

R E C E N Z J A
rozprawy doktorskiej
pt.: *Efektywna metoda budowy świadomości sytuacji elektromagnetycznej*
w radiowych sieciach doraźnych z węzłami kognitywnymi
mgra inż. Pawła Skokowskiego

1. Podstawa prawna i układ wykonanej recenzji

Podstawą wykonania niniejszej recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) im. Jarosława Dąbrowskiego, prof. dr hab. inż. Andrzeja Dobrowolskiego z dnia 25 września 2019 r., w związku z powołaniem mnie przez Radę tego Wydziału na recenzenta rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Skokowskiego.

Recenzja ta została opracowana na podstawie wytycznych Rady Wydziału WAT. W związku z powyższym, przedmiotowa recenzja zawiera:

- cel badań (w odniesieniu do tej rozprawy);
- charakter rozprawy;
- sposób przeprowadzenia analizy źródeł; sposób formułowania wniosków wynikających z analizy źródeł;
- rozwiązanie przedstawionego zadania, właściwości przyjętych metod i założeń;
- oryginalność rozprawy, samodzielny dorobek Autora, pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy (poziomu techniki) prezentowanego w literaturze światowej;
- poprawność przedstawienia uzyskanych wyników (zwięzłość, jasność, umiejętność przekonywania, poprawność redakcyjna);
- słabe strony rozprawy, jej główne wady;
- przydatność rozprawy dla nauk technicznych, przemysłu, obronności kraju, itp.;
- podsumowanie (czy rozprawa spełnia wymagania przez obowiązujące przepisy).

2. Cel badań (w odniesieniu do tej rozprawy)

Rozprawa dotyczy wybranych zagadnień związanych z metodami monitorowania widma sygnałów radiowych do budowy tzw. świadomości sytuacji elektromagnetycznej. Celem głównym było opracowanie nowej metody monitorowania widma dla potrzeb efektywnej oceny zajętości zasobów radiowych.

W rozprawie Doktorant podjął się udowodnienia naukowymi metodami następującej tezy: *kooperacyjna scentralizowana metoda monitorowania widma z wykorzystaniem detektora ENP-ED (przyp. rec. Estimate Noise Power – Energy Detector) z progiem decyzyjnym wyznaczonym za pomocą kryterium Neymana-Pearsona i metodą fuzji danych opartą o regułę kombinacji Dempstera zapewnia efektywne budowanie świadomości sytuacji elektromagnetycznej w radiowych sieciach doraźnych z węzłami kognitywnymi.*

Cel i teza rozprawy zostały przez Doktoranta sformułowane poprawnie i wystarczająco jasno.

3. Charakter rozprawy

Praca ta, o charakterze teoretyczno-eksperymentalnym, skupia się na problemie efektywnego monitorowania widma sygnałów radiowych dla potrzeb radia kognitywnego CR (*Cognitive Radio*). Radio kognitywne ustala, najlepiej w czasie rzeczywistym, stopień wykorzystania kanałów radiowych i wybiera te, które mogą zapewnić najlepszą jakość połączenia. Motywacją Doktoranta do prowadzenia badań w tym obszarze było przeprowadzenie kampanii pomiarowej zajętości widma sygnałów radiowych w paśmie od 100 MHz do ok. 1 GHz za pomocą samodzielnie opracowanego i wykonanego stanowiska pomiarowego. Z przeprowadzonych pomiarów wynika jednoznacznie, że w tym paśmie średnie wykorzystanie widma elektromagnetycznego jest niewielkie, na poziomie kilkunastu procent, co dowodzi, że stały przydział zasobów częstotliwościowy jest nieefektywny. Prowadzi to w konsekwencji do konieczności opracowywania metod dynamicznego zarządzania widmem, dla których informacja o zajętości zasobów radiowych jest kluczowa do prawidłowej ich implementacji. Ponadto, na podstawie otrzymanych wyników pomiarowych, Doktorant opracował dwa profile aktywności radiowej dla tzw. węzłów niekooperacyjnych (o małej i dużej zajętości zasobów radiowych), które następnie zostały wykorzystane w opracowanym środowisku symulacyjnym. Z kolei badania symulacyjne posłużyły do weryfikacji efektywności pracy oryginalnej metody monitorowania zajętości widma sygnałów radiowych opracowanej przez Doktoranta na drodze analitycznej.

4. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł; sposób formułowania wniosków wynikających z analizy źródeł

Niniejsza rozprawa doktorska została zredagowana na 139 stronach, w postaci jedenastu rozdziałów, w tym wprowadzenia i podsumowania, oraz spisu literatury zawierającego 121 pozycji, a także wykazu publikacji i osiągnięć Autora. W spisie literatury do rozprawy zostało zebranych 9 prac Doktoranta, natomiast na podstawie dodatku w postaci całkowitego wykazu publikacji i osiągnięć Autora wynika, że jest autorem lub współautorem 34 prac, w tym w czasopiśmie (z tzw. listy A i B, publikowanych na stronach Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego), materiałach konferencyjnych oraz w wydawnictwie książkowym.

Analiza źródeł literaturowych dotyczących monitorowania widma sygnałów radiowych została przeprowadzona w rozdziale 3. W kolejnych podrozdziałach Doktorant skupił się na przedstawieniu w sposób zwięzły następujących zagadnień: wybranych zagadnień związanych z technologią radia kognitywnego (podstawowe definicje i dostępne standardy); reguł decyzyjnych wybranych detektorów zajętości widma elektromagnetycznego, metod klasyfikacji sygnałów radiowych oraz kooperacyjnych metod monitorowania widma i fuzji danych. Dla potrzeb udowodnienia postawionej tezy, szczególną uwagę Doktorant poświęcił: podstawom teoretycznym funkcjonowania detektora Neymana-Pearsona, który bazuje na maksymalizacji prawdopodobieństwa podejmowania decyzji o zadanym zdarzeniu, kooperacyjnej metodzie monitorowania widma, która polega na podejmowaniu decyzji o zajętości widma w tzw. centrum fuzji danych na podstawie raportów otrzymywanych na bieżąco z wielu radiostacji oraz metodzie fuzji danych korzystającej z teorii Dempstera-Shafera.

Zgromadzony materiał w części teoretycznej, świadczy o dobrym rozeznaniu Autora w przedmiocie rozważanego problemu, zaś wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu są jasne i merytorycznie poprawne.

5. Rozwiązanie przedstawionego zadania, właściwości przyjętych metod i założeń

Do udowodnienia postawionej tezy Autor zastosował przede wszystkim metodę eksperymentalną, polegającą na przeprowadzeniu:

- badań pomiarowych w warunkach rzeczywistości w celu opracowania na podstawie otrzymanych wyników profili aktywności węzłów niekooperacyjnych,
- badań symulacyjnych z zastosowaniem uniwersalnego środowiska do obliczeń matematycznych MATLAB SIMULINK z uwzględnieniem reprezentatywnych zjawisk, które mogą wystąpić w warunkach rzeczywistych.

Badania symulacyjne zostały wykonane dla obszaru miejskiego i podmiejskiego, charakteryzującego się różnym stopniem gęstości zabudowy o wymiarach 4 km na 4 km. Dla tego obszaru rozważano cztery scenariusze operacyjne z ograniczoną do 10 liczbą węzłów badanej sieci radiowej. Pierwszy scenariusz bazował na założeniu, że monitoring widma jest realizowany przez węzły nieruchome sieci, na obszarze której znajdują się również nieruchome węzły niekooperacyjne. Kolejne dwa scenariusze zakładały występowanie nieruchomych węzłów niekooperacyjnych oraz ruchomych węzłów kooperacyjnych realizujących przejazd konwoju lub patrolu wojskowego na badanym obszarze. Ostatni scenariusz zakładał mobilność wszystkich typów węzłów podczas patrolu. Do oceny skuteczności opracowanej metody Doktorant wykorzystał następujące parametry jakościowe: zajętość kanału częstotliwościowego, błąd względny zajętości kanału częstotliwościowego, zajętość zasobów częstotliwościowych, współczynnik detekcji oraz współczynnik świadomości zajętości widma.

