawiera motywację do podjęcia tej tematyki. Najczęściej radary z syntetyczną aperturą są stosowane do zobrazowania 2D. Ponieważ fale radiowe penetrują wewnętrzną strukturę obiektów, to celowe są badania nad możliwościami zobrazowania 3D i dokładniejszego zbadania tej struktury. W tym rozdziale Autor zamieszcza również dwie tezy swojej rozprawy i podkreśla swój wkład w udowodnienie tez.

W rozdziale drugim THEORETICAL BACKGROUND Doktorant przedstawia podłoże teoretyczne zobrazowania 3D na przykładzie własności funkcji PSF 2D i 3D i proponuje zbiór miar do oceny jakości zobrazowania. W tym rozdziale przedstawione są również założenia interferometrii radarowej InSAR, której istotą jest odbiór ech radarowych niezależnie przez co najmniej dwie anteny, pozwalającej na zobrazowanie 3D. Zamieszczone graficzne reprezentacje InSAR 3D PSF uzupełniają teoretyczne zależności i znakomicie ułatwiają zrozumienie tego zobrazowania.

W rozdziale trzecim STATE OF THE ART AND LITERATURE REVIEW są przedstawione reprezentatywne i znane w literaturze metody zobrazowania 3D SAR. Te metody bazują na trajektoriach kołowych (CSAR), wielokrotnych trajektoriach liniowych (MBSAR) i trajektoriach nieliniowych, jak chociażby w podejściu HAT. Przedstawione są zalety i wady przytoczonych rozwiązań. Pozwala to na porównanie autorskiego rozwiązania zobrazowania 3D SAR z tymi znanymi z literatury.

W rozdziale czwartym METHOD Autor rozprawy przedstawia własną koncepcję zobrazowania 3D SAR, uzupełniając rozważania teoretyczne bogatą interpretacją graficzną omawianych zagadnień. Po przedstawieniu geometrii obrazowania 3D Doktorant opisuje wymagania dotyczące jakości obrazowania i rozdzielczości. Najważniejszy fragment tego rozdziału i tak naprawdę istota badań naukowych skupia się na wyznaczeniu kształtu syntetycznej apertury, zdefiniowanego przez zbiór punktów nawigacyjnych wyznaczonych w wyniku optymalizacji zaproponowanej przez Doktoranta wielokryterialnej funkcji kosztu generacji trajektorii. Funkcja kosztu uwzględnia ważone koszty składowe: koszt obliczenia listków bocznych funkcji PSF (PSLR, ISLR) koszt zapewnienia zakładanej rozdzielczości pionowej i poziomej zobrazowania i koszt związany z właściwą długością trajektorii.

W rozdziale piątym RESULTS AND DISCUSSION przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla przykładowego celu i przykładowego czujnika radarowego na przykładowej platformie, z założoną ograniczoną dynamiką ruchu. Bardzo dokładnie porównano i skomentowano dwa warianty uzyskania trajektorii optymalnej (proces strojenia z wymaganiami ściśle ustalonymi i proces strojenia ze złagodzonymi wymaganiami), a wyniki przedstawiono w czytelnej postaci tabelarycznej i graficznej. W rozdziale tym również przedstawiono eksperyment z wykorzystaniem sprzętowego symulatora platformy radarowej.

Symulator sprzętowy platformy radarowej to zestaw dwóch anten – nadawczej i odbiorczej – umieszczonych na długim słupie, przesuwanej ręcznie. Warunki eksperymentu bardzo szczegółowo związano z możliwościami symulatora sprzętowego. Wyniki wcześniej

prezentowanych symulacji potwierdzają konieczność strojenia trajektorii i ostatecznie obiekt 3-punktowy jest dobrze rozpoznawalny, jak pokazano to na rys. 5.42. Potwierdza to prawdziwość tezy rozprawy w warunkach symulacji. Wnioski z eksperymentu rzeczywistego wymagają komentarza, ponieważ różnią się od wyników symulacji. Eksperyment udowodnił, że konieczna jest dokładna lokalizacja platformy na trajektorii, a symulator sprzętowy 3D SAR obsługiwany ręcznie i zakłócenia środowiskowe tej dokładności nie zapewniają. Tak więc platforma sprzętowa powinna być wyposażona w dodatkowe elementy eliminujące zakłócenia pomiarów.

Końcowy rozdział szósty rozprawy (SUMMARY) pełni funkcję podsumowania głównych osiągnięć, które są również prezentowane zarówno symulacyjnie jak i eksperymentalnie. Rozdział kończy się wskazaniem kierunków dalszej pracy nad tą tematyką.

Podsumowując recenzowaną rozprawę recenzent podkreśla, że przedstawiony przez Doktoranta algorytm budowania nieliniowej trajektorii bazujący na wiedzy o modelu ruchu platformy z czujnikiem radarowym pozwala na uzyskanie trójwymiarowości obrazowania obszaru ROI z założoną jakością w krótszym czasie niż dotychczas stosowane metody 3D SAR.

Przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską recenzent ocenia zatem jednoznacznie pozytywnie.

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

Rozprawa ma charakter teoretyczno doświadczalny, co wymaga wspólnej oceny rozwiązań teoretycznych i doświadczalnych. W zasadzie rozprawa nie posiada wad od strony merytorycznej. Koncepcja teoretyczna rozprawy, przy określonych założeniach upraszczających, jest opisana logicznie i poprawnie. Słabszą stroną rozprawy są skrótowe wyprowadzenia niektórych zależności teoretycznych i odsyłanie do literatury w celu bardziej precyzyjnego opisu, co jest miejscami denerwujące. Pojawiają się też zagadnienia natury dyskusyjnej, jak chociażby wykorzystanie wyników pracy doktoranta w praktyce. Problemy pojawiające się w realizacji eksperymentów pokazały konieczność dalszych badań nad implementacją sprzętową algorytmu.

Powstaje pytanie, czy rzeczywisty wielowirnikowiec o określonej masie, ograniczeniach zasobów energii i ograniczonym czasie trwania przelotu byłby w stanie zrealizować nieliniowość teoretycznej trajektorii uzyskanej w procesie jej dostrajania dostatecznie dokładnie? Pytanie, czy jest możliwa „pełna” realizacja założeń projektu w warunkach realnych nie jest zarzutem, a raczej szerokim problem dyskusyjnym. Co prawda doktorant próbuje wskazać wybór platformy dostępnej komercyjnie i wskazuje przykładowy zbiór parametrów radaru do realizacji zadania w oparciu o wcześniejsze doświadczenia własne i zespołu naukowego Grupy Badawczej Technik Radarowych w Instytucie Systemów Elektronicznych na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych PW, ale są to rozważania uproszczone, zwłaszcza jeśli dotyczy to modelu dynamiki platformy.

Autor nie ustrzegł się również pewnych mniej istotnych usterek redakcyjnych, skrótów myślowych i uproszczeń, wymienionych poniżej.

Lista symboli i lista skrótów nie zawiera wszystkich symboli i skrótów wykorzystywanych w tekście rozprawy.

Str. 29 – równanie (2.7) przedstawia równanie PSF dla jednopunktowego obiektu i jednego punktu apertury. Doktorant powołuje się na pozycję [6] w spisie literatury bez próby wyjaśnienia, dlaczego dokładnie taką postać przyjmuje funkcja PSF. Bardzo proszę o analityczne wyjaśnienie pojawienia się funkcji sinc{r/(c/2*B*)} w tej zależności. Prawdziwość zależności (2.7) jest uwarunkowana nierównością $BT \geq 100$. W tym zapisie pojawia się pasmo sygnału B, co natychmiast generuje pytanie, jaki sygnał pobudzający możne być brany pod uwagę?

Str. 30 – na rys. 2.7 pojawiają się oznaczenia rozmiaru piksela p_{xr}, $p_{xc\text{-}r}$ w płaszczyźnie obrazowej range – cross-range (opisy w równaniach 2.18 i 2.19) w klasycznym 2D SAR-e. Natomiast na rys 2.9 jest wyszczególniony rozmiar piksela o symbolicznych oznaczeniach p_{xV}, p_{xH}, ale brak jest wyjaśnienia w tym miejscu tekstu możliwości analitycznego wyznaczenia wymiaru tego piksela w przekroju 3D PSF w płaszczyźnie cross-range *horizontal*-cross-range *verical*. Algorytm BPA buduje obraz piksel po pikselu, więc taka wiedza jest praktycznie potrzebna.

Str. 31 – sformułowanie *Given that (2.7) describes the one-dimensional range profile obtained by range compression from (2.5)* wymaga doprecyzowania, ponieważ równanie (2.5) nie przedstawia operacji kompresji w odległości, tylko jest zapisem sygnału odebranego, który jest opóźnioną i przesuniętą w fazie kopią sygnału nadanego. Proszę wyjaśnić, na czym polega ta kompresja?

