

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na
PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Karola Abratkiewicza

która odbędzie się w dniu **21 października 2022 roku o godzinie 10:15** w trybie stacjonarnym

Temat rozprawy doktorskiej:

„Methods of analysis and synthesis for radar signals using chirp rate estimation in the time frequency domain”

Promotor: dr hab. inż. Piotr Samczyński - Politechnika Warszawska

Recenzenci: dr hab. inż. Janusz Dudczyk – Państwowa Uczelnia im. S. Batorego w Skierniewicach

dr hab. inż. Jerzy Pietrasiński – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

dr hab. inż. Ewa Świercz – Politechnika Białostocka

* 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://bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Dyscyplina-informatyka-techniczna-i-telekomunikacja-dziedzina-nauk-inzynieryjno-technicznych/mgr-inz.-Karol-Abratkiewicz>.

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

Tytuł: Methods of analysis and synthesis for radar signals using chirp rate estimation in the time-frequency domain

Tytuł w języku polskim: Metody analizy i syntezy sygnałów radarowych z wykorzystaniem estymatorów przyspieszenia fazy chwilowej w dziedzinie czas-częstotliwość

Streszczenie

Systemy radarowe zyskują coraz większą popularność nie tylko w aplikacjach militarnych, ale również cywilnych. Dzięki swoim zaletom, takim jak zdolność do penetracji niektórych struktur dielektrycznych, wysoka rozdzielczość, czy możliwość pracy zarówno w ciągu dnia, jak i nocy oraz w niemal każdych warunkach atmosferycznych, systemy radarowe stanowią cenne uzupełnienie systemów optycznych, laserowych i ultradźwiękowych. Wraz z rozwojem technologii obserwuje się rosnące zapotrzebowanie na szybkie i efektywne algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów radiolokacyjnych, które jednocześnie w sposób adaptacyjny zmieniałyby swoje parametry pracy. Opracowanie i analiza takich algorytmów, wykonujących obliczenia w czasie rzeczywistym, przy zachowaniu wymaganej dokładności obliczeń, jest obiektem prac inżynierów i naukowców na całym świecie. Szczególną uwagę poświęca się przy tym systemom wojskowym, od których często zależy ludzkie życie.

Niniejsza rozprawa opisuje nowe metody analizy i syntezy sygnałów radarowych opracowane na potrzeby rozpoznania elektronicznego, walki elektronicznej oraz radiolokacji pasywnej. W rozprawie wykorzystano znane z literatury techniki estymacji przyspieszenia fazy chwilowej sygnałów w dziedzinie czas-częstotliwość i dostosowano je do zastosowań radarowych. Następnie, poprzez analizę ich ograniczeń, opracowano nowatorskie adaptacyjne algorytmy ukierunkowane na przetwarzanie sygnałów w systemach radiolokacyjnych. Efektywność zaproponowanych technik potwierdzono na drodze obszernych eksperymentów, zarówno symulacyjnych, jak i eksperymentów przeprowadzonych z wykorzystaniem danych pochodzących z rejestracji sygnałów rzeczywistych nadawanych przez radary. Szczególną uwagę poświęcono sygnałom impulsowym z liniową oraz nieliniową modulacją częstotliwości. Pokazano, że możliwa jest estymacja składowych fazy takich sygnałów. Zarejestrowane sygnały pochodzące z rzeczywistych systemów radiolokacyjnych posłużyły do weryfikacji poprawności opracowanych technik, co potwierdziło ich przydatność w systemach walki elektronicznej do analizy sygnałów o nieznanym parametrach. W pracy zaproponowano także nowe, nieznanne dotąd w literaturze estymatory, rozszerzające możliwości znanych technik o zdolność do estymacji trzeciej pochodnej fazy sygnału w dziedzinie czas-częstotliwość. Ze względu na swoją uniwersalność zaproponowane w rozprawie metody mogą być z powodzeniem wykorzystane także w innych dziedzinach nauki i techniki tj. w analizie sygnałów biomedycznych, audio, oraz w hydroakustyce.

Abstract

Radar systems are gaining popularity, not only in military but also civilian applications. Radars are essential sensors which complement optical, laser, and ultrasonic systems due to the advantages they provide, such as the ability to penetrate some dielectric structures, their high resolution, and their ability to work both during the day and at night, and in almost all weather conditions. Along with the development of modern technology, there is a growing demand for fast and efficient algorithms that additionally allow simultaneous parameter adjustment to be carried out. The development of real-time algorithms while maintaining the accuracy of calculations is the subject of work of engineers and scientists worldwide. Special attention is paid to military systems, which are usually responsible for the security of people.

This dissertation describes novel methods of analysis and synthesis of radar signals for electronic reconnaissance, electronic warfare, and passive coherent location purposes. The techniques of instantaneous chirp rate estimation in the time-frequency domain known from the literature were used and then adopted to radar applications, and by analyzing their limitations, innovative adaptive signal processing algorithms were developed intended for radar systems. The efficiency of the techniques proposed was confirmed by extensive simulation experiments and using data originating from real-life radars. Particular attention was paid to pulse waveforms with linear and non-linear frequency modulation. The possibilities of estimating phase components of such signals are shown. The work also proposes new estimators, hitherto unknown in the literature, extending the possibilities of the known techniques with the ability to estimate the third-order derivative of the signal phase in the time-frequency domain. The recorded signals originating from real-life radar systems were processed for the sake of the verification of the correctness of the described techniques, which confirmed their usefulness in electronic warfare systems for the analysis of pulses with unknown parameters. However, the methods proposed in the dissertation can be successfully used in other fields of science due to their universality, such as biomedical or audio signal analysis, or hydro-acoustic.

Dr. hab. inż. Jerzy PIETRASIŃSKI prof. WAT

Warszawa, 10.08.2022

Wojskowa Akademia Techniczna

Wydział Elektroniki

Instytut Radioelektroniki

ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2

00-908 Warszawa

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

Tytuł rozprawy:

***Methods of analysis and synthesis for radar signals using chirp rate estimation
in the time frequency domain***

Autor rozprawy: mgr inż. Karol ABRATKIEWICZ

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

Rozprawa doktorska mgr. inż. Karola ABRATKIEWICZA dotyczy opracowania metod analizy oraz syntezy sygnałów radarowych w których wykorzystuje się estymatory określone mianem *chirp rate* (drugiej pochodnej fazy sygnału) w dziedzinie czas-częstotliwość.

