

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

„Efektywna metoda budowy świadomości sytuacji elektromagnetycznej w radiowych sieciach doraźnych z węzłami kognitywnymi” autorstwa p. mgr. inż. Pawła SKOKOWSKIEGO

1. Informacje wstępne

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej została wykonana na podstawie uchwały Rady Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego nr 351/WEL/2019 z dnia 25 września 2019 r. oraz pisma przewodniego z tego samego dnia (oznaczonego sygnaturą WYCH/N/00853/2019 datowaną na dzień 26 września 2019 r.). Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt. „Efektywna metoda budowy świadomości sytuacji elektromagnetycznej w radiowych sieciach doraźnych z węzłami kognitywnymi” autorstwa p. mgr. inż. Pawła SKOKOWSKIEGO, realizowana w Wojskowej Akademii Technicznej pod kierownictwem promotora, dr. hab. inż. Jerzego ŁOPATKI, prof. WAT. Rozprawa została zgłoszona jako zrealizowana w dziedzinie „nauki techniczne”, dyscyplinie „telekomunikacja” i specjalności „radio kognitywne”.

2. Struktura i zawartość rozprawy

Pomijając wprowadzenie, definicję celu pracy i podsumowanie, przedłożona praca doktorska składa się z sześciu merytorycznych rozdziałów, a w sposób logiczny może być podzielona na trzy główne części.

- Pierwsza część (rozdziały od trzeciego do piątego) stanowi analizę dostępnych w literaturze światowej rozwiązań teoretycznych i praktycznych popartych własnymi badaniami eksperymentalnymi (pomiarowymi) z zakresu zajętości widma elektromagnetycznego. W rozdziale trzecim Doktorant dokonał zwięzłego zestawienia najistotniejszych zagadnień dotyczących problemu wiarygodnego monitorowania widma. W szczególności przedstawiono ideę radia kognitywnego oraz powiązany z nią cykl kognitywny, a także przeanalizowano realizowane na świecie działania właściwych grup standaryzacyjnych (np. IEEE 1900, IEEE 802.22 i innych). Następnie Autor opisał najpopularniejsze rozwiązania w zakresie detekcji emisji radiowych, stosowanych reguł decyzyjnych (kooperacyjnych i pojedynczo-węzłowych), fuzji danych czy metod klasyfikacji sygnału.

W rozdziale czwartym Doktorant przedstawił wyniki przeprowadzonych przez siebie pomiarów zajętości pasma częstotliwościowego w zakresie od 100 MHz do 1.057 GHz, natomiast w rozdziale piątym opisał on zasadę działania detektora ENP-ED (ang. *Estimate Noise Power – Energy Detector*).

- Drugą logiczną część pracy, a także główną propozycję Doktoranta, stanowi zaproponowana metoda budowania świadomości sytuacji elektromagnetycznej przedstawiona w rozdziale szóstym. Badany fragment widma częstotliwościowego jest mierzony przez

zestaw N odbiorników wyposażonych w detektor ENP-ED, pracujących z założonym prawdopodobieństwem fałszywego alarmu P_f^{DES} . W następnym kroku każdy węzeł lokalny dostarcza do węzła centralnego wartości prawdopodobieństw wykrycia obecności sygnału w badanym paśmie częstotliwości, P_{d,CR_i} . Węzeł centralny, korzystając z dostosowanej do proponowanego rozwiązania metody Dempster'a-Shafer'a podejmuje decyzję o zajętości wskazanego kanału częstotliwościowego. Należy podkreślić, że także w rozdziale piątym Autor przedstawił własną propozycję detektora ENP-ED, stanowi ona jednak, według mnie, implementację znanych z literatury rozwiązań, dlatego za główny wkład Autora (tj. nowatorstwo pracy) określam zawartość rozdziału szóstego.

- Trzecią logiczną część pracy stanowią rozdział siódmy i obszerny rozdział ósmy, w których Doktorant przedstawił zaproponowane przez siebie cztery scenariusze badawcze (operacyjne), a także zebrał w sposób syntetyczny wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

3. Cel badań (w odniesieniu do tezy rozprawy)

Doktorant w precyzyjny sposób zdefiniował cel realizowanej przez siebie pracy badawczej – jest nim zaproponowanie efektywnej metody monitorowania widma do budowy świadomości sytuacji elektromagnetycznej, a także ocena i analiza jej efektywności w różnych scenariuszach badawczych (operacyjnych). W kontekście przedstawionej tezy pracy (sformułowanej następująco: Kooperacyjna scentralizowana metoda monitorowania widma z wykorzystaniem detektora ENP-ED z progiem decyzyjnym wyznaczanym 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) uważam, że cel pracy określono w sposób metodologicznie poprawny, nie budzący wątpliwości i kompletny. Oznacza to, że prawidłowo wykonana przez Doktoranta weryfikacja tezy pracy powinna skutkować realizacją wskazanego celu pracy.

4. Charakter rozprawy

Rozprawa doktorska w istotnym stopniu ma charakter eksperymentalno-koncepcyjny, co stanowi jej istotny walor. Zaproponowane przez Doktoranta rozwiązania teoretyczne (a w zasadzie zaproponowana koncepcja wykorzystania znanych z literatury rozwiązań do osiągnięcia założonego celu i weryfikacji tezy) zostały przebadane nie tylko w sposób symulacyjny z wykorzystaniem narzędzi komputerowych, takich jak Matlab Simulink, ale także w rzeczywistym środowisku z użyciem węzłów radia kognitywnego. Jest to niewątpliwie istotna zaleta niniejszej rozprawy. Dodatkowo należy podkreślić, że przyjęte w pracy założenia teoretyczne (dotyczące faktycznej zajętości widma elektromagnetycznego w różnych środowiskach propagacyjnych) zostały zweryfikowane w sposób eksperymentalny. Pozwoliło to dodatkowo zwiększyć istotność uzyskanych wyników, gdyż można je odnieść w bezpośredni sposób do sytuacji obserwowalnej w warunkach rzeczywistych (a w szczególności w warunkach krajowych). Można wręcz powiedzieć, że dzięki dominującemu eksperymentalnemu charakterowi pracy, w znaczącym stopniu uwypuklony został walor praktyczny i aplikacyjny rozprawy.

5. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł. Sposób formułowania wniosków wynikających z analizy źródeł

Przedstawiony przez mgr. inż. Pawła SKOKOWSKIEGO spis wykorzystywanych źródeł i publikacji naukowych jest obszerny (121 pozycji). Warto podkreślić różnorodność cytowanych prac (np.

publikacje standaryzacyjne, publikacje naukowe), a także aktualność i kompletność dobranej literatury – jako recenzent odnalazłem w tym spisie szereg istotnych w tematyce radia kognitywnego publikacji. Dobór literatury świadczy o dużej wiedzy Doktoranta i ogólnym rozeznaniu w prowadzonych na świecie działaniach w zakresie zdobywania i uzupełniania świadomości sytuacji elektromagnetycznej. Jednocześnie uważam, że zaprezentowany przez Autora rozprawy sposób analizy źródeł i formułowania wniosków jest prawidłowy.

