



**Prof. dr hab. inż. Adam Kowalewski**

Tel: (12) 617-28-51, fax: (12) 634-15-68,  
e-mail: ako@agh.edu.pl

**Akademia Górniczo-Hutnicza,  
Katedra Automatyki i Robotyki  
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30**

Kraków, dnia 6 lipca 2021 roku

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani por. mgr inż. Anny Ślesickiej  
pt. „Zastosowanie algorytmu dopasowania kroczącego do wyznaczania macierzy  
kowariancji zakłóceń w przestrzenno-czasowym adaptacyjnym przetwarzaniu sygnałów”**

Przedstawiona recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej por. mgr inż. Anny Ślesickiej absolwentki studium doktoranckiego na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie zatytułowanej „Zastosowanie algorytmu dopasowania kroczącego do wyznaczania macierzy kowariancji zakłóceń w przestrzenno-czasowym adaptacyjnym przetwarzaniu sygnałów”.

Promotorem opiniowanej rozprawy doktorskiej jest **Prof. dr hab. inż. Adam Kawalec**.

Recenzję przygotowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Pana Prof. dr hab. inż. Jana K. Jabczyńskiego z Instytutu Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie działającego na podstawie uchwały Rady Dyscypliny o powołaniu recenzentów z dnia 16 czerwca 2021 roku.

**I. Zawartość rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu stosowanych skrótów i najważniejszych symboli, spisu treści, pięciu rozdziałów, spisu literatury zawierającego 83 pozycje oraz 3 załączników.

We wstępie (rozdział 1) zaprezentowano wprowadzenie do tematyki przestrzenno-czasowego adaptacyjnego przetwarzania sygnałów STAP, a następnie przedstawiono cel i zakres rozprawy oraz sformułowano tezę rozprawy.

W rozdziale 2 omówiono podstawy przestrzenno-czasowego adaptacyjnego przetwarzania sygnałów. Przedstawiono model geometrii systemu radarowego zainstalowanego na statku powietrznym oraz modele poszczególnych sygnałów pochodzących od obiektu, a także zakłóceń i szumu. Zaprezentowano również opis najważniejszych parametrów

charakteryzujących procesor STAP. Omówiono zalety stosowania radaru MIMO, a także przebieg algorytmu przetwarzania STAP.

Rozdział 3 poświęcono omówieniu estymacji macierzy kowariancji zakłóceń, będącej głównym elementem rozprawy. Poddano analizie sposoby jej wyznaczania. Zaprezentowano metody statystyczne oraz niestatystyczne estymacji macierzy kowariancji zakłóceń. Przedstawiono również metodę estymacji macierzy kowariancji z wykorzystaniem techniki rzadkiego odzyskiwania za pomocą algorytmu M-FOCUSS. Omówiono również algorytm dopasowania kroczącego OMP zwany często algorytmem „pogoni z dopasowaniem”.

W rozdziale 4 zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych zaproponowanej metody. Badania symulacyjne miały na celu weryfikację przyjętych założeń modeli oraz metod zawartych w analizie teoretycznej. W wyniku szeregu symulacji potwierdzono przyjętą tezę rozprawy.

Z kolei w rozdziale 5 przedstawiono wnioski oraz uwagi na temat uzyskanych wyników z przeprowadzonych badań i możliwe kierunki dalszych prac badawczych.

W załącznikach A i B zamieszczono odpowiednio kod źródłowy głównego programu symulującego zastosowanie zaproponowanego algorytmu dopasowania kroczącego OMP do przetwarzania STAP w środowisku MATLAB oraz kod źródłowy wykorzystanych funkcji w głównym programie. Z kolei w załączniku C przedstawiono przykład wykorzystania algorytmu OMP oraz podstawowe obliczenia wykonywane w przetwarzaniu STAP na standardowych parametrach systemu radarowego.

## II. Uwagi ogólne

Przestępując do oceny merytorycznej opiniowanej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że rozprawa doktorska jest **bardzo dobrze napisana**.

Recenzowana rozprawa zawiera dobrze sformułowany, oryginalny i ważny problem naukowy oraz prezentuje poprawne rozwiązanie tego problemu, które zostało uzyskane przez Autorkę rozprawy samodzielnie i przy użyciu poprawnej metodologii naukowej. Tak więc już na podstawie wstępnej analizy można stwierdzić, że jest to dzieło bardzo wartościowe, zdecydowanie odpowiadające wymaganiom stawianym przez odnośną ustawę.

Autorka rozprawy podjęła bardzo ambitne zadanie, ponieważ problematyka zastosowania algorytmu dopasowania kroczącego do wyznaczania macierzy kowariancji zakłóceń w przestrzenno-czasowym adaptacyjnym przetwarzaniu sygnałów stanowi bardzo trudny dział radioelektroniki i adaptacyjnego przetwarzania sygnałów.

Uzyskane przez Autorkę rezultaty są bardzo interesujące i wartościowe, a zwłaszcza opracowanie nowej metody estymacji macierzy kowariancji zakłóceń będącej kluczowym etapem w przestrzenno-czasowym adaptacyjnym przetwarzaniu sygnałów-STAP oraz badania symulacyjne potwierdzające skuteczności zaproponowanego algorytmu przetwarzania STAP.

**W sumie Autorka rozprawy wykazała szeroką wiedzę w trudnej dziedzinie teorii sygnałów, teorii procesów stochastycznych, rachunku macierzowego, metod optymalizacji oraz metod symulacyjnych i umiejętność jej twórczego zastosowania do uzyskania nowych i wyróżniających rezultatów o charakterze teoretycznym oraz aplikacyjnym.**

### III. Oryginalne osiągnięcia

Głównym celem dysertacji było zbadanie możliwości zastosowania nowej, niestatystycznej metody estymacji macierzy kowariancji zakłóceń bazującej na zastosowaniu modeli MIMO, jak również algorytmu dopasowania kroczącego OMP.

Zagadnienia badawcze w rozprawie są poświęcone w szczególności analizie znanych i aktualnie stosowanych metod estymacji macierzy kowariancji zakłóceń wraz z porównaniem metod statystycznych oraz niestatystycznych estymacji macierzy kowariancji zakłóceń w środowisku niejednorodnym i wskazanie aktualnie pożądanego kierunku badań nad opracowaniem nowych, skutecznych metod estymacji tej macierzy kowariancji.

Zasadniczym celem rozprawy było opracowanie nowotarskiej metody wyznaczania macierzy kowariancji zakłóceń w technice STAP. Opracowana metoda musi uwzględnić wykorzystanie radaru MIMO oraz algorytmu OMP.

Głównym celem jaki postawiła sobie Autorka rozprawy jest udowodnienie sformułowanej przez nią następującej tezy:

**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.**

Powyższa metoda nie wymaga zapewnienia dużej ilości komórek treningowych **co znacznie wpływa na ograniczenie złożoności obliczeniowej algorytmu.**

W ramach realizacji sformułowanego celu rozprawy **uzyskano nowe, oryginalne, wyróżniające rezultaty do których zaliczam:**

1. Opracowanie nowej metody estymacji macierzy kowariancji zakłóceń będącej kluczowym etapem w przetwarzaniu STAP.
2. Badania symulacyjne potwierdzające skuteczność zaproponowanego algorytmu.
3. Zastosowanie algorytmu dopasowania kroczącego do estymacji macierzy kowariancji zakłóceń w środowisku niejednorodnym.
4. Badania symulacyjne mające na celu określenie wpływu złożoności obliczeniowej metody STAP.
5. Kod źródłowy głównego programu symulującego zastosowanie zaproponowanego algorytmu dopasowania kroczącego OMP do przetwarzania STAP w środowisku MATLAB – Załącznik A.
6. Kod źródłowy wykorzystanych funkcji w głównym programie – Załącznik B.
7. Przykład wykorzystania algorytmu OMP oraz podstawowe obliczenia wykonywane w przetwarzaniu STAP na standardowych parametrach systemu radarowego – Załącznik C.

**Należy zatem stwierdzić, że sformułowany cel rozprawy został osiągnięty, a jej Autorka wykazała się szeroką wiedzą i umiejętnościami niezbędnymi do samodzielnego rozwiązywania nowych, oryginalnych problemów naukowo-technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.**

#### IV. Uwagi i komentarze

Pomimo, że recenzowana rozprawa doktorska jest napisana pod względem merytorycznym bardzo dobrze, to nasuwają się pewne uwagi natury dyskusyjnej, a mianowicie:

1. Przykład wykorzystania algorytmu OMP oraz podstawowe obliczenia wykonane w przetwarzaniu STAP na standardowych parametrach systemu radarowego.
2. Implementacja opracowanej metody przetwarzania STAP poprzez wykorzystanie oprogramowania w środowisku MATLAB.
3. Wykorzystanie właściwości radaru pracującego w trybie MIMO.
4. Idea algorytmu M-FOCUS i jego efektywność.
5. Problem optymalizacji wspólnego rzadkiego odzyskiwania w oparciu o kompletną rzadką bazę wektorów sterujących.
6. Na jakie trudności merytoryczne napotkała Autorka rozprawy przy wykonywaniu podstawowych obliczeń na standardowych parametrach systemu radarowego.
7. Idea nowej metody D3-STAP i jej efektywność.
8. Technika wygładzania subapertury.
9. Definicja iloczynu tensorowego.
10. Definicja iloczynu Hadamarda.
11. Określenie wpływu złożoności obliczeniowej metody STAP poprzez wykorzystanie rozkładu własnego macierzy kowariancji oraz wyznaczenie za pomocą równania Brennan'a rzędu macierzy kowariancji.
12. Zastosowanie algorytmów M-FOCUS oraz OMP w telekomunikacji.
13. Który rezultat uzyskany w rozprawie Autorka dysertacji uważa za najcenniejszy i najbardziej oryginalny?
14. Dalszy kierunek badań.

Natomiast do uwag natury redakcyjnej zaliczam drobne usterki językowe, a mianowicie:

Str. 26 Zdanie (2 wiersz od góry): „ Wartość  $\varepsilon$  **będącego** skalarzem w zależności na wektor wag (2.13) można wyznaczyć ...” jest niezbyt precyzyjne.

Str.29 Zdanie (3 wiersz od góry): „ Podsumowując **powyższe** należy zaznaczyć, ...” jest niezbyt precyzyjne.

Str.33 Zdanie (4 wiersz góry): W niniejszym podrozdziale zostaną **scharakteryzowana** najczęściej spotykane ...” jest niezbyt precyzyjne.

Str.39 Zdanie (3 wiersz od dołu): „ ... **powoduję**, że wzrasta gwałtownie możliwość dokładniejszego ...” jest niezbyt precyzyjne.

Str.40 Zdanie (9 wiersz od góry): „ **być otrzymane** ...” jest niezbyt precyzyjne.

Str.42 Zdanie (20 wiersz od góry): „ **a to dalej na błędne...**” jest niezbyt precyzyjne.

Str. 52 Zdanie (4 wiersz od dołu): „**Ten proces** wykonywany jest poprzez...” jest niezbyt precyzyjne.

Str. 71 Zdanie (1 wiersz od góry): „ ... **Występuję pojedynczo...**” jest niezbyt precyzyjne.

Str. 78 Zdanie (21 wiersz od góry): „ Otrzymano precyzyjne dane dotyczące obiektu **każą wynieść...**” jest niezbyt precyzyjne.

Oczywiście przytoczone powyższe uwagi i komentarze mają charakter dyskusyjny oraz typowo redakcyjny i nie mają żadnego związku z wyróżniającą oceną merytoryczną recenzowanej rozprawy.

## V. Ocena ogólna, wnioski końcowe

Opiniowana rozprawa doktorska robi generalnie **bardzo korzystne wrażenie** i nie ulega wątpliwości, że jako rozprawa doktorska może być zaopiniowana **bardzo pozytywnie**.

**Autorka rozprawy wykazała bardzo szeroką wiedzę w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika oraz umiejętność jej twórczego zastosowania do uzyskania nowych, oryginalnych, zasługujących na wyróżnienie rezultatów.**

Zatem dokładniejsza analiza uzyskanych w pracy rezultatów składa mnie do wniosku, że jest to rozprawa doktorska **znacznie przekraczająca ustawowe oraz zwyczajowe wymagania**.

Powyższe stwierdzenie motywuję faktem, że tematyka podjęta w rozprawie ma unikalny charakter badawczy o bardzo dużym znaczeniu praktycznym. Powyższa tematyka dotyczy problemów związanych z technologią adaptacyjnego przetwarzania przestrzenno-czasowego sygnału STAP obecnie najczęściej stosowaną techniką w systemach radarowych, szczególnie w przypadku występujących zakłóceń, co jest bardzo istotnym zagadnieniem dla systemów radiolokacyjnych umieszczonych na ruchomej platformie latającej. Przetwarzanie radarowe STAP łączy filtrowanie czasowe i przestrzenne, które może być używane zarówno do podwyższania ilorazu sygnał/zakłócenie oraz do wykrywania wolno poruszających się celów naziemnych na tle zakłóceń biernych. Technologia ta wymaga jednak bardzo wysokich szybkości przetwarzania numerycznego, co wiąże się z zastosowaniem algorytmów o niewielkiej złożoności obliczeniowej. Podstawowym elementem algorytmu przetwarzania STAP jest poprawne wyznaczenie macierzy kowariancji zakłóceń. Głównym celem rozprawy było zbadanie możliwości zastosowania nowej niestatystycznej metody estymacji macierzy kowariancji zakłóceń bazującej na zastosowaniu modelu radaru MIMO oraz algorytmu dopasowania kroczącego OMP.

Problemy badawcze zaprezentowane w dysertacji doktorskiej dotyczą w szczególności analizy znanych i aktualnie stosowanych metod estymacji macierzy kowariancji zakłóceń wraz z porównaniem metod statystycznych oraz niestatystycznych estymacji macierzy kowariancji zakłóceń w środowisku niejednorodnym i wskazanie aktualnie pożądanego kierunku badań nad opracowaniem nowych skutecznych metod estymacji tej macierzy kowariancji.

Zasadniczym problemem badawczym rozprawy było opracowanie i badania symulacyjne wykorzystania modelu geometrii radaru MIMO oraz algorytmu dopasowania kroczącego do estymacji macierzy kowariancji zakłóceń w technologii STAP, co umożliwi wykrycie obiektu na tle zakłóceń niejednorodnych i jednocześnie pozwala na znaczne ograniczenie złożoności obliczeniowej algorytmu. Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły postawioną przez Doktorantkę tezę dysertacji.

W mojej ocenie do oryginalnych elementów rozprawy należy zaliczyć:

1. Opracowanie nowej metody estymacji macierzy kowariancji zakłóceń będącej kluczowym etapem w przetwarzaniu STAP.

2. Badania symulacyjne potwierdzające skuteczność zaproponowanego algorytmu.
3. Zastosowanie algorytmu dopasowania kroczonego do estymacji macierzy kowariancji zakłóceń w środowisku niejednorodnym.
4. Badania symulacyjne mające na celu określenie wpływu złożoności obliczeniowej metody STAP.

Autorka rozprawy opublikowała dotychczasowe wyniki swoich badań w Biuletynie WAT oraz na konferencji międzynarodowej IRS (International Radar Symposium). Na szczególną uwagę zasługuje publikacja z listy „Master Journal List” (100 punktów).

**W trakcie realizacji rozprawy Doktorantka wykazała bardzo dużą samodzielność, pomysłowość, pasję poznawczą oraz inicjatywę twórczą w rozwiązywaniu złożonych zagadnień badawczych.**

Autorka rozprawy udowodniła, że możliwa jest estymacja macierzy kowariancji zakłóceń STAP poprzez zastosowanie modelu geometrii radaru MIMO oraz algorytmu dopasowania kroczonego (OMP).

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi jedną z niewielu pozycji literaturowych w języku polskim dotyczącej STAP. Stanowi ona oryginalny wkład do rozwoju wiedzy oraz techniki radarowej w Polsce. Jednocześnie powyższa pozycja, poprzez opublikowanie niektórych jej rezultatów w renomowanym czasopiśmie zagranicznym, stanowi ważny przyczynek do rozwoju dziedziny jaką jest STAP.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska oraz znaczący dorobek naukowy (w załączniku) Autorki dysertacji **stanowią podstawę do postawienia wniosku o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.**

**W podsumowaniu stwierdzam, że**

1. **Recenzowana rozprawa doktorska Pani por. mgr inż. Anny Ślesickiej spełnia wszystkie wymagania odnośnej ustawy sejmowej.**
2. **Rozprawa doktorska zasługuje na wyróżnienie.**

**Wnoszę o przyjęcie rozprawy oraz jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Adam Kowalewski