

Poznań, dnia 27 marca 2021 r.

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Wesołowski
Instytut Radiokomunikacji
Politechnika Poznańska

*RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY
RADY DYSCYPLINY INFORMATYKI TECHNICZNEJ I TELEKOMUNIKACJI
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ W KRAKOWIE*

Tytuł rozprawy: *Emulation of fading and interference in multi-user OFDMA wireless channel using computationally efficient frequency domain models*

Autor rozprawy: **Grzegorz Cisek**

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)?*

W rozprawie Autor rozpatrzył problem modelowania wpływu kanału radiowego na jakość działania urządzeń radiokomunikacyjnych, w szczególności stacji bazowych i stacji ruchomych. Jak stwierdza Autor, jest to szczególnie istotne w przypadku zastosowania radiowej sieci dostępowej wykorzystującej chmurę (C-RAN) i testowanie działania jednostki centralnej w chmurze (CU - Central Unit) w przypadku zastosowania wielu stacji DU (Distributed Units), będących końcowymi fragmentami stacji bazowych. Jak pisze Autor (str. 14), w swojej pracy zaproponował on nowe algorytmy, których zadaniem jest optymalizacja procesu symulacji z testowaniem części sprzętowej urządzeń (tzw. Hardware-in-the-loop), które podlegają ocenie jakości. Algorytmy te są przeznaczone do weryfikacji sprzętowej i implementacji programowej stacji bazowych lub stacji ruchomych w warunkach laboratoryjnych. Z powodu faktu, że w systemach 4G i 5G w transmisji w warstwie fizycznej stosuje się metody wielotonowe bazujące na technologii OFDM, Autor koncentruje się na modelowaniu systemów radiowych z tym rodzajem transmisji. Po nakreśleniu potrzeb testowania i tła technologicznego dla rozpatrywanych zagadnień Autor formułuje zgodnie ze zwyczajem stosowanym w rozprawach doktorskich jej tezę. Teza ta określona na str. 17 po przetłumaczeniu przez recenzenta na język polski brzmi:

Dokładność emulacji zjawisk interferencji między podnośnymi i interferencji międzysymbolowej występujących w kanale radiowym w technologii OFDMA może być efektywnie podniesiona przez zastosowanie aproksymacji macierzy odpowiedzi częstotliwościowej kanału w dziedzinie częstotliwości oraz zastosowanie szybkiej transformacji Fouriera macierzy Toeplitza w przypadku kanałów z długim rozproszeniem czasowym opóźnień.

Następnie Autor przedstawia, na czym w jego opinii polega wkład rozprawy do tematyki modelowania kanałów radiowych wymieniając szczegółowo cztery zagadnienia.

Teza rozprawy jest sformułowana bardzo szczegółowo i na etapie studiowania rozdziału pierwszego nie jest dla czytelnika w pełni jasna. Byłoby chyba lepiej, gdyby Autor najpierw

przedstawił swój „czteroelementowy” wkład w dziedzinę modelowania kanałów radiowych i uzyskane osiągnięcia, co przedstawił bezpośrednio po prezentacji tezy rozprawy, a następnie zamieścił właściwą tezę rozprawy. Trzeba oczywiście przyznać, że prawdziwość tezy rozprawy jest w jej trakcie wykazana.

Rozprawa ma charakter mieszany, 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 z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Przeglądowi literatury i analizie źródeł jest poświęcony rozdział 2 rozprawy zatytułowany „Podstawy teoretyczne”. Autor rozpoczyna od zagadnień stochastycznego modelowania bezprzewodowego kanału z zanikami. Do sposobu opisu niektórych zjawisk występujących w kanałach radiowych można mieć pewne zastrzeżenia. Opis zjawiska „Path loss” (tłumienia ścieżek) nie jest w opinii recenzenta w pełni właściwy. Tłumienie ścieżek występuje nie tylko w przypadku propagacji w wolnej przestrzeni, ale również w propagacji wielościeżkowej (wielodrogowej). W najprostszych modelach propagacyjnych zakłada się, że tłumienie to rośnie z określoną potęgą (zazwyczaj pomiędzy 2 a 5.5) odległości pomiędzy stacją bazową a ruchomą. W kontekście propagacji wielodrogowej Autor rozpatruje zaniki płaskie i selektywne. Warunkiem wystąpienia zaniku płaskiego jest spełnienie zależności $T_d \ll T_s$, nie zaś po prostu $T_d < T_s$, jak napisał Autor, przy czym T_d jest opóźnieniem ścieżek zaś T_s jest czasem trwania symbolu danych. Również opis zjawiska cieniowania nie odzwierciedla jego istoty. Dla porządku Autor powinien zdefiniować używane przez niego pojęcia czasu i pasma koherencji. Kolejna uwaga dotyczy nie w pełni prawidłowego rozumienia sensu profilu opóźnień mocy (Power Delay Profile - PDP). Autor pisze, że PDP służy do reprezentowania uśrednionej czasowo odpowiedzi impulsowej kanału, czemu daje również wyraz we wzorze (2.5). Nie jest to sformułowanie w pełni prawidłowe. Uśrednione czasowo próbki odpowiedzi impulsowej odpowiadają bowiem pierwiastkom z wartości próbek profilu PDP, bowiem wartości w profilu PDP to moce średnie współczynników poszczególnych ścieżek.

Autor skoncentrował się w opisie modeli kanałów na jego realizacji za pomocą linii opóźniającej z odczepami (TDL – Tapped Delay Line), co wykonał w zasadzie prawidłowo. Uważam jednak, że wymagania na modele kanałów we współczesnych technologiach dostępu radiowego są potraktowane skrótowo i pobieżnie (sekcja 2.2). Modelowanie kanałów radiowych było zawsze jednym z ważnych pakietów tematycznych kluczowych projektów mających za zadanie opracowanie nowych standardów dostępu radiowego (np. LTE-Advanced – projekt 7FP Winner I, II i +, lub 7FP METIS – koncepcja systemów 5G). Istotną rolę odgrywa wtedy uwzględnienie techniki MIMO, co ma konsekwencje dla modelowania kanałów i to różnego niż z zastosowaniem linii opóźniającej z odczepami. Recenzent proponuje Autorowi przestudiowanie następującego artykułu: K. Bąkowski, K. Wesołowski, „Change the Channel” IEEE Vehicular Technology Magazine, June 2011, str. 82-91 i literatury przywoływanej w tej pracy. Wydaje się, że dla pokazania orientacji Autora w zagadnieniach modelowania kanałów radiowych, w rozprawie powinny się znaleźć pozycje literatury związane z modelami geometrycznymi zdefiniowanymi przez raport ITU-R i odpowiadającymi transmisji MIMO w systemach spełniających wymagania IMT-Advanced.

Z kolei Autor w swej części przeglądowej przedstawił model transmisji OFDM. Część ta nie budzi większych zastrzeżