

**KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY  
DYSCYPLINY NAUKOWEJ AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA  
WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ**

Tytuł rozprawy: **Zastosowanie algorytmu dopasowania kroczącego do wyznaczania macierzy kowariancji zakłóceń w przestrzenno-czasowym adaptacyjnym przetwarzaniu sygnałów**

Autor rozprawy: **mgr inż. Anna ŚLESICKA**

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

Rozprawa doktorska mgr inż. Anny Ślesickiej dotyczy opracowania nowatorskiej metody estymacji macierzy kowariancji zakłóceń, jaka może być wykorzystana w adaptacyjnym przestrzenno-czasowym przetwarzaniu sygnału radarowego STAP (ang. *Space-Time Adaptive Processing*). Technika ta, operuje jednocześnie w dziedzinie czasowej oraz przestrzennej i stosuje się ją do wykrywania wolno poruszających się obiektów naziemnych na tle zakłóceń pasywnych oraz aktywnych.

Praca składa się z wprowadzenia (w którym przedstawiony został cel, teza pracy i wkład własny Autorki dysertacji) oraz trzech kolejnych rozdziałów wraz z wynikami badań symulacyjnych, w których opisane zostało przestrzenno-czasowe adaptacyjne przetwarzanie sygnałów, estymacja macierzy kowariancji (w tym: metody statystyczne i niestatystyczne estymacji macierzy kowariancji zakłóceń z wykorzystaniem technik rzadkiego odzyskiwania) oraz analiza wydajności opracowanego algorytmu w aspekcie tłumienia zakłóceń i precyzyjnej detekcji obiektów. Dysertabilną częścią rozprawy jest trzeci rozdział pracy dotyczący estymacji macierzy kowariancji zakłóceń, będącej głównym elementem rozprawy, w którym poddano analizie sposoby wyznaczania ww. macierzy oraz scharakteryzowane zostały wybrane algorytmy, a w szczególności algorytm dopasowania kroczącego.

Autorka sformułowała *explicite* jedną tezę, której poświęciła odpowiednio trzeci i czwarty rozdział pracy, w następującym brzmieniu: „*Zastosowanie modelu geometrii radaru MIMO oraz algorytmu dopasowania kroczącego (OMP-STAP) do estymacji macierzy kowariancji zakłóceń w technice STAP, pozwala na wykrycie obiektu na tle zakłóceń niejednorodnych*”. Metoda ta nie wymaga zapewnienia dużej ilości komórek treningowych, co znacznie wpływa na ograniczenie złożoności obliczeniowej algorytmu.

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

Opiniowana rozprawa doktorska ma charakter teoretyczno-empiryczny, o czym świadczy rzeczowa analiza teoretyczna opracowanej metody OMP-STAP (ang. *Orthogonal Matching Pursuit* STAP) dokonana w rozdziale drugim i trzecim przedmiotowej rozprawy oraz przeprowadzone badania symulacyjne w zakresie stosowalności opracowanego algorytmu, jakie zostały przedstawione w rozdziale czwartym.

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

Bibliografia zawiera 83 pozycje, w tym artykuły i książki, które w mojej ocenie są dobrane właściwie, a bogaty spis literatury oraz wynikająca z niego obszerna analiza aktualnego stanu nauki i badań w skali światowej świadczy o dużej wiedzy i kompetencjach Doktorantki. Tym samym Autorka pracy w poprawny sposób powołuje się na literaturę w treści swej dysertacji.

We wprowadzeniu, formułując cel i tezę pracy oraz w dwóch kolejnych rozdziałach, Doktorantka powołując się na literaturę, przedstawiła algorytmy dotyczące przestrzenno-czasowego adaptacyjnego przetwarzania sygnału radarowego STAP. Szczególnie należy zauważyć gruntowną i bardzo wnikliwą analizę literatury światowej w rozdziale 3 zatytułowanym „Estymacja macierzy kowariancji zakłóceń”, w którym przedstawione zostały metody statystyczne estymacji macierzy kowariancji zakłóceń, tj. metoda SMI STAP (ang. *Sample Matrix Inversion* STAP) oraz metoda GIP z modyfikacjami (ang. *Generalized Inner Product*) wraz ze wskazaniem ich potencjalnych wad takich jak niekontrolowane odrzucenie użytecznych próbek sygnału, czy brak analizy właściwości statystycznych komórki testowanej, w rezultacie czego powstaje mało dokładna estymacja macierzy kowariancji zakłóceń, a tym samym, spadek wydajności STAP. Autorka pracy dokonała również wnikliwej analizy w zakresie niestatystycznych metod estymacji macierzy kowariancji zakłóceń na bazie metody KA-STAP (ang. *Knowledge-Aided* STAP) oraz metody D3 STAP (ang. *Direct Data Domain* STAP). W pierwszej z nich dokonała analizy dwóch algorytmów służących wyznaczeniu optymalnej wartości współczynnika wagowego  $\alpha_x$  tj. algorytmu CC-KA-STAP (ang. *Convex Combination* KA-STAP) oraz ML-KA-STAP (ang. *Maximum Likelihood* KA-STAP) porównując wydajność obu tych mechanizmów. W aspekcie drugiej metody (D3 STAP) Autorka pracy dokonała analizy dwóch algorytmów, tj. D3 LS (ang. *Direct Data Domain Least Square*) w sensie najmniejszych kwadratów oraz algorytmu D3 SR (ang. *D3 Sparse Recovery*), który wykorzystuje rzadkość macierzy zakłóceń. W odniesieniu do algorytmu D3-STAP, na bazie pracy M. Li, G. Sun oraz Z. He Dyplomantka poddała również analizie zmodyfikowaną wersję ww. algorytmu o nazwie D3-STAP-ANM (ang. *D3-STAP Atomic Norm Minimization*) porównując finalnie ww. zmodyfikowany algorytm z metodami D3 LS i D3 SR w aspekcie stosunku sygnału do sumy zakłóceń i szumów w odniesieniu do optymalnego procesora STAP (rys. 3.7, str. 53 dysertacji).

Podsumowując, Dyplomanta wykazała zdecydowanie gorszą wydajność ww. algorytmów z proponowanym przez siebie rozwiązaniem oraz słusznie wywiodła (mając świadomość istniejących ograniczeń algorytmicznych) potrzebę opracowania nowatorskiego algorytmu dopasowania kroczącego do wyznaczania macierzy kowariancji zakłóceń w przestrzenno-czasowym adaptacyjnym przetwarzaniu sygnałów.



Przedstawione przez Autorkę uzasadnienie kontynuacji badań (rozdział 3) uważam za uzasadnione i przekonywujące oraz wynikające z poprawnej oceny stanu wiedzy fachowej w przedmiotowym obszarze, w tym także istotnych osiągnięć badaczy polskich.

**3. Czy autorka rozwiązała postawione zagadnienia, czy użyła właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

Algorytm dopasowania kroczącego OMP do wyznaczania macierzy kowariancji zakłóceń w przestrzenno-czasowym adaptacyjnym przetwarzaniu sygnałów został dokładnie przedstawiony w rozdziale 3, podrozdział 3.3.2 recenzowanej dysertacji. Głównym założeniem było znalezienie reprezentacji sygnału wejściowego w dużym zbiorze arbitralnie dobranych funkcji. Bazując na wiedzy o dekomponowanym sygnale istnieje możliwość doboru tzw. funkcji słownika, co jest główną zaletą ww. algorytmu i minimalizuje ilość próbek sygnału wejściowego, jakie poddawane są procesowi przetwarzania, str. 59÷63 dysertacji.

Podejście zaprezentowane przez Doktorantkę jest ciekawe i nowatorskie nie mające swego odzwierciedlenia w doniesieniach literaturowych w skali międzynarodowej.

Zatem zagadnienia, które podjęła Autorka rozprawy zostały szczegółowo rozważone i w pełni rozwiązane przy użyciu właściwych narzędzi matematycznych oraz z powodzeniem zaimplementowane w środowisku Matlab, o czym bezspornie świadczy Załącznik A, Załącznik B oraz Załącznik C.

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

W mojej opinii, poczynione przez Autorkę analizy w przedmiotowej dysertacji jak i w samodzielnych i współautorskich publikacjach można uznać za w pełni oryginalne. Zaproponowanie i opracowanie nowatorskiego algorytmu dopasowania kroczącego do wyznaczania macierzy kowariancji zakłóceń w przestrzenno-czasowym adaptacyjnym przetwarzaniu sygnałów, zbadanie zakresu stosowalności opracowanego algorytmu, przeprowadzenie analizy stosunku sygnału do sumy zakłóceń i szumu na wyjściu procesora STAP, określenie minimalnej wykrywalnej prędkości obiektu jaką jest w stanie wykryć radar MIMO, analiza wydajności detekcji obiektu w niejednorodnym środowisku zakłóceń oraz analiza wydajności algorytmu OMP-STAP pod kątem tłumienia zakłóceń na podstawie współczynnika poprawy IF (ang. *Improvement Factor*) jednoznacznie świadczy o istotnym wkładzie własnym Autorki pracy i znacząco poszerza wiedzę w zakresie wybranych zagadnień techniki przetwarzania sygnałów radarowych.

Na wysoką ocenę zasługują również publikacje naukowe, w tym czasopismo indeksowane z listy JCR, których Doktorantka jest współautorem. Szczególnie należy wymienić publikację pt. *“An Application of the Orthogonal Matching Pursuit Algorithm in Space-Time Adaptive Processing”*, Sensors, Vol. 20, No.12, 2020. Pani mgr inż. Anna Ślesicka w przypadku tej publikacji jest pierwszym autorem, więc zakładam, że wiodącym.

Pozytywnie oceniam także możliwość zastosowania technicznych uzyskanych przez Doktorantkę wyników do wyznaczania macierzy kowariancji zakłóceń w przetwarzaniu sygnałów oraz ich analizie. Mając na myśli technologie, jakie towarzyszą Walce Elektronicznej EW (ang. *Electronic Warfare*) oraz szeroko pojętemu zagadnieniu akwizycji, przetwarzaniu i rozpoznawaniu sygnałów w obszarach IMINT/ELINT/SIGINT, osiągnięte przez Autorkę wyniki mogą zostać wykorzystane praktycznie.



**5. Czy autorka wykazała 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 108 stron i jest napisana w sposób ścisły i zwięzły. Układ pracy, kolejność i kompletność poszczególnych rozdziałów uważam za dostosowany do tematyki i zakresu badań, jakie zostały podjęte przez Autorkę. Rozprawa jest przygotowana w języku polskim i pod względem poprawności językowej nie budzi moich zastrzeżeń. Przeprowadzone analizy, użyty „aparatus matematyczny” oraz prezentacja badań symulacyjnych przeprowadzonych przez Autorkę są na tyle klarowne i wyczerpujące, że pozwalają na ich pełną ocenę przez recenzenta.

W odniesieniu do reguł językowych oraz zasad pisowni, należy wskazać pewną liczbę błędów, jakie znajdują się w rozprawie. Wprowadzenie nie umniejszają one wartości merytorycznej pracy i przeważnie nie przeszkadzają w odbiorze treści, niemniej jednak jestem w obowiązku zwrócić na nie uwagę:

- a) błąd ortograficzny na str. 39 w ostatnim akapicie: Stąd, aby uwypuklić zasadniczą zaletę stosowania radaru MIMO, jaką nie wątpliwie jest zwiększona rozróżnialność azymutalna względem tego samego radaru... – niewątpliwie jest przykładem zasady ortograficznej, która mówi, że *nie* z przysłówkami utworzonymi od przymiotników zawsze zapisywane jest łącznie;
- b) brak użycia cudzysłowu do wyodrębniania specyficznie użytych wyrazów i wyrażeń w tekście pracy, np. radar musi najczęściej „patrzeć” prosto w ziemię – str. 14, czy „radarowa kostka danych” – str. 15;
- c) szereg błędów gramatycznych, w tym fleksyjnych, charakteryzujących się niepoprawną końcówką fleksyjną, np. str. 33, pierwszy akapit, W niniejszym rozdziale zostaną scharakteryzowane..., str. 39, ostatni akapit, Wirtualny szysk antenowy powoduje, że,...;
- d) błędy gramatyczne, w tym składniowe, polegające na niewłaściwym szyku wyrazów, np. str. 42, pierwszy akapit, ..., korzystając z macierzy kowariancji zakłóceń dla danej komórki testowanej..., itp.
- e) szereg błędów interpunkcyjnych polegających na niewłaściwym użyciu (lub pominięciu) znaku interpunkcyjnego (kropki i przecinka), np. str. 14, drugi akapit, Stąd, często podstawową miarą jakości radaru określa się zdolność do jego selekcji ech pożądaných [ ] Jednym z niezbędnych układów..., - brak kropki po pierwszym zdaniu, Stosując dekompozycję macierzy kowariancji zakłóceń na wektory własne i wartości własne, na podstawie zasady Brennan’a można określić rząd macierzy kowariancji zakłóceń [ ] albowiem jedynie pierwsze ..., - brak przecinka przed spójnikiem albowiem, który wprowadza zdanie składowe (podrzedne), itp.

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

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

- a) Doktorantka w rozdziale 1 przedstawiła tezę, iż zastosowanie modelu geometrii radaru MIMO oraz algorytmu dopasowania kroczącego (OMP-STAP) do estymacji macierzy kowariancji zakłóceń w technice STAP, pozwala na wykrycie obiektu na tle zakłóceń niejednorodnych, postulując jednocześnie, że metoda ta nie wymaga zapewnienia dużej ilości komórek treningowych, co znacznie wpływa na ograniczenie złożoności obliczeniowej algorytmu. W efekcie powyższego, Autorka rozprawy poddała analizie wymiar rzędu macierzy kowariancji zakłóceń (rozdział 2.5), w którym bezpośrednio



wskazuje o wymaganym stopniu swobody systemu radarowego, a tym samym stwierdza, że jest to parametr istotny z punktu widzenia złożoności obliczeniowej przetwarzania STAP. Jak przedstawiono również na rys. 2.8, im wyższa wartość parametru  $\beta$ , tym większy rząd macierzy kowariancji zakłóceń, a to bezpośrednio przekłada się na większą złożoność obliczeniową (większa ilość niezależnych liniowo równań opisujących zakłócenia), str. 31, pierwszy akapit.

W rezultacie Doktorantka na podstawie wykresu rozkładu własnego macierzy kowariancji zakłóceń w zależności od wartości parametru  $\beta$  wnioskuje o złożoności obliczeniowej opracowanego algorytmu. Powyższe wnioskowanie wydaje się być słuszne, niemniej jednak w celu precyzyjnego oszacowania złożoności obliczeniowej opracowanego algorytmu OMP-STAP należałoby dokonać określenia tej złożoności (np. w aspekcie czasu bądź pamięci) przy jednoczesnym określeniu klasy ww. złożoności, np. logarytmicznej  $\Theta(\log n)$ , liniowej  $\Theta(n)$ , kwadratowej  $\Theta(n^2)$ , sześcienniej  $\Theta(n^3)$  czy wielomianowej  $\Theta(n^k+n^{k-1} + \dots + n)$ . Zbadanie złożoności obliczeniowej algorytmu OMP-STAP powinno zostać porównane ze złożonością obliczeniową innych algorytmów do wyznaczania macierzy kowariancji zakłóceń STAP (jaki zostały poddane analizie przez Doktorantkę) w celu porównania uzyskanych wyników i jednoznacznego potwierdzenia słuszności, iż opracowana metoda zmniejsza złożoność obliczeniową algorytmu.

W szeroko pojętej algorytmice, problemy złożoności obliczeniowej bezpośrednio przekładają się na możliwość „wykonania” algorytmu na współczesnych maszynach obliczeniowych, a ponadto istotnie wpływają na czas obliczeń. Mając na myśli potencjalne wykorzystanie opracowanego algorytmu we współczesnych urządzeniach walki elektronicznej, powyższe zagadnienie staje się dość istotne.

- b) Recenzowana praca ma charakter teoretyczno-empiryczny. Badania symulacyjne wykonano w środowisku Matlab, wykorzystując w tym celu wbudowane modele oraz oprogramowanie zaimplementowane przez Doktorantkę, które posłużyło do udowodnienia tezy rozprawy. Istotnie ciekawym doświadczeniem byłoby zbadanie efektywności opracowanego algorytmu OMP-STAP na rzeczywistym zbiorze danych pomiarowych i porównanie otrzymanych rezultatów z danymi symulowanymi w środowisku programistycznym.

Biorąc pod uwagę uzyskaną wartość współczynnika poprawy IF na poziomie ok. 70 dB w aspekcie innych doniesień literaturowych (publikacje 69÷72 z bibliografii), można wnioskować, że opracowany algorytm oraz jego programowa implementacja w środowisku Matlab zachęca do podjęcia praktycznej weryfikacji zaproponowanego rozwiązania.

Powyższe podejście (praktyczne) pozwoliłoby również na zbadanie „zachowania” algorytmu, w sytuacji dodatkowych zakłóceń związanych z ruchem platformy/nośnika radaru MIMO w aspekcie kątów roll, pitch oraz yaw – co w niniejszej dysertacji nie zostało ujęte w analizie.

Wskazane powyżej uwagi nie umniejszają merytorycznej jakości recenzowanej dysertacji i należy je potraktować jako dalsze kierunki prac w obszarze tematyki podjętej przez Doktorantkę.

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

Jak już wspomniałem we wcześniejszych fragmentach recenzji, rozprawa wnosi istotny wkład w zakresie technik przetwarzania sygnałów radarowych. Z całą pewnością można wskazać dwa obszary użyteczności rozprawy, tj.: nauki techniczne (zawartość koncepcyjna pracy poszerza zbiór

algorytmów wykorzystywanych w wyznaczaniu macierzy kowariancji zakłóceń w przestrzenno-czasowym adaptacyjnym przetwarzaniu sygnałów) oraz obronność kraju (ze względu na specyfikę technik radarowych istnieje możliwość wykorzystania w obszarze rozpoznania i walki elektronicznej EW.

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

- a. ~~Nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy~~
- b. ~~Wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania~~
- c. ~~Spełniająca wymagania~~
- d. ~~Spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem~~
- e. Wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Po zapoznaniu się z przedłożoną do recenzji rozprawą doktorską mgr inż. Anny Ślesickiej, stwierdzam, że praca jest wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie i 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 samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z tym, stawiam wniosek o przyjęcie tego opracowania jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie pani mgr inż. Anny Ślesickiej do jej obrony publicznej.

Skierniewice, 01 lipca 2021 r.