Zagadnienie naukowe rozpatrywane w pracy zostało sformułowane w trzech następujących tezach badawczych:

1. można zrekonstruować impulsowy sygnał radarowy z nieliniową modulacją częstotliwości za pomocą estymatorów typu *chirp rate* w dziedzinie czas-częstotliwość.
2. można obliczyć podwójnie adaptacyjną transformację świergotową (*chirplet*) korzystając z okna analizy o dwóch parametrach zoptymalizowanych dla danego sygnału
3. można wyprowadzić zależność opisującą estymator trzeciego rzędu wielomianowej fazy przy użyciu krótko czasowej transformacji Fouriera.

Autor przeprowadza analizę oraz dokonuje rekonstrukcji sygnałów radarowych za pomocą algorytmów operujących w dziedzinie czas-częstotliwość. Dotyczy to algorytmów znanych z literatury jak i nowatorskich metod zaproponowanych przez doktoranta. Rozprawa ma charakter teoretyczny.

Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł/ w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle/ świadczą o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski przedstawiono w sposób jasny i przekonujący?

W rozprawie poprawnie dokonano przeglądu literatury światowej w tematyce pracy. W bibliografii podano 141 pozycji literaturowych, z czego 24 to prace w których mgr inż. K. ABRATKIEWICZ jest autorem lub współautorem, opublikowane w prestiżowych czasopismach naukowych jak i zaprezentowane na cenionych konferencjach branżowych. Cytowane publikacje zostały wybrane poprawnie i stanowią odpowiednie źródło informacji o tematyce rozprawy. Świadczą one także o bogatej, usystematyzowanej wiedzy Autora w literaturze przedmiotu.

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

Stwierdzam, że Autor z poprawnie rozwiązał postawione zadanie używając do tego właściwych metod badawczych oraz przyjmując odpowiednie założenia. Autor przyjął, że analiza sygnałów niestacjonarnych i wielokomponentowych jest trudna lub niemal niemożliwa do realizacji za pomocą metod czasowych lub częstotliwościowych. Doktorant rozważa zatem metody oparte na łącznej analizie czasowo-częstotliwościowej, co jest podejściem poprawnym. W pracy konsekwentnie prezentowane są kolejne przykłady ilustrujące zasadność przyjętych założeń i wyselekcjonowanych metod przetwarzania sygnałów radarowych. Ponadto doktorant proponuje własne metody przetwarzania sygnałów i sukcesywnie potwierdza ich skuteczność w porównaniu do technik znanych z literatury. Rozwiązania te są poparte odpowiednimi analizami matematycznymi co świadczy, że doktorant dogłębnie rozumie problem i jest świadomy możliwości stosowanych narzędzi.

Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanego przez literaturę światową?

Autor przeprowadza oryginalne rozważania teoretyczne oraz zaawansowane symulacje wybranych sygnałów radarowych. W szczególności oryginalność rozprawy przejawia się w koncepcji zastosowania nowych algorytmów przetwarzania sygnałów niestacjonarnych, dostosowaniu ich do pracy z sygnałami radarowymi, a następnie ich modyfikacji prowadzącej do optymalizacji jakości reprezentacji sygnału. Doktorant zaproponował również efektywne metody rekonstrukcji impulsów o nieliniowej modulacji częstotliwości. Na szczególne podkreślenie zasługują wyniki otrzymane w wyniku analizy sygnałów pomierzonych, których źródłem były niekooperujące radary impulsowe. Do istotnych osiągnięć autora należy również zaliczyć opracowanie nowej metody *synchro-squeezingu* na potrzeby ekstrakcji sygnałów o nieliniowej modulacji częstotliwości. Wspomniane osiągnięcia prowadzą do wniosku o istotnym wkładzie Autora w dziedzinie rozprawy.

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

Recenzowana rozprawa jest przekonująca, ma logiczny oraz poprawny układ i cechuje się precyzyjnie sformułowaną treścią. Stosunek przekazywanej treści do objętości rozprawy również nie budzi zastrzeżeń. Rozprawa została zorganizowana w formule dziewięciu rozdziałów oraz dwóch dodatków (A oraz B). W części zasadniczej rozprawy Autor przedstawia wyniki analizy symulacyjnej, a następnie sprawdza poprawność działania algorytmów z wykorzystaniem danych rzeczywistych pozyskanych z badań sygnałów generowanych przez radary. Stanowi to silny argument potwierdzający zarówno słuszność założeń, jak i skuteczność algorytmów. Zamieszczone na końcu rozprawy dodatki w postaci wyprowadzeń oraz dowodów matematycznych, dają jasny obraz badanych algorytmów oraz istotnie uzupełniają rozprawę o zagadnienia teoretyczne. Tekst jest zredagowany poprawnie.

Jakie są słabe strony rozprawy i jej wady?

W rozprawie trudno znaleźć istotne wady czy słabe strony. Wrażenie drobnego niedosytu sprawia jedynie brak dyskusji związanej z szerszą analizą lub spodziewanymi pracami poświęconymi analogicznemu zagadnieniu badanym z wykorzystaniem transformacji biliniowych lub falkowych. Co prawda Autor wykluczył je na początku pracy, jednak cennym wnioskiem na końcu rozprawy byłaby dodatkowa konkluzja mówiąca o możliwości adaptacji podobnych algorytmów dla przekształceń innych niż krótko czasowa transformacja Fouriera. W recenzowanej rozprawie, a dokładniej w Rozdziale 5 brakuje mi także precyzji w opisie charakterystyk sygnału typu NLFM generowanego przez radar typu ATC, do którego Autor odwołuje się w Rozdziale 6. Szkoda ponadto, że Autor nie wspomina w ogóle o sygnałach z kodowaniem wewnątrz impulsowym w kontekście możliwości ich analizy oraz ewentualnej rekonstrukcji.

Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Recenzowana rozprawa dobrze wpisuje się we współczesne trendy badań głównie w zakresie radarów w zastosowaniach wojskowych w aspekcie realizacji przez te sensory ważnych zadań w systemie teledetekcyjnym. W szczególności, moim zdaniem recenzowana rozprawa jest bardzo ważna w kontekście poszukiwań rozwiązań umożliwiających funkcjonowanie radaru kognitywnego w warunkach walki radioelektronicznej. Wynika to z faktu, że dotyczy ona opracowania wydajnych algorytmów przetwarzania sygnałów radarowych w dziedzinie czas-częstotliwość zarówno w sensie ich analizy jak i syntezy. Z punktu widzenia praktycznego znaczy to bowiem, iż ww. algorytmy można stosować zarówno na etapie wyboru strategii generacji sygnałów sondujących jak i na etapie ich analizy, co z kolei jest bardzo ważne m.in. w aspekcie walki radioelektronicznej. Świadczą o tym oryginalne wyniki otrzymane przez doktoranta potwierdzone w licznych publikacjach o światowym zasięgu.

Reasumując, uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Karola ABRATKIEWICZA została ona opracowana wręcz modelowo i wnosi istotny wkład do nauk

technicznych w poprzednio określonym zakresie. Dlatego też z przekonaniem wnioskuję o zaliczenie jej do kategorii wybitnie dobrej zasługującej na wyróżnienie.

Rozwiązania opisane w pracy powinny znaleźć zastosowanie w procesie projektowania radarów produkowanych przez polski przemysł radiolokacyjny.

Do której z następujących kategorii recenzent zalicza rozprawę?

- a) Nie spełniająca wymagań
- b) Wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c) Spełniająca wymagania
- d) Spełniająca wymagania z nadmiarem
- e) Wybitnie dobra zasługująca na wyróżnienie



10.08.2022

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

Tytuł rozprawy: **Methods of analysis and synthesis for radar signals using chirp rate estimation in the time-frequency domain**

Autor rozprawy: **mgr inż. Karol ABRATKIEWICZ**

- 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)?**

Zagadnienie naukowe, jakie podjął pan mgr inż. Karol Abratkiewicz w niniejszej dysertacji dotyczy analizy i syntezy sygnałów radarowych w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej. Głównym celem pracy było opracowanie algorytmów analizy i rekonstrukcji sygnałów radarowych z wykorzystaniem estymatorów parametrów sygnału w dziedzinie czas-częstotliwość TF (ang. *Time-Frequency*). Autor skoncentrował się głównie na tzw. parametrze chirp-rate (CR), będącym drugą pochodną fazy sygnału względem czasu, który reprezentuje dynamikę częstotliwości chwilowej.

Praca składa się z wprowadzenia (w którym przedstawiony został cel, teza pracy i wkład własny Autora dysertacji) oraz siedmiu kolejnych rozdziałów. W rozdziale drugim przedstawiony został aktualny stan wiedzy w dziedzinie rozprawy, będący przeglądem rozwiązań dostępnych w literaturze międzynarodowej. Rozdział trzeci został poświęcony podstawom teoretycznym dotyczącym przetwarzania w dziedzinie TF oraz przekształceniom Fouriera na fragmentach sygnału „wycinanych” przez okno czasowe przesuwające się w czasie, tj.: krótkoczasowej transformacie Fouriera STFT, (ang. Short Time Fourier Transform), Rys. 3.1, str. 39. W rozdziale czwartym dokonano charakterystyki teorii związanej z estymacją parametru CR w dziedzinie FT, definiując trzy estymatory, tj.: estymator oparty na pochodnych cząstkowych rzędu pierwszego zespolonej fazy STFT (rozdz. 4.1) oraz estymator oparty na pochodnych cząstkowych wyższego rzędu zespolonej fazy względem czasu (rozdz. 4.2.1) i częstotliwości (rozdz. 4.2.2). Stabilność numeryczna estymatorów została również przetestowana przez porównanie wyników z dolną granicą Craméra-Rao (rozdz. 4.3).

Kolejne rozdziały dysertacji związane są z wynikami, które Autor uzyskał w przeprowadzonym eksperymencie. W rozdziale 5 Doktorant przedstawił opracowaną przez siebie aplikację, w której wykorzystał estymatory CR w procesie analizy sygnałów radarowych. Autor pracy poddał analizie rzeczywisty sygnał radarowy z urządzenia kontroli ruchu lotniczego ATC (ang. *Air Traffic Control*) z nieliniową modulacją częstotliwości NLFM (ang. *Nonlinear Frequency Modulation*) jaki był zdyslokowany na Lotnisku Chopina w Warszawie. Rejestracje zostały wykonane w 2011 r. przy użyciu wektorowego analizatora sygnału (VSA) opartego na komponentach National Instruments

PXIe, z sześcioma niezależnymi zsynchronizowanymi kanałami wejściowymi, działający w zakresie częstotliwości $10 \text{ MHz} \div 6,6 \text{ GHz}$ z pasmem natychmiastowej analizy równym 50 MHz , jak Recenzent wnioskuje po analizie pozycji nr 105 listy referencyjnej.

Rozdziały 6, 7 i 8 przedstawiają nowatorskie metody zaproponowane przez Autora, gdzie w rozdziale szóstym zademonstrowano algorytm rekonstrukcji sygnału NLFM. W rozdziale siódmym zostały zilustrowane dwie metody adaptacyjne, tj.: metoda wykorzystująca tylko zmienną szerokość okna analizy w przetwarzaniu STFT oraz druga metoda wykorzystująca dwuparametrowe okno do analizy TF o nazwie DACT (ang. *Double-Adaptive Chirplet Transform*), które dodatkowo poprawia rozdzielczość dystrybucji.

W tym przypadku Autor przeprowadził badania na rzeczywistych sygnałach radarowych uzyskanych w wyniku pomiaru radaru kontroli ruchu lotniczego typu ASR10SS produkcji Raytheon, dokonanych w 2019 roku.

Rozprawa kończy się podsumowaniem zawartym w ostatnim rozdziale oraz wskazaniem przez Doktoranta obszarów dalszych prac. Dodatkowo rozprawę uzupełniają załączniki (A i B), w których przedstawione zostały zależności matematyczne dla algorytmów, jakie opracował Doktorant.

Autor sformułował *explicite* trzy tezy, którym poświęcił odpowiednio trzeci i czwarty rozdział pracy, w następującym brzmieniu:

- możliwa jest rekonstrukcja impulsowych sygnałów radarowych o nieliniowej modulacji częstotliwości poprzez wykorzystanie estymatorów przyspieszenia fazy chwilowej w dziedzinie czas-częstotliwość;
- możliwe jest wyznaczenie adaptacyjnej transformacji chirplet wykorzystującej dwuparametryczne okno analizy zoptymalizowane do chwilowego charakteru sygnału;
- możliwe jest wyprowadzenie estymatora składowej fazy wielomianowej trzeciego rzędu poprzez wykorzystanie krótkoczasowej transformaty Fouriera.

Sformułowanie powyższych tez jest logiczne i racjonalne, szczególnie biorąc pod uwagę fakt, iż w obecnym czasie poszukuje się szybkich algorytmów analizy oraz syntezy sygnałów radarowych na potrzeby szeroko pojętego rozpoznania radioelektronicznego i walki elektronicznej EW (ang. *Electronic Warfare*). Powyższe tezy zostały poparte kompleksowymi symulacjami oraz techniczną analizą sygnałów pochodzących z rzeczywistych systemów radarowych, co potwierdza ich znaczną użyteczność.

Opiniowana rozprawa doktorska ma charakter teoretyczno-empiryczny, o czym świadczy rzeczowa analiza teoretyczna opracowanych algorytmów, tj.: algorytmu rekonstrukcji impulsów radarowych z nieliniową modulacją częstotliwości NLFM, algorytmu podwójnie adaptacyjnej transformacji chirplet służącej do ekstrakcji sygnałów radarowych poprzez optymalizację koncentracji energii na płaszczyźnie czas-częstotliwość, oraz przeprowadzenia analizy porównawczej nakładu obliczeniowego dla estymatorów przyspieszenia fazy chwilowej i opracowania trzech nowych estymatorów: estymatora częstotliwości chwilowej, przyspieszenia fazy, oraz tzw. zrywu kąтового fazy (trzeciej pochodnej fazy) na płaszczyźnie TF.

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 141 pozycji literaturowych, w tym artykuły i książki, które w ocenie Recenzenta są dobrane właściwie. Doktorant dokonał obszernego przeglądu znanych z literatury metod estymacji parametrów sygnałów niestacjonarnych z modulacją częstotliwości.

W przedstawionej literaturze można znaleźć odwołania do cenionych prac o zasięgu międzynarodowym, nawiązujących do tematyki rozprawy, co świadczy o ciągłej analizie badanego zagadnienia w trakcie redakcji pracy. Bogaty spis literatury oraz wynikająca z niego obszerna analiza aktualnego stanu nauki i badań w skali światowej świadczy o dużej wiedzy i kompetencjach Doktoranta.

Na podstawie analizy Spisu Literatury można zauważyć kilkanaście referencji do prac Autora, które były publikowane między innymi w czasopismach indeksowanych z listy JCR, takich jak: Hydroacoustics, IET Radar & Sonar Navigation, IEEE Signal Processing Letters, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Sensors oraz IEEE Sensors Journal.

Warto zwrócić uwagę na fakt, iż w ww. czasopismach w przypadku trzech publikacji (poz. [1], [2] i [3] – listy referencyjnej) były one w całości samodzielnie opracowane przez Autora, a w przypadku pozostałych prac pan mgr inż. Karol Abratkiewicz był pierwszym autorem, więc należy założyć, że wiodącym.

Również wśród spisu literatury bardzo istotny jest fakt obecności 14 referatów opublikowanych w materiałach międzynarodowych konferencji (Signal Processing Symposium SPSympo, International Radar Symposium IRS, IEEE International Radar Conference RADAR, IEEE Radar Conference RadarConf), w których Doktorant przy współautorstwie Promotora niniejszej dysertacji był głównym autorem. Potwierdza to wysoki poziom pracy, której wyniki były publikowane w najważniejszych periodykach poświęconych technologiom radarowym oraz przetwarzaniu sygnałów.

Pozytywnie należy ocenić zastosowanie techniczne uzyskanych przez Doktoranta wyników w analizie i przetwarzaniu sygnałów. Mając na myśli technologie jakie towarzyszą walce elektronicznej oraz szeroko pojętemu zagadnieniu akwizycji, przetwarzania i rozpoznawania sygnałów w obszarach COMMINT/ELINT/SIGINT osiągnięte przez Autora wyniki mogą zostać wykorzystane praktycznie.

Przedstawione przez Autora uzasadnienie kontynuacji badań (rozdział 9 - wnioski) należy uznać 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?

Autor dysertacji rozpatrywał sygnały mające niestacjonarny charakter. W związku z tym, analiza tego typu sygnałów w dziedzinie czas-częstotliwość jest jak najbardziej słuszna i zgodna z powszechnie przyjętym podejściem w literaturze światowej. Badane sygnały radarowe wymagają nie tylko analizy w dziedzinie częstotliwości, ale także uwzględnienia zależności czasowych, co zostało w pracy zrealizowane w sposób kompleksowy.

Doktorant zweryfikował w sposób eksperymentalny rozwiązanie przedstawionego zadania wykorzystując do tego symulowane sygnały radarowe oraz sygnały pochodzące od rzeczywistych źródeł promieniowania radarowego, tj.: urządzeń kontroli ruchu lotniczego na lotnisku im. Fryderyka Chopina w Warszawie (ASR10SS produkcji Raytheon) poddane akwizycji w 2011 oraz 2019 roku. Mierzone i rejestrowane sygnały cechowały się liniową oraz nieliniową modulacją częstotliwości. Również w czasie badań Doktorant analizował sygnał micro-Dopplera.

Po analizie ograniczeń estymatorów przyspieszenia fazy chwilowej w dziedzinie TF, doktorant zaproponował ich modyfikacje polegające na adaptacyjnym doborze parametrów przetwarzania.

W tym celu wykorzystał On parametry tzw. „okna” analizy użytej do krótkoczasowej transformacji Fouriera STFT.

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż przedstawione powyżej podejście ma szczególne zastosowanie w systemach autonomicznych, na co doktorant zwrócił uwagę. Autor zaproponował również autorski algorytm rekonstrukcji impulsów radarowych z wykorzystaniem znanych z literatury estymatorów przyspieszenia fazy chwilowej. Autor potwierdził również tezę postawioną na początku pracy dotyczącą możliwości estymacji trzeciej pochodnej fazy sygnału za pomocą krótkoczasowej transformaty Fouriera. Otrzymane w ramach rozprawy doktorskiej wyniki pokazały, że dzięki zaproponowanym algorytmom możliwa jest estymacja parametrów sygnałów radarowych o nieznanymi parametrach, a także ich rekonstrukcja, adaptacyjna quasi- optymalizacja rozkładu energii oraz estymacja wyższych składników fazy sygnałów, co jest autorskim wkładem Doktoranta w rozwój technik przetwarzania sygnałów na płaszczyźnie czas-częstotliwość.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

W opinii Recenzenta, poczynione przez Autora analizy w przedmiotowej dysertacji jak i w samodzielnych i współautorskich publikacjach można uznać za w pełni oryginalne. Do oryginalnych rozwiązań Doktoranta można zaliczyć:

- przeprowadzenie analizy porównawczej nakładu obliczeniowego dla estymatorów przyspieszenia fazy chwilowej dostępnych w literaturze, wyznaczenie kresu Cramera-Rao i analizę wariancji estymatorów oraz wykorzystanie tych estymatorów w analizie sygnałów radiolokacyjnych;
- opracowanie algorytmu rekonstrukcji impulsów radarowych z nieliniową modulacją częstotliwości wykorzystującego badane estymatory parametrów sygnałów;
- opracowanie algorytmu podwójnie adaptacyjnej transformacji chirplet służącej do ekstrakcji sygnatur radarowych poprzez optymalizację koncentracji energii na płaszczyźnie czas-częstotliwość;
- opracowanie trzech nowych estymatorów parametrów sygnałów niestacjonarnych na płaszczyźnie czas-częstotliwość: estymatora częstotliwości chwilowej, przyspieszenia fazy, oraz tzw. zrywu kąтового fazy (trzeciej pochodnej fazy).