Przyjęte przez Doktoranta scenariusze (rozdział 7) oraz parametry jakościowe (rozdział 6) podczas badań są wystarczające do udowodnienia tezy postawionej na początku rozprawy.

6. Oryginalność rozprawy, samodzielny dorobek Autora, pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy (poziomu techniki) prezentowanego w literaturze światowej

Oryginalny wkład Autora rozprawy w rozwój metod monitorowania widma sygnałów radiowych jest opisany przede wszystkim w rozdziale szóstym, w którym została przedstawiona oryginalna metoda budowy świadomości sytuacji elektromagnetycznej oraz rozdział ósmy, zawierający kompleksową analizę wyników badań symulacyjnych, udawadniającą w pełni tezę rozprawy doktorskiej. Zaproponowana przez Doktoranta metoda do monitorowania zajętości widma elektromagnetycznego jest oparta na zcentralizowanej architekturze kooperacyjnej, w której wyróżnia się węzeł nadrzędny gromadzący informacje o wynikach pomiarów zajętości widma z węzłów kognitywnych (podrzędnych) i na podstawie tych informacji wypracowywana jest globalna decyzja o zajętości zasobów radiowych. W poszczególnych węzłach podrzędnych zastosowano detektor ENP-ED (szczegółowo opisanym w rozdziale 5) z progiem decyzyjnym wyznaczanym za pomocą kryterium Neymana-Pearsona. Natomiast fuzja danych w węźle nadrzędnym odbywa się z zastosowaniem reguły kombinacji Dempstera.

W rozdziale ósmym Doktorant przeprowadził analizę porównawczą zaproponowanej przez siebie metody z rozwiązaniami dostępnymi w literaturze przedmiotu. Jest to ciekawy materiał analityczny, w którym możemy znaleźć szereg interesujących wyników dla zaproponowanych scenariuszy symulacyjnych. Dla wszystkich zbadanych wariantów pracy sieci radiowej wyznaczone wartości parametrów do oceny zajętości widma elektromagnetycznego oraz oceny skuteczności detekcji świadczą o przewadze opracowanej metody nad znanymi metodami, w tym maksymalizującej prawdopodobieństwo detekcji.

Praktyczna przydatność metody opracowanej przez Doktoranta, która po algorytmizacji zależy od jej złożoności obliczeniowej, czyli liczby operacji podstawowych wykonywanych w tzw. najgorszym przypadku danych w funkcji rozmiaru danych. Najczęściej złożoność obliczeniowa nie jest zbyt trudna do oszacowania z góry przy użyciu symboli oszacowań asymptotycznych. Znajomość złożoności obliczeniowej jest bardzo ważna, gdyż daje

gwarancję, iż dany algorytm nie będzie wykonywał więcej operacji podstawowych niż to wynika ze złożoności obliczeniowej. O ważności złożoności obliczeniowej w procesie praktycznej implementacji algorytmów jest również przekonany Autor pracy. Jednakże Doktorant zdecydował się na pomiar czasu wykonywania algorytmu, reprezentującego opracowaną metodę. Pomierzony czas wykonywania algorytmu stanowi mało reprezentatywny parametr podczas oceny jego praktycznej przydatności, gdyż jak wiadomo zależy on m.in. od warstwy sprzętowej stosowanego komputera, systemu operacyjnego oraz od użytego kompilatora kodu źródłowego, w którym został zaimplementowany ten algorytm.

Podsumowując, opracowana przez Doktoranta metoda stanowi oryginalny wkład w rozwój metod monitorowania zajętości widma sygnałów radiowych na tle literatury światowej.

7. Poprawność przedstawienia uzyskanych wyników (zwięzłość, jasność, umiejętność przekonywania, poprawność redakcyjna)

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Skokowskiego jest napisana w języku polskim. Całość stanowi interesującą, zwięzłą lekturę naukową, napisaną w dobrym stylu. Wyciągane przez Doktoranta wnioski na podstawie zgromadzonego materiału badawczego są prawidłowe i jednoznaczne. W trakcie analizy otrzymanej do recenzji rozprawy zauważono nieznaczne uchybienia pojęciowe i redakcyjne, do których można zaliczyć m.in.:

- stosowanie skrótów myślowych, typu „*moc nadawana*” (np. str. 61), chodzi oczywiście o „*moc sygnału nadawanego*”, „*transmisja mowy*” (str. 68) – powinno być „*transmisja sygnałów mowy*”, czy też „*długość sygnału*” (str. 50), czyli „*czas trwania sygnału*”;
- daleko idące uproszczenie – „*przyjęto model anteny izotropowej*” (str. 61);
- przy czułości odbiornika „ $S \approx 105 \text{ dBm}$ ” brakuje znaku minus (str. 61);
- różne znaczenie przyjętych oznaczeń M i N ;
- na rysunku 50 zastosowano nieprawidłową jednostką do oznaczenia poziomu sygnału - [dB];
- w tabeli 9 brakuje jednostek;
- w tekście całej rozprawy przewija się sformułowanie „*własności detektora ...*”, chodzi oczywiście o „*właściwości detektora*” (*własność – to co ktoś posiada, czego jest właścicielem, co do kogoś należy ...; własność osobista, prywatna, społeczna*. Słownik Języka Polskiego, tom III R-Z, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993, pod redakcją prof. M. Szymczaka);
- wprowadzanie do opisu w języku polskim anglojęzycznych słów „*sensing*” (co prawda Autor na stronie 17 sygnalizuje, że będzie wymiennie stosować to słowo z wyrażeniem „*monitorowanie widma*”, jednak warto stosować jego polski odpowiednik), i dalej podobnie „*waveform 'u*” (str. 26), „*cluster headzie*” (str. 33), itp.;
- spis ważniejszych symboli używanych w rozprawie na stronach 9-10 powinien być alfabetyczny;
- stosowanie niezrozumiałych pojęć, przykładowo „*elementami architektury polityki*” (str. 22),
- podczas wprowadzania po raz pierwszy w tekście nowego skrótu dobrą praktyką jest wyjaśnienie tego skrótu, niektóre skróty są wprowadzone i nie wyjaśnione, można je znaleźć jedynie w wykazie skrótów, np. REM (str. 23);
- brak uzasadnienia pisowni w środku zdania z wielkiej litery skrótów „*Rys.*” oraz „*Tab.*”;
- dla czytelności rozprawy dobrą praktyką jest stosowanie numeracji rysunków i tabel przypisanej do poszczególnych rozdziałów, np. rys. 1.1 – rysunek numer 1, znajdujący się w rozdziale 1., tak jak to ma miejsce przy oznaczaniu wzorów;

- na końcu zdania, po którym pojawia się pojedyncza zależność nie ma uzasadnienia stosowanie znaku „:”, natomiast na końcu zależności przed słowem „gdzie” stosuje się przecinek;
- na str. 58 Autor powołuje się na „rozdział 0”, który nie istnieje;
- w podpisie rysunku 49 występuje niewłaściwe słowo „zna” zamiast „na”;
- podpis pod rysunkiem 58 znajduje się w złym miejscu;
- na str. 98, czwarta linijka od góry błąd w zdaniu „... kanałach c co przekłada się ...”;
- na stronie 107, druga linijka niejasne odwoływanie się do rysunków „(patrz Rys. 90, Rys. 92, rys 72, rys. 92 i Rys. 93)”;
- na górze stron 115 i 119 niewłaściwe wprowadzenie akapitu;
- przy powoływaniu się na treści zawarte na stronie internetowej warto podawać datę ich pozyskania;
- pozycja [83] w spisie literatury, „5th Edition” nie należy do tytułu.

W świetle powyższego, forma redakcyjna rozprawy jest na poziomie średnim, jednak ze względu na wartość uzyskanych wyników merytorycznych, powyższe uwagi nie wpływają na pozytywną, wysoką ocenę całości pracy.

8. Słabe strony rozprawy, jej główne wady

Analizę słabych stron rozprawy można przeprowadzić w dwóch płaszczyznach. Pierwsza dotyczy uwag ogólnych, które zostały omówione w niniejszym punkcie recenzji. Natomiast druga, dotyczy uwag szczegółowych, związanych z niedociągnięciami redakcyjnymi i edytorskimi, które zostały omówione w poprzednim punkcie.

Podczas analizy recenzowanej rozprawy doktorskiej pewne wątpliwości recenzenta wzbudziły dwie kwestie. Pierwsza związana jest z niejasnym zakresem wartości (od -20 dB do 0 dB) stosunku mocy sygnału do mocy szumów SNR (*Signal to Noise Ratio*) stosowanym podczas badania efektywności pracy detektora ENP-ED w rozdziale 5. Dobrze byłoby, aby Doktorant ustosunkował się do tej wątpliwości recenzenta i rozwinął problem efektywności pracy przedmiotowego detektora w odniesieniu do przyjętych założeń systemowych: sygnał zmodulowany QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), szerokość kanału 25 kHz, kanał z addytywnym szumem gaussowskim, przyjęta liczba próbek N analizowanego sygnału w odniesieniu do czasu trwania symbolu zmodulowanego, co w konsekwencji prowadzi do przyjętego w rozważaniach czasu obserwacji.

Z kolei w rozdziale 8, na wykresach 43 i 44 na osi rzędnych pojawiają się bardzo małe wartości prawdopodobieństwa fałszywego alarmu w centrum fuzji z przedziału od 10^{-5} do 10^{-25} . Również w tym przypadku warto, aby Doktorant ustosunkował się do tej wątpliwości i przedstawił praktyczną interpretację otrzymanych wyników.

9. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych, przemysłu, obronności kraju, itp.

Zagadnienia poruszane w rozprawie wpisują się w aktualnie ważną dziedzinę badań, związaną z radiem kognitywnym i ukierunkowaną na praktyczne rozwiązania w obszarze tej technologii. Opracowana metoda dla potrzeb budowy świadomości sytuacji elektromagnetycznej w sieciach radiowych z węzłami kognitywnymi może znaleźć zastosowanie zarówno w aplikacjach komercyjnych (cywilnych) jak i militarnych. W dobie ograniczonych zasobów częstotliwościowych i u progu wdrażania sieci 5G wprowadzanie efektywnych metod dynamicznego zarządzania widmem staje się jednym z priorytetów. Z kolei w aplikacjach militarnych podstawowym zastosowaniem opracowanej przez Doktoranta metody mogą być, wspomniane w rozprawie, militarne sieci radiowe pola walki oznaczane akronimem MANET (*Mobile Ad-hoc NETWORKS*).

10. Podsumowanie (czy rozprawa spełnia wymagania przez obowiązujące przepisy).

Na podstawie niniejszej recenzji można stwierdzić, że mgr inż. Paweł Skokowski:

- przedłożył do oceny rozprawę doktorską pt. *Efektywna metoda budowy świadomości sytuacji elektromagnetycznej w radiowych sieciach doraźnych z węzłami kognitywnymi*, spełniającą wymagania stawiane tego typu pracom;
- podjął ważną, ciekawą i aktualną tematykę badawczą o dużym znaczeniu użytkowym, związaną z zagadnieniami monitoringu zajętości widma elektromagnetycznego dla potrzeb technologii radia kognitywnego;
- opracował nową metodę pozwalającą na efektywne monitorowanie widma sygnałów radiowych stosując podejście kooperacyjne i fuzję danych zaczerpniętą z teorii ewidencji.

Biorąc powyższe pod uwagę można stwierdzić, że rozprawa doktorska mgra inż. Pawła Skokowskiego spełnia wymagania określone w ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r. oraz w przepisach powiązanych i może być skierowana do publicznej obrony.

Jacek Stefański