Str. 31 – równanie (2.11) przedstawia podstawową koncepcję zobrazowania BPA wykorzystaną w rozprawie doktorskiej, więc krótkie omówienie idei metody BPA i wyprowadzenie tej zależności powinno być dokładniej omówione.

Str. 33 – proszę o bardziej precyzyjne objaśnienie zapisu *Note that 2D cross-sections provided assume zero bandwidth to exclude range resolution impact, while 3D PSFs assume bandwidth of 300MHz.*

Str. 36 – we wzorze (2.18) *fd* is *the range sampling rate* natomiast w spisie oznaczeń f_d to częstotliwość Dopplera.

Str. 38 – przy omawianiu parametrów oceny jakości obrazowania warto jednak dodać, że chodzi o maksymalizację kontrastu (IC) i minimalizację entropii (IE).

Str. 40 – analizując wzory (2.26-2.29) trudno zaakceptować zdanie "*Note that the determined height depends on the phase difference $\Delta\phi$ not the distance difference so it is a periodic function"*. We wzorze 2.7 $\Delta\phi$ zależy jednak od różnicy odległości Δr. Nie bardzo wiadomo, jaką myśl chciał przekazać doktorant budując taką strukturę zdania.

Str. 77 – jakie względy zadecydowały o przyjęciu parametrów $k_\alpha = 1$, $k_\gamma = 2$, $k_\rho = 0{,}5$, $k_\sigma = 0{,}5$ w procedurze minimalizacji simpleksem funkcji kosztów opisanej wzorem (4.50)? Jaką mamy pewność, że zaproponowany algorytm minimalizacji osiągnie minimum globalne dla tak zbudowanej niewypukłej funkcji kosztów na etapie projektu trajektorii?

Str. 82 – problem doboru warunków początkowych procedury minimalizacji jest zawsze istotny i trudny do określenia. Czy tylko symulacje pozwalają na decyzje, która z symulowanych trajektorii jest „najlepsza”?

Str. 92 – fraza *It can be noted that the final PSF does not have the periodicity characteristic of the initial and reference PSFs. This is because the periodic PSF is characterized by higher PSLR and ISLR than the non-periodic one, and minimizing these parameters is the goal of the tuning procedure* została niezbyt fortunnie sformułowana, ponieważ periodyczność PSF ma inny mechanizm powstania niż sama obecność wysokich listków bocznych.

Eksperyment z dostrajaniem trajektorii przeprowadzono na autorskim symulatorze ruchu platformy [30] sterowanym manualnie, a nie na fizycznym wielowirnikowcu, co uniemożliwia obliczenia realnego czasu eksperymentu z dostrajaniem całej trajektorii. Natomiast to podejście pokazuje inwencję i pasję twórczą Doktoranta do pokazania zobrazowania 3D SAR z ograniczoną realizacją sprzętową i stanowi wskazówkę do dalszego udoskonalenia zaproponowanego algorytmu, a zwłaszcza jego realizacji sprzętowej.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Treść rozprawy dotyczy zagadnień zobrazowania 3D SAR obiektów, a więc problematyki, która ma istotne znaczenie praktyczne. Radar w odróżnieniu od obrazowania optycznego widzi w dzień i w nocy, a także w warunkach zakłóceń, które eliminują obrazowanie optyczne. Praktyczne zobrazowanie 3D może być elementem wspomagającym monitorowanie uszkodzeń struktur materiałowych, ponieważ promieniowanie radiowe może wniknąć głęboko wewnątrz struktury. Ta właściwość daje możliwości zastosowania zaproponowanego zobrazowania zarówno w wielu aplikacjach wojskowych, jak i cywilnych. Mały zwrotny UAV może polecieć w rejony zagrożone i dokonać zobrazowania na potrzeby wypracowania strategii ochronnych zagrożonych obszarów. Doktorant brał udział w międzynarodowym zespole opracowującym obrazowanie 3D SAR w celu identyfikacji niekooperujących obiektów w projekcie badawczo-technologicznym RING ([67] 3D Radar Imaging for Non-Cooperative Target Recognition), co świadczy o potrzebie dalszych prac w tej tematyce.

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) <u>wybitnie dobra zasługująca na wyróżnienie.</u>

Zgodnie z zaprezentowaną powyżej oceną merytoryczną rozprawy Pana mgr inż. Jędrzeja Drozdowicza stwierdzam, że opiniowana praca 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.

W związku z 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) stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Jędrzeja Drozdowicza do publicznej obrony, zgodnie z procedurą określoną przez Radę Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej.