

Białystok, 8 lipca 2021 r.

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

*RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ*

(zlecenie nr 40/RDN AEiE/2021 na podstawie Uchwały Rady Dyscypliny AEE
Wojskowej Akademii Technicznej z dnia 16 czerwca 2021 r.)

Tytuł rozprawy

**Zastosowanie Algorytmu Dopasowania Kroczącego do Wyznaczania Macierzy
Kowariancji Zakłóceń w Przestrzenno-Czasowym Adaptacyjnym Przetwarzaniu
Sygnałów**

Autor rozprawy

Anna Ślesicka

- 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)?**

Celem pracy jest opracowanie niestatystycznej, adaptacyjnej metody wyznaczania macierzy kowariancji zakłóceń w niejednorodnym środowisku zakłócającym na potrzeby radaru MIMO (ang. Multiple Input - Multiple Output). Rozważany jest impulsowy system radarowy z liniowym szykiem antenowym, umieszczony na poruszającej się platformie samolotu. Niestacjonarność zakłóceń wynikająca z niejednorodności i zmian środowiska pracy radaru wraz z trudnością uzyskania istotnych informacji ze złożonej struktury odebranych danych w celu obliczenia użytecznych (i nieosobliwych) oszacowań, sprawia, że problem estymacji macierzy kowariancji zakłóceń ciągle jest otwarty.

Znajomość macierzy kowariancji zakłóceń jest kluczowa i pozwala na efektywną filtrację zakłóceń, detekcję i estymację parametrów obiektu oświetlanego przez radar.

Doktorantka wykorzystała podejście oparte na przetwarzaniu przestrzenno-czasowym (STAP) sygnału odebranego przez radar, w którym estymacja zakłóceń jest ważnym elementem tego procesu. Odebrany przez radar sygnał składający się z echa od obiektu, zakłóceń biernych, czynnych i szumu termicznego ma charakter czasoprzestrzenny i niestacjonarny. Zadaniem przetwarzania STAP jest usunięcie z odebranego echa sygnału zakłóceń, przy zachowaniu składowej pochodzącej od obiektu. Tradycyjne

statystyczne metody STAP oceny widma wymagają założeń o jednorodności rozkładów statystycznych w komórkach odległości, co jest niewykonalne w praktyce z powodu niestacjonarności i niejednorodności zakłóceń. Algorytmy STAP oparte na rzadkiej reprezentacji / rzadkim odzyskiwaniu SR (ang. Sparse Representation) widma zakłóceń w płaszczyźnie ką-Doppler wykazują znacznie lepsze wyniki.

Główny problem naukowy został zawarty w postawionej tezie „**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**”. Teza rozprawy została jasno i precyzyjnie sformułowana. Autorka skupiła się na analizie własności rzadkości niestacjonarnego widma i projekcie słownika w radarze STAP bazując na założeniach algorytmu OMP (ang. Orthogonal Matching Pursuit), zwanego również algorytmem dopasowania kroczącego. Badania symulacyjne tego algorytmu z wykorzystaniem modelu geometrii radaru MIMO do estymacji macierzy kowariancji zakłóceń w technologii STAP, wykazały możliwość wykrycia obiektu wolno poruszającego się po powierzchni Ziemi na tle zakłóceń niejednorodnych i potwierdziły tezę rozprawy. Rozprawa ma charakter teoretyczno-symulacyjny

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 sformulowano w sposób jasny i przekonujący?**

Recenzowana rozprawa zawiera 83 pozycje literatury, obejmujące tematykę realizowaną w pracy doktorskiej. Dobór pozycji literaturowych recenzent uważa za reprezentatywny w odniesieniu do zagadnień realizowanych w ramach doktoratu i wskazuje na dostateczną wiedzę autora obejmującą zagadnienie poruszane w rozprawie.

Dorobek Autorki liczy 3 publikacje - 1 referat na renomowanej konferencji międzynarodowej IRS2020 i dwa artykuły, przy czym jeden artykuł znalazł się na liście "Master Journal List" (100 pkt).

Wnioski z przeglądu literatury są formułowane w sposób przekonujący i wskazują na umiejętność korzystania z odpowiednich źródeł literaturowych.

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

Teza rozprawy została teoretycznie przeanalizowana i symulacyjnie uzasadniona. Zakładane cele - opracowanie metody wykrycia obiektu w radarze MIMO w technice STAP w warunkach niejednorodności środowiska, z wykorzystaniem oszacowanej macierzy kowariancji zakłóceń niestacjonarnych, zostały osiągnięte. Symulacyjne udowodnienie tezy rozprawy wymagało zastosowania zaawansowanych algorytmów estymacji macierzy kowariancji zakłóceń, w tym metod odzyskiwania rzadkiego widma niestacjonarnego z odebranego echa radarowego w radarze MIMO.

Przeanalizowano kilka metod odzyskiwania rzadkiego i pokazano te metody na tle typowych algorytmów estymacji statystycznej, wymagających wielu danych treningowych. Z analizy porównawczej wynikało, że niestatystyczne algorytmy estymacji

widma bazujące na podejściu SR pozwalają na bardziej efektywne numerycznie obliczenie macierzy kowariancji zakłóceń w rozpatrywanym scenariuszu radarowym. Ostatecznie wybrano algorytm OMP (ang. Orthogonal Matching Pursuit) i wykorzystano ten algorytm do estymacji widma zakłóceń, które jest niezbędne do konstrukcji pełnego algorytmu filtracji dopasowanej, pozwalającej na stłumienie zakłóceń i w konsekwencji detekcję i ocenę położenia obiektu w symulacjach zbliżonych do rzeczywistego scenariusza radarowego. Doktorantka wybrała właściwe, zaawansowane metody do udowodnienia postawionej tezy naukowej.

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?**

Zdaniem recenzenta oryginalny dorobek Autorki obejmuje:

Opracowanie kompletnego algorytmu detekcji obiektu ukrytego w zakłóceniach niestacjonarnych wynikających z niejednorodności środowiska zakłóceń w geometrii radaru MIMO z przetwarzaniem STAP z wykorzystaniem podejścia SR do oceny niestacjonarnego widma zakłóceń.

Zbadanie możliwości wybranego algorytmu SR, znanego pod nazwą OMP, pozwalającego na odzyskanie niestacjonarnego widma zakłóceń przy wykorzystaniu niewielkiej liczby danych zawartych w jednym przekroju radarowej kostki danych.

Analizę wpływu parametrów systemu analizowanego modelu MIMO, takich jak: prędkość poruszania się platformy z umieszczonym radarem czy kąt odchylenia ruchu platformy od osi anten, na efektywność odzyskania widma i tłumienia tego widma, wyrażanego przez właściwe parametry poprawy ($SINR$, L_{SINR} , IF). Szczególnie przydatny do oceny możliwości detekcji jest parametr poprawy IF pokazujący zwiększenie ilorazu mocy sygnału do mocy szumu na wyjściu procesora STAP, do ilorazu mocy sygnału do mocy szumu na wejściu procesora STAP, co określa efektywność tłumienia zakłóceń.

Implementację kompletnego oprogramowania systemu detekcji w środowisku MATLAB.

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

Zdaniem recenzenta, przyjęty przez Doktoranta układ treści rozprawy jest klarowny, a podział rozprawy na rozdziały jest prawidłowy.

Pomimo poprawnej struktury rozdziałów i podziału treści, redakcja treści rozprawy zawiera niedociągnięcia, które nie dotyczą merytorycznej zawartości rozprawy, ale powodują, że niektóre zagadnienia są przedstawione w sposób nieprecyzyjny i niejasny, często z wykorzystaniem określeń potocznych.

Przedstawione w następnym punkcie uwagi krytyczne i komentarze nie podważają merytorycznej wartości rozprawy, ani jej waloru naukowego.

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

Recenzent proponuje, aby podczas publicznej obrony rozprawy Doktorantka ustosunkowała się do niektórych ze sformułowanych poniżej uwag dyskusyjnych.

- Słabszą stroną rozprawy jest sposób edycji, ponieważ styl i konstrukcja niektórych zdań utrudnia zrozumienie myśli, którą chciała przekazać Autorka. Częstym błędem językowym jest używanie słowa „ilość” w odniesieniu do rzeczy policzalnych (zamiast prawidłowego słowa „liczba”).
- Str. 26 - nieprecyzyjne tłumaczenie fragmentu z pozycji [6] nie pozwala na zrozumienie sensu dwuwymiarowej mapy statystyki testowej.
„Podana statystyka testowa charakteryzuje się właściwością określonego prawdopodobieństwa fałszywego alarmu (ang. Constant False Alarm Ratio CFAR) [6]. W rezultacie otrzymano rzeczywistą, dwuwymiarową mapę statystyki testowej będącą na wyjściu filtru STAP”.
- Str. 27 - Brakuje określenia unormowanej częstotliwości Dopplera f_D i unormowanej częstotliwości przestrzennej f_s (do czego są odniesione normalizacje częstotliwości).
- Str. 35 - Parametr L_{SINR} jest parametrem strat $L_{\text{SINR}} = \text{SINR}(f_D) / \text{SNR}_0$, a taka nazwa w ogóle nie pojawiła się w rozprawie w odniesieniu do tego parametru.
- Str 43 - W zapisie wektora danych treningowych w równaniu (3.2) pojawia się górny indeks l . Czy indeks ten ma jakieś specjalne znaczenie?
- Str. 46 - Wyjaśnienia wymaga Rys. 3.2 i wniosek wypływający z analizy tego rysunku. Logicznie mniejsza strata SCNR w algorytmie oznacza, że algorytm jest bardziej efektywny, a wyjaśnienie zredagowane przez Autorkę przeczy tej logice.
„Dla metody GIP można zauważyć wcięcie równe około -8 dB dla unormowanej częstotliwości Dopplera równej 0.5 co negatywnie wpływa na jakość tej metody, ponieważ sugeruje występowanie kolejnego obiektu.”
- Str.56 - Należy wyjaśnić dlaczego baza Ψ wykazuje cechy „rzadkie”, ponieważ fraza „przestrzenno-czasowa rzadka baza, często określana mianem słownika może być skonstruowana” pojawiła się jednokrotnie w rozprawie.
- Str. 56 - Należy wyjaśnić, skąd wynika „rzadkość” widma γ , ponieważ fraza „Aby przeanalizować rzadkość γ_t ” sugeruje, że tę właściwość wyjaśnią kolejne równania.
- Str 57 - Odzyskanie czasowo-przestrzennego widma γ ze źle uwarunkowanego równania (3.27) poprzez minimalizację normy l_0 (równanie 3.34) stanowi tzw. NP-trudny problem i jest zastępowane minimalizacją normy l_1 , która staje się zadaniem optymalizacji wypukłej. Powinien być komentarz, że praktyczne algorytmy SR (np. wykorzystywane przez Autorkę algorytm OMP) nie są budowane w wyniku optymalizacji l_0 .
- Str. 58 - Opis normy $L_{u,v}$ z podwójnym indeksem $[u,v]$, występującej we wzorze (3.42), jest nieprecyzyjny.
- Str.59 - Co oznacza indeks 0 w zapisie $Y_0=Y_t$ po zakończeniu t -tej iteracji algorytmu FOCCUS?
- Str.62 - W przykładzie na Rys. 3.10 brakuje doprecyzowania problemu. Należałoby podać równanie układu niedookreślonego, można też porównać odzyskanie wektora częstotliwości f poprzez pseudoinwersję macierzy słownika (rozwiązanie naiwne) oraz przez algorytm OMP z minimalizacją normy l_1 .
- Str.93 – Wydaje się, że w pokazanym przykładzie są pomyłone oznaczenia i dlatego zdanie „Zgodnie z algorytmem OMP, w drugim kroku należy znaleźć największą wartość iloczynu skalarnego poszczególnego atomu z wektorem Y ” nie jest właściwe, ponieważ nie znamy Y , a wykonujemy iloczyn skalarny. W równaniu C5, macierz X

jest wynikiem odebranych przez radar i jest znana, a wynikiem OMP jest odzyskanie widma Y .

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Cel badawczy postawiony przez Autorkę jest ambitny. Doktoranta podejmuje problem o niewątpliwie istotnym znaczeniu praktycznym, wnosi oryginalny wkład intelektualny w postaci modyfikacji wybranych algorytmów SR na potrzeby przetwarzania STAP w geometrii radaru MIMO.

Technologia STAP wymaga bardzo dużych szybkości przetwarzania numerycznego, co niewątpliwie zapewnia iteracyjny, o małej złożoności obliczeniowej sposób obliczenia widma w algorytmie dopasowania kroczącego (OMP – STAP). Radar szybki, radar dokładny – to ciągle wyzwanie zarówno teoretyczne, jak i technologiczne.

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.

W moim przekonaniu opiniowana rozprawa stanowi opis samodzielnego rozwiązania problemu badawczego, a jej treść i poziom merytoryczny świadczy o zadowalającym poziomie wiedzy Autorki w podstawowej dyscyplinie naukowej, w której ulokowana jest rozprawa. Niektóre cele badawcze prezentowane w rozprawie zostały zweryfikowane przez grono recenzentów współautorskiego artykułu zamieszczonego w czasopiśmie *Sensor*, w którym Autorka przedstawiła niektóre wyniki swoich badań.

Jednocześnie na publicznej obronie, w zależności od odpowiedzi Doktorantki na uwagi w recenzji, Recenzent zostawia sobie możliwość wnioskowania o zmianę kategorii i wybór kategorii.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa 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.

Zgodnie z zapisem 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) wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Ślesickiej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.

Ewa Sztaur