

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  $(0-500) \cdot 10^{-6}$  [s], podczas gdy 'accelerogram' pokazuje CR w przedziale  $(0-100) \cdot 10^{-6}$  [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  $\alpha$  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  $\gamma$  - 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  $\Delta_x$ ? 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. Szwed

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