Powyższe jednoznacznie świadczy o istotnym wkładzie własnym Autora pracy i znacząco poszerza wiedzę w zakresie wybranych zagadnień techniki przetwarzania sygnałów radarowych.

Na wysoką ocenę zasługują również publikacje naukowe, w tym w szczególności „Double-Adaptive Chirplet Transform for Radar Signature Extraction” – IET Radar & Sonar Navigation, „On the Instantaneous Angular Jerk Estimation in the Time-Frequency Domain” – IEEE Signal Processing Letters, „Sonar Pulse Detection Using Chirp Rate Estimation and CFAR Algorithms” – Hydroacoustics, „Target Doppler Rate Estimation Based on the Complex Phase of STFT in Passive Forward Scattering Radar „ – Sensors, „A Block Method Using the Chirp Rate Estimation for NLFM Radar Pulse Reconstruction. „ – Sensors oraz „Radar Signal Parameters Estimation Using Phase Accelerogram in the Time-Frequency Domain” – IEEE Sensors Journal, gdzie jak już zostało wspomniane, Doktorant jest samodzielnym autorem, jak i autorem wiodącym.

Recenzent pozytywnie ocenia także możliwość zastosowania praktycznego uzyskanych przez Doktoranta wyników w dziedzinie EW oraz technik akwizycji, przetwarzania i rozpoznawania sygnałów we wspomnianych już wcześniej obszarach COMMINT/ELINT/SIGINT.

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

Rozprawa doktorska wraz z załącznikami, bibliografią oraz wykazem stosowanych skrótów ma objętość 177 stron i jest napisana w sposób ścisły oraz zwięzły w języku angielskim. Opis umieszczony w pracy jest zrozumiały, przedstawiony w sposób konsekwentny z zachowaniem spójnego ciągu myślowego.

Po wprowadzeniu w rozdziale pierwszym Autor, w kolejnym rozdziale dokonał przeglądu wybranych technik estymacji parametrów sygnałów niestacjonarnych. Rozdział trzeci poświęcony został opisowi estymatorów przyspieszenia fazy w dziedzinie czas-częstotliwość. W dalszej kolejności, w oparciu o te rozważania, skonstruowana została dalsza część pracy. W rozdziale czwartym Doktorant przedstawił analizę sygnałów radiolokacyjnych NLFM wykorzystując zaproponowane wcześniej estymatory. W kolejnych rozdziałach pracy przedstawiono nowatorskie algorytmy, począwszy do rozdziału piątego, gdzie zamieszczono dogłębne badanie zaproponowanej metody rekonstrukcji impulsów radarowych NLFM. W następnym rozdziale Autor przedstawił dwa algorytmy adaptacyjnej koncentracji energii na płaszczyźnie czas-częstotliwość za pomocą zmodyfikowanych wariantów okna analizy STFT. W rozdziale siódmym opisano trzy nowe estymatory zaproponowane przez Doktoranta na potrzeby analizy oraz rekonstrukcji sygnałów NLFM. Ostatnim rozdziałem pracy jest podsumowanie wraz z propozycją potencjalnych aplikacji i dalszego rozwoju metod opracowanych przez Doktoranta.

Zatem należy stwierdzić, iż układ pracy, kolejność i kompletność poszczególnych rozdziałów jest dostosowana do tematyki i zakresu badań, jakie zostały podjęte przez Autora. Przeprowadzone analizy, użyty „aparatus matematyczny” oraz prezentacja badań symulacyjnych są na tyle klarowne i wyczerpujące, że pozwalają na ich pełną ocenę przez Recenzenta.

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

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

- a) Aspekt praktyczny (I) – wstępne przetwarzanie sygnału: Doktorant dokonał analizy sygnałów radiolokacyjnych pochodzących od konkretnego źródła emisji rejestrowanych w roku 2011 tj.: ATC (rozd. 5.3). Parametry tej emisji zostały określone w rozdz. 5.3, str. 62. Aby w kolejnym kroku obliczyć parametry fazowe, wyekstrahowano z mierzonej próbki pojedynczy impuls i poddano przetwarzaniu zgodnie z metodami, jakie Autor opracował. Biorąc powyższe pod uwagę, w całym „łańcuchu” analizy i przetwarzania sygnału dochodzi jeszcze jeden etap tzw. „obróbki wstępnej”, która nie została uwzględniona przez Autora pracy w złożoności obliczeniowej, co w bezpośredni sposób przekłada się na czas odpowiedzi systemu rozpoznania na analizowany sygnał. Należy sobie uświadomić, iż w obecnie wykorzystywanych systemach rozpoznania i walki elektronicznej klasy ELINT (a takie, między innymi, należy rozważać ze względu na możliwość wykorzystania opracowanych algorytmów przez Autora) kluczowym parametrem jest czas odpowiedzi tego systemu od momentu wykrycia sygnału do momentu wygenerowania informacji zwrotnej o rodzaju sygnału, jego cechach, przynależności, stopniu zagrożenia, itd., a co za tym idzie, quasi-optimalizacji czasu rozpoznania, klasyfikacji i identyfikacji¹ sygnału/źródła emisji.

¹ Identyfikację (będącą zagadnieniem SEI (ang. Specific Emitter Identification) w tym przypadku należy rozumieć jako rozpoznanie i klasyfikację poszczególnych egzemplarzy tego samego typu sygnałów radioelektronicznych, a tym samym źródeł ich emisji. Jest to proces wysoce zaawansowany, który na chwilę obecną w systemach klasy ELINT bazuje na ekstrakcji

b) Aspekt praktyczny (II) – powtarzalność i odtwarzalność próby pomiarowej: również w bardzo enigmatyczny sposób został określony typ źródła emisji radarowej w postaci radaru ATC, dyslokowanego na Lotnisku in. Fryderyka Chopina w Warszawie, (rozdz. 5.3). W kontroli ruchu lotniczego stosowanych jest kilka typów radarów, o ściśle zdefiniowanych zastosowaniach. Zdaniem Recenzenta należałoby precyzyjnie określić z jakiego typu źródłem emisji Autor miał do czynienia, mając na myśli powtarzalność i odtwarzalność pomiarów.

W rozdziale 7.4.5.1, str. 107, Autor dokonał rejestracji sygnałów radarowych pochodzących, jak twierdzi, od tego samego źródła co w roku 2011, tylko już po modyfikacji radaru ATC na tym samym lotnisku, wskazując w tym przypadku konkretny typ radaru ASR10SS produkcji Raytheon. Zdaniem Recenzenta, należałoby uszczegółowić, jakimi podstawowymi parametrami czasowo-częstotliwościowymi charakteryzowało się to źródło emisji (po modernizacji) w stosunku do poprzednich pomiarów z roku 2011.

c) Aspekt praktyczny (III) – powtarzalność i odtwarzalność próby pomiarowej, zagadnienie deinterleavingu: również istotny fakt, który budzi obawę Recenzenta to kanał pomiarowy oraz bogactwo środowiska elektromagnetycznego, które nie zostało uwzględnione w procesie akwizycji i przetwarzania. Trudno bowiem wyobrazić sobie sytuację, w której w rzeczywistych warunkach pomiarowych/bojowych (mając na myśli konkretną adaptację opracowanej metody w systemie ESM/ELINT) zjawisko „deinterleavingu” będzie wyeliminowane. Systemy ESM wykonują różne zadania rozpoznawcze, takie jak wyszukiwanie, przechwytywanie, analizowanie i klasyfikację sygnałów radarowych. Wraz z coraz bardziej złożonym środowiskiem elektromagnetycznym, strumień impulsów radarowych przechwycony przez odbiornik ESM często składa się z wielu sekwencji impulsów emitowanych przez różne nadajniki radarowe, co przekłada się na zmniejszenie efektywności ekstrakcji cech z takiej rejestracji. Zdaniem Recenzenta należałoby przeprowadzić próby pomiarowe w rzeczywistych warunkach terenowo-propagacyjnych, aby ocenić praktyczną skuteczność opracowanej metody, w celu jej dalszego wykorzystania.

Recenzent przychylił się do stwierdzenia Autora zapisanego na stronie 149, (rozdz. 9.1), iż analiza sygnału w czasie rzeczywistym, szczególnie w nowoczesnych systemach ER/ELINT/EW ma znaczenie szczególne, niemniej jednak konieczne są kompleksowe testy pomiarowe w warunkach rzeczywistych w celu weryfikacji metody opracowanej przez Doktoranta.

Wskazane powyżej uwagi nie umniejszają merytorycznej jakości recenzowanej dysertacji i należy je potraktować jako dalsze kierunki prac w obszarze tematyki podjętej przez Doktoranta biorąc pod uwagę „konkretną realizację sprzętową”.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Treść rozprawy wnosi istotny wkład w zakresie technik analizy oraz przetwarzania sygnałów radarowych. Z całą pewnością można wskazać dwa obszary użyteczności rozprawy, tj.: nauki techniczne (zawartość koncepcyjna pracy poszerza zbiór algorytmów wykorzystywanych w czasowo-częstotliwościowej analizie sygnałów oraz rekonstrukcji sygnałów radarowych z wykorzystaniem estymatorów parametrów sygnału w ww. dziedzinie) oraz obronność kraju (ze

dotychczasowych cech pochodzących od sygnału radioelektronicznego, które stanowią dobrą miarę separacji w procesie ich identyfikacji.

względu na specyfikę technik radarowych istnieje możliwość wykorzystania w obszarze rozpoznania i walki elektronicznej EW).

Otrzymane wyniki zostały przyjęte przez środowisko naukowe poprzez publikacje w renomowanych czasopismach naukowych oraz na konferencjach międzynarodowych.

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~~

W przekonaniu Recenzenta, opiniowana praca przedstawia samodzielne rozwiązanie problemu badawczego, a treść rozprawy oraz wysoki poziom merytoryczny świadczy o zadowalającej wiedzy Autora.

Po zapoznaniu się z przedłożoną do recenzji rozprawą doktorską mgr inż. Karola Abratkiewicza, stwierdzam, że praca spełnia wymagania z wyraźnym nadmiarem oraz spełnia wymagania art. 13 .1 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami, gdzie mowa o oryginalnym rozwiązaniu problemu naukowego, ogólnej wiedzy teoretycznej kandydatki w danej dyscyplinie naukowej oraz umiejętności samodzielnej prowadzenia pracy naukowej.

W czasie obrony publicznej, w zależności od odpowiedzi Doktoranta na uwagi w recenzji, Recenzent pozostawia sobie możliwość wnioskowania o zmianę kategorii.

W związku z tym, stawiam wniosek o przyjęcie tego opracowania jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie pana mgr inż. Karola Abratkiewicza do jej obrony publicznej.

Skierniewice, 22 sierpnia 2022 r.



Białystok, 20 lipca 2022 r.

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

PW WEiTI Kancelaria
wpłynęło dnia 27.07.22r.
numer

*KWESTIONARIUSZ-RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY DYSCYPLINY
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja*

Tytuł rozprawy:

Methods of analysis and synthesis for radar signals using chirp rate estimation in the time-frequency domain

Autor rozprawy:

mgr inż. Karol Abratkiewicz

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)**

Trzy tezy rozprawy doktorskiej, sformułowane na str. 19 rozprawy:

- *It is possible to reconstruct a non-linear frequency modulated radar pulse using instantaneous chirp rate estimators in the time-frequency domain.*
- *It is possible to calculate the adaptive chirplet transform using a two-parameter analysis window optimized for the temporal character of the signal.*
- *Derivation of the third-order phase derivative is achievable by means of the short-time Fourier transform.*

określają problem badawczy, który zakłada poszukiwanie efektywnych algorytmów pozwalających na penetrację i ocenę wewnętrznej struktury sygnału niestacjonarnego wykorzystywanego w systemach radarowych. Algorytmy analizy i syntezy sygnałów są ulokowane w płaszczyźnie czas-częstotliwość, co wymaga poszukiwań odpowiednich przekształceń dwuargumentowych, które mogą mieć również formę adaptacyjną, pozwalającą na otrzymanie akceptowalnych dokładności. W celu udowodnienia tez rozprawy doktorskiej autor przeprowadził wiele wnikliwych rozważań teoretycznych w oparciu o bogatą literaturę i własne badania eksperymentalne. W wyniku tych badań powstały unikatowe algorytmy pozwalające na dokładniejszą koncentrację rozkładu energii sygnału na płaszczyźnie czas-częstotliwość (TF), co skutkowało uzyskaniem dokładniejszych (w porównaniu ze znanymi z literatury światowej) estymat parametrów opisujących złożony sygnał nieliniowy (NLFM). Sygnał NLFM to głównie sygnał z nieliniowymi modulacjami fazy, który jest szczególnie trudny do analizy ze względu na dużą liczbę elementów składowych, które mogą być zmienne w czasie i wymagać wspomagającego przetwarzania adaptacyjnego. Dodatkowo analizowany sygnał, odebrany przez urządzenia odbiorcze, może być mocno zakłócany szumami, czy też swoimi opóźnionymi i zakłócanymi kopiami w wyniku wielodrogowości. Niektóre parametry

E. Świercz

modulacji częstotliwościowej, takie jak na przykład zmienny w czasie parametr Chirp Rate $\alpha(t)$ oznaczany skrótową nazwą (CR) czy zmienny w czasie parametr kątowy $\beta(t)$ nazywany Angular Jerk (AJ), są szczególnie ważne w analizowanym sygnale, a ich dokładne oszacowanie decyduje o możliwości odzyskania sygnału oryginalnego z możliwie małym błędem. Jest to szczególnie ważne w rozpoznaniu elektronicznym, na arenie walki elektronicznej oraz radiolokacji pasywnej, gdzie nie jest dostępna informacja a priori o nadanym sygnale oryginalnym, a pożądana jest dokładna wiedza o tym sygnale w odbiorniku. W pracy pokazano, że jest możliwa estymacja składowych nieliniowych fazy i amplitudy sygnału, wykorzystując dostatecznie złożone algorytmy przetwarzania zarówno znane w literaturze, jak i te zaproponowane przez Doktoranta.

W recenzowanej rozprawie Autor jasno i zrozumiale prezentuje opracowane przez siebie algorytmy, a ich działanie ilustruje wynikami eksperymentów numerycznych na sygnałach syntetycznych i odebranych z fizycznych urządzeń radarowych.

Recenzent stwierdza, że cele rozprawy zostały przedstawione jasno i precyzyjnie.

Recenzowaną pracę można zaliczyć do kategorii prac teoretyczno-symulacyjnych.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł/ w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle/ świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Recenzowana rozprawa zawiera 141 pozycji literatury z zakresu tematyki realizowanej w pracy doktorskiej. Przedstawiona literatura jest reprezentatywna w odniesieniu do zagadnień realizowanych w ramach doktoratu. Analiza publikacji jest właściwa i pozwala na ocenę stanu wiedzy obejmującej istotne dla rozprawy doktorskiej zagadnienia przekształceń czas-częstotliwość. Umożliwia to ocenę osiągnięć Doktoranta na tle istniejących rozwiązań, raportowanych w literaturze światowej. Wnioski z przeglądu literatury są formułowane w sposób jasny i przekonujący, wskazując na umiejętność korzystania z odpowiednich źródeł literaturowych.

Dorobek Autora jest imponujący i znacznie przekracza wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. W spisie literatury umieszczono 3 publikacje autorskie, 15 publikacji współautorskich, w których Doktorant jest pierwszym autorem oraz dodatkowo 6 innych pozycji współautorskich. Należy podkreślić, że publikacje te znalazły się w Wykazie *czasopism* naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych, przedstawionym przez Ministerstwo Edukacji i Nauki. W dorobku Doktoranta znajdują się też wysoko punktowane publikacje niezamieszczone w spisie literatury. Wszystkie pozycje literaturowe wskazują na dużą erudycję Autora i duże rozeznanie aktualnego stanu badań w dziedzinie, w której jest ulokowana rozprawa doktorska.

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

Głównym celem rozprawy jest opracowanie obliczeniowo wydajnych algorytmów analizy i syntezy impulsu radarowego NLFM, z oszacowaniem chwilowego parametru CR ($\alpha(t)$) i kąтового parametru AJ ($\beta(t)$) tego sygnału na płaszczyźnie TF. Szczególną uwagę poświęcono estymacji CR, porównując dokładność różnych opcji estymatora w stosunku do teoretycznej granicy dokładności CRLB. Dokładność estymacji ma zasadnicze znaczenie

E. Świerca

zarówno w radarach aktywnych, jak i pasywnych. Aby potwierdzić wszystkie postawione tezy, prowadzono intensywne badania teoretyczne i eksperymentalne, które prowadziły do algorytmów poprawy rozdzielczości i koncentracji rozkładów dwuargumentowych (adaptacyjna STFT, podwójnie adaptacyjna transformacja chirp, wariantowe transformacje reassignment i synchrosqueezing dokonane na STFT), co w konsekwencji zwiększyło nie tylko dokładność oszacowania, ale również pozwoliło w niektórych przypadkach na skrócenie czasu wykonania algorytmów. Zdaniem recenzenta, tezy rozprawy zostały udowodnione jasno i precyzyjnie, a wybrane przez Doktoranta metody realizacji celu pracy wyrażonego przez postawione tezy są właściwe i charakteryzują się bardzo wysokim poziomem zaawansowania.

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?

Oryginalny dorobek Autora zawiera unikalne rozwiązania, stanowiąc twórcze rozszerzenia istniejących algorytmów raportowanych w literaturze światowej:

- Oszacowanie parametrów sygnałów radarowych NLFM pochodzących z systemu ATC kontroli obszaru, co również przedstawiono w pozycji [15] w spisie bibliograficznym rozprawy.
- Opracowanie i weryfikacja numeryczna algorytmu rekonstrukcji sygnałów NLFM przy użyciu danych rzeczywistych, co również przedstawiono w pozycji [11] w spisie bibliograficznym rozprawy.
- Opracowanie i eksperymentalna weryfikacja nowej adaptacyjnej metody optymalizacji szerokości okna w przekształceniu Fouriera (STFT) z wykorzystaniem estymat chwilowych parametru CR. Stosując tę metodę, koncentracja rozkładu energii rzeczywistego sygnału została znacznie polepszona, co również zostało pokazane w pozycji [12] w spisie bibliograficznym rozprawy.
- Opracowanie i weryfikacja podwójnie adaptacyjnej transformacji *chirplet*, dla której zastosowano okno dwuparametrowe. Metoda ta zapewnia znaczną poprawę koncentracji energii sygnału na płaszczyźnie TF co również przedstawiono w pozycji [2] w spisie bibliograficznym rozprawy.
- Wyprowadzenie i zastosowanie w przekształceniu *vertical synchrosqueezing* dodatkowego parametru AJ, co również przedstawiono w pozycjach [3] i [5] w spisie bibliograficznym rozprawy.

W recenzowanej rozprawie Autor jasno i zrozumiale prezentuje opracowane przez siebie algorytmy, a ich działanie ilustruje wynikami eksperymentów numerycznych, tj. analizą sygnałów.

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

Rozprawa, napisana w języku angielskim, jest zredagowana bardzo starannie. Rozprawa jest zawiera 9 rozdziałów, dwa dodatki teoretyczne A i B oraz spis treści. Przyjęty układ treści w sposób konsekwentny wprowadza w tematykę rozpoznania i przetwarzania złożonych sygnałów radarowych z nieliniowymi modulacjami fazy i częstotliwości. Autor rozprawy przedstawia wyniki swoich prac w sposób poprawny i przekonujący. Zamieszczone wzory, tabele i rysunki są czytelne i ułatwiają ocenę wielowariantowych wyników badań.

E. Szilca

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

Rozprawa jest napisana bardzo dobrze zarówno od strony merytorycznej, jak i od strony językowej. Tym niemniej poniżej zostaną omówione najbardziej istotne uwagi dyskusyjne i komentarze, które narzucają się Recenzentowi rozprawy.

Str. 31 - Warto wspomnieć, że proces poprawy jakości estymat, znany pod nazwą refining, po raz pierwszy był przedstawiony w artykule P. O'Shea (IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS, VOL. 46, NO. 3, JULY 2010, pp. 978-987).

Str. 33 - Dotyczy tekstu: *Optimal window selection*. Niezbyt precyzyjna jest nazwa optymalnego okna, ponieważ wybierany jest zbiór H z różnymi długościami okna h i optymalny wskaźnik J (2.34) jest obliczany właśnie dla ustalonego zbioru H i dla każdego $h \in H$. W zbiorze H niekoniecznie znajduje się 'okno globalnie najlepsze'. Również algorytm ICI (intersection-of-the-confidence intervals) nie rozwiązuje precyzyjnie problemu wyboru długości okna w przekształceniu STFT.

Str. 34 - Wektor $P = [a_0; a_1; \dots a_n]$ w przekonaniu Recenzenta jest raczej wektorem współczynników wielomianu częstotliwości, ale taka notacja jest konsekwentnie utrzymywana w całej rozprawie, więc w zasadzie nie ma to znaczenia.

Str. 52 - Proszę o wyjaśnienie zależności (4.34), opisującej zmiany wartości średniej od czasu rozważanego procesu ukrytego w szumie białym. Granica Rao-Cramera daje poprawne oszacowanie dla estymatorów nieobciążonych. Czy istnieją przesłanki, że rozważane estymatory można uważać za estymatory nieobciążone?

Str. 60 -.Rys. 5.2 ma różne zakresy osi czasu. Rys.5.2a pokazuje przebieg modulacji częstotliwości w spektrogramie w przedziale czasu $(0-500) \cdot 10e-6$ [s], podczas gdy 'accelerogram' pokazuje CR w przedziale $(0-100) \cdot 10e-6$ [s]. Analizując te dwa wykresy łącznie, 'accelerogram' pokazuje przedział czasu, w którym sygnał nie występuje.

Str. 63 - Uwaga dotyczy tej samej niespójności czasowej zaobserwowanej na Rys. 5.5.

Str. 77 - Jaka może być dolna granica SNR (Rys. 6.8), dla której akceptowalna jest jakość estymacji parametru α wynikająca z zależności (6.1), (6.3) i (6.16) sygnału NLFM? SNR=10 dB, SNR=20 dB, SNR=30 dB to raczej duże wartości.

Str. 96 - We wzorze (7.12), po prawej stronie równości brakuje wielkości, która jest uzależniona od czasu.

Str. 114 - We wzorze (7.30) brakuje dookreślenia γ - rzędu entropii Renyi ($\gamma=3?$).

Str. 124 - Amplituda modelu sygnału z równania (8.2) jest przedstawiona w równaniu (8.3). Czy jest jakieś uzasadnienie potrzeby wprowadzenia do modelu modulacji amplitudy nieliniowości trzeciego rzędu. Jaką rolę w tej modulacji amplitudy pełni Δ_x ? Czy jest to model zaproponowany przez doktoranta? W numerycznym eksperymencie tego modelu sygnału wykorzystano jednak amplitudę o stałej wartości ($T_x \rightarrow \infty$).

Str. 133 - Dotyczy frazy *for the wavelet toolbox* – powinno być *for the wavelet transform(s)*.

E. Sznajder

Str. 135 - Dotyczy frazy *k-th order modulation operator* – jaka jest formuła tego operatora?

Str. 136 - Sygnał modelowany równaniami (8.61) i (8.62) wykorzystywany do badań symulacyjnych, ma skomplikowaną strukturę zawierającą zarówno nieliniową modulację amplitudy, jak i nieliniową modulację fazy. Czy wybór modelu i jego parametrów był podyktowany względami fizycznymi? Na tym sygnale testowano efektywność różnych wariantów operatora *synchronsqueezing*. Czy taki model ma związek z sygnałami radarowymi występującymi w rzeczywistości, czy jest to tylko eksperyment numeryczny?

Recenzent proponuje, aby podczas publicznej obrony Autor rozprawy odniósł się do zamieszczonych wyżej uwag i pytań natury polemicznej.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Nie ulega wątpliwości, że rola radarów jako swoistych czujników jest ogromna zarówno w aplikacjach militarnych, jak i cywilnych. Radar wykorzystuje różne zakresy fal elektromagnetycznych, które mogą z łatwością przenikać struktury materiałowe lub mogą się odbijać od oświetlanych przez radar obiektów, niosąc do odbiornika informację zawartą w fali odbitej o pozycji i prędkości poruszania się obiektu. Można pokusić się o stwierdzenie, że odbiornik odkrywa z otrzymanych danych wiedzę o obiektach. Zastosowanie technik i algorytmów przetwarzania sygnałów, zaproponowanych przez Doktoranta, znacznie rozszerza możliwości pozyskania tej informacji. Ma to kluczowe znaczenie nie tylko w zadaniach rozpoznania na polu walki elektronicznej czy w radarach pasywnych i aktywnych, ale również w ocenie niestacjonarnych sygnałów biologicznych, sygnałów audio, czy sygnałów w przyrodzie, o skomplikowanej niestacjonarnej naturze wewnętrznej. Dlatego też Recenzent uważa, że podjęty przez Autora temat badań naukowych jest bardzo ważny, a osiągnięte przez Doktoranta rezultaty stanowią istotny wkład w rozwój algorytmów przetwarzania sygnałów niestacjonarnych.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

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

Zadania badawcze, które postawił przed sobą Doktorant, charakteryzują się bardzo wysokim poziomem merytorycznym i zostały w sposób poprawny sformułowane i rozwiązane. Doktorant dobrał właściwe, nowoczesne i zaawansowane metody osiągnięcia zamierzonych celów rozprawy. Biorąc pod uwagę powyższą opinię proponuję zaliczenie rozprawy do kategorii

e) - wybitnie dobra zasługująca na wyróżnienie.

Zgodnie z zaprezentowaną powyżej oceną merytoryczną rozprawy Pana mgr inż. Karola Abratkiewicza 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.

e. Smuga

Nr 65 z 2003 r., poz. 595, z późn. zm.) oraz 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. Karola Abratkiewicza do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja w Politechnice Warszawskiej.

Ewa Świerca

E. Świerca