6. Rozwiązanie przedstawionego zadania, właściwości przyjętych metod i założeń

Jak już wcześniej wspomniałem, na podkreślenie zasługuje fakt wykonania przez Doktoranta szeregu badań pomiarowych określających faktyczną zajętość widma elektromagnetycznego w Polsce (oczywiście w wybranych lokalizacjach). Wyniki tych badań wstępnych stanowiły istotną obserwację w przyjętych założeniach dotyczących proponowanego algorytmu monitorowania widma – istnieje sporo zasobów widmowych, które nie są w danej chwili i w danej lokalizacji wykorzystywane. Dodatkowo Doktorant słusznie zauważył, że podejmowanie decyzji niezależnie przez pojedyncze węzły nie jest wystarczająco efektywne, dlatego proponowane rozwiązanie zasadza się na obecności węzła centralnego i wykorzystania tzw. kooperacyjnego algorytmu wykrywania zajętości widma. Kolejnym przyjętym założeniem jest wybór metody detekcji opierającej się na mierzeniu obserwowanej energii. Jest to założenie poprawne o tyle, że jest to faktycznie metoda najprostsza implementacyjnie (co jest walorem z perspektywy potencjalnej praktycznej realizacji) i jako taka nie wymaga żadnej wiedzy o obserwowanym pasmie częstotliwościowym poza estymowaną mocą szumu. Wydaje się jednak, że warto by rozważyć zastosowanie bardziej zaawansowanych rozwiązań, choćby dla celów porównawczych. Jako takie jednak przyjęcie detektora energii jest uzasadnione. W tym kontekście Autor powinien jednak poświęcić więcej uwagi problemowi wiarygodnej estymacji szumu tła, zwłaszcza w kontekście występujących możliwych sygnałów interferencyjnych czy bardzo słabych sygnałów systemów pierwotnych (które mogą zostać w procesie estymacji potraktowane jako szum).

Proponowane przez Doktoranta autorskie rozwiązanie bazuje na zastosowaniu teorii Dempster’a-Shafer’a (oznaczanej w pracy skrótem DST, Dempster-Shafer Theory) będącej przykładem tzw. teorii ewidencji, w której pozyskiwane informacje traktuje się jako subiektywne. Jest to niewątpliwie zaleta zaproponowanego rozwiązania, pozwalająca na łączenie wyników detekcji z wielu źródeł. Jest to o tyle istotne, że faktycznie różne źródła mogą charakteryzować się różnym poziomem szeroko rozumianej wydajności, np. będą posiadały różne poziomy dokładności czy wiarygodności decyzji.

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

Oryginalność proponowanego rozwiązania zasadza się głównie na zastosowaniu dwustopniowego procesu podejmowania decyzji o zajętości obserwowanych pasm częstotliwościowych, przy czym podjęcie ostatecznej decyzji w węźle nadrzędnym realizowane jest z wykorzystaniem metody DST. Każdy z węzłów dokonujących pomiarów korzysta z algorytmu ENP-ED, także dostosowanego przez Autora rozprawy do badanych warunków eksperymentalnych. Koncepcja użycia metody DST w kontekście kooperacyjnego podejmowania decyzji o środowisku radiowym jest ciekawa i na pewno zasługuje na dalsze badania. Całościowo można uznać, że zaproponowana architektura charakteryzuje się prostotą implementacji (co traktuję jako zaletę), przy jednoczesnym uwzględnieniu faktu, że jakość dostarczanych informacji od węzłów lokalnych może być różna w zależności od węzła.

W.65

Bardzo istotnym elementem pracy jest także praktyczna weryfikacja zaproponowanego rozwiązania w czterech scenariuszach operacyjnych, opisanych szczegółowo na stronie 67. Dobór scenariuszy uważam za poprawy, pokazujący zachowanie (wydajność) zaproponowanej metody pozyskiwania informacji o zajętości pasm częstotliwościowych w różnych sytuacjach.

Oryginalność prowadzonych prac została potwierdzona publikacjami naukowymi Doktoranta. W szczególności jest on współautorem pracy z czasopisma International Journal of Microwave and Wireless Technologies (z tzw. listy A – klasyfikacja stosowana przed reformą szkolnictwa wyższego), a także ośmiu publikacji w czasopismach niższej rangi (głównie Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne) oraz sporej liczby publikacji i wystąpień konferencyjnych.

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

Autor wyniki swoich badań przedstawił w kilku rozdziałach, zgodnie z przyjętą metodologią badań. W rozdziale czwartym Doktorant przedstawił wyniki przeprowadzonych pomiarów zajętości widma elektromagnetycznego. Dokonał tego w sposób przejrzysty i zwięzły. Następnie w rozdziale siódmym przedstawiono przyjęte profile aktywności radiowej – wyniki przedstawione są poprawnie, jednak zmniejszenie liczby wykresów nie umniejszyło by przekazu merytorycznego pracy. W rozdziale ósmym, będącym podsumowaniem prowadzonych prac symulacyjnych oraz eksperymentalnych z użyciem rzeczywistego sprzętu pomiarowego, Autor przedstawił w sposób uporządkowany uzyskane wyniki, stosując dla każdego scenariusza operacyjnego podobny wzorzec ich prezentacji. Dodatkowo na końcu rozdziału Doktorant dokonał porównania wyników uzyskanych we wszystkich czterech scenariuszach. Ułatwiło to analizę i porównanie wyników pomiędzy sobą.

Wszystkie uzyskane rezultaty badań przedstawione są w sposób przejrzysty, staranny i w większości przypadków nie wzbudzający zastrzeżeń. Można mieć jednak pewne uwagi co do liczby prezentowanych wykresów w rozdziale ósmym, która jest według mnie za duża. Tzn. mnogość prezentowanych wyników dla różnych konfiguracji faktycznie pokazuje, w jaki sposób zachowuje się proponowany algorytm kooperacyjnej detekcji w różnych sytuacjach, z drugiej jednak strony trochę zaciemnia obraz całościowy. Być może lepiej byłoby zmniejszyć liczbę wykresów w części głównej pracy, a wyniki uzyskane dla różnych wartości poszczególnych parametrów (np. dla różnych wartości P_f) przenieść do odrębnej sekcji Dodatków na końcu rozprawy. Pozwoliłoby to na jednoznaczne wskazanie głównych zalet proponowanego rozwiązania, a także na szczegółową analizę jego wydajności.

9. Słabe strony rozprawy, jej główne wady

Pomimo starannego przygotowania rozprawy, Autor nie ustrzegł się jednak przed kilkoma błędami i nieścisłościami, zarówno edytorskimi i merytorycznymi, które krótko opisuje poniżej:

Usterki edycyjne i językowe:

- teza zawiera drobny błąd językowy, mianowicie zwrot „oparty o” wydaje się w analizowanym kontekście użyty nieprawidłowo
- s. 21 – w drugiej linii zwrot „(...) o otaczającym środowisku i stanie wewnętrznym” jest nieprecyzyjny – czego stan wewnętrzny Autor miał na myśli?
- S. 25 – wydaje się jednak, że używanie popularnego obecnie potocznie zwrotu „dedykowany” (np. w odniesieniu do detektora) czy uproszczeń typu „transmitowanego waveform’u” w kontekście pracy doktorskiej nie jest właściwe

- Uwaga ogólna – wzór stanowi fragment zdania, dlatego obowiązują typowe reguły interpunkcyjne, których zastosowania zabrakło w pracy.
- Pojawiały się niestety także usterki typu „W rozdziale 0” (s 58)

Usterki merytoryczne i obszary dyskusji naukowej:

- S. 16 – dlaczego ze stanu „uczenie” nie ma żadnej drogi wyjścia do innego stanu?
- S. 18 – wskazano, że „do zalet tych metod należy zaliczyć małą złożoność obliczeniową”. W odniesieniu do części z wymienionych rozwiązań, w szczególności do metod wykorzystujących cyklostacjonarność, detekcję cech sygnału czy filtry dopasowane powyższe stwierdzenie jest raczej trudne do obronienia, nawet w przypadku sygnałów wąskopasmowych.
- S. 25 – Autor wskazał, że detektor energii jest odbiornikiem optymalnym; stwierdzenie to wymaga jednak szerszego omówienia
- Opis metod detekcji na poziomie pracy doktorskiej, której tematyka skupia się właśnie na detekcji, powinien jednak wykorzystywać aparat matematyczny.
- Równanie 3.7 – mylące jest użycie środkowego znaku równości; dodatkowo, czy przy detektorze MAP w tym równaniu nie powinny być uwzględnione (po znakach nierówności) także prawdopodobieństwa a’priori? Czy Autor założył, że są równe sobie?
- S.40-46 – zabrakło mi chociaż krótkiej informacji, może odniesienia do właściwego dokumentu, w jaki sposób należy mierzyć sygnały pojawiające się okresowo w czasie (np. pracujące w trybie TDMA, CSMA, z przeskokami po częstotliwościach).
- W opisie pomiarów zajętości widma (rozdział 4) zabrakło wskazania istotnych elementów układu pomiarowego, takich jak NF, czy mierzono moc czy zbierano próbki IQ (użyty zwrot „próbki widma amplitudowego” nie jest precyzyjny), długość i tłumienie kabli, obecność przedwzmacniacza itp. Wpływają one istotnie na analizę uzyskanych wyników.
- W opisie wybranej metody ENP-ED zabrakło równań opisujących wymaganą liczbę próbek dla zapewnienia założonej wartości prawdopodobieństwa fałszywego alarmu; nie poruszono bardzo istotnego w kontekście detektorów energii problemu tzw. SNR-wall.
- S. 56 – czy w opisie danych wejściowych (spód strony) nie powinno być P_f^{DES} ?
- Skoro szerokość obserwowanego kanału jest 2 MHz (s. 59) w jaki sposób uzyskano tak dokładne wyniki dla systemów o szerokości pasma 25 kHz oraz 200 kHz (Tab. 2)? Co oznacza ujemna częstotliwość na prezentowanym wykresie na rys. 24?
- S. 73 – przedstawiona analiza dotyczy prawdopodobnie węzła NcN 18, a nie 8?
- Ciekawe byłoby dostarczenie analizy, dlaczego wykresy na rys. 37, 38 oraz 45 i 46 się przecinają.
- Rys. 51 – dlaczego kanały 1, 2, 5, 6, 7 w ogóle nie zostały wykryte żadną metodą, skoro sygnał wydaje się ciągły w czasie? Sytuacja powtarza się także dla innego profilu. Podobnie na rys. 64
- Z czego wynikają tak duże rozbieżności pomiędzy rezultatami uzyskanymi dla różnych wersji FCO (np. rys. 67, 68)? Wskazuje to, że faktycznie metoda DS. jest lepsza (np. od metody

OR), natomiast czy pozwala na wiarygodne określenie zajętości kanału? Czy nie uwidacznia się tutaj problem z wydajnością metody bazującej na detekcji energii? Rys. 75 i 76 w zasadzie pokazują, że faktyczna świadomość systemu dokonującego detekcję jest raczej niska.

- Czy tłumaczyć należy zafalowania krzywych („spadki”) na rys. 77 i 78 (np. dla wartości P_{system} równej około 0.87)?
- Głównym mankamentem pracy jest brak porównania proponowanej metody z innymi znanymi z literatury rozwiązaniami. Znaleźć można liczne publikacje naukowe metod detekcji kooperacyjnej, także bazującej na detekcji energii dokonywanej w węzłach lokalnych, także realizowane sprzętowo. Porównanie zaproponowanej metody z innymi rozwiązaniami znanymi z literatury znacząco podniosłoby walor naukowy pracy.

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

We wcześniejszych częściach recenzji podkreślałem walor praktyczny zaproponowanego rozwiązania. Przedstawiona praca doktorska ma więc duży potencjał aplikacyjny, a przez to jej zawartość może być istotna z perspektywy wdrożeń tego rozwiązania w praktyce (zwłaszcza w przemyśle czy systemach wojskowych). Przedstawiona w rozprawie metoda charakteryzuje się prostotą (algoritmy zużywają mało energii na przeprowadzenie obliczeń, mogą być realizowane z wykorzystaniem relatywnie prostych, czyli także tanich, układów elektronicznych), choć problemem może być uzyskiwany poziom wiarygodności. Metoda została przetestowana w czterech scenariuszach operacyjnych, co potwierdza jej walory implementacyjne.

11. Podsumowanie

Chociaż praca posiada pewne mankamenty przedstawione w sekcji 9 niniejszej recenzji, to jednak uwzględniając całościowy wkład pracy Autora zdecydowanie stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia kryteria stawiane dysertacjom doktorskim w stopniu dobrym i wnioskuję do dopuszczenia do publicznej obrony doktoranta.

Adrian Kłobas
19.11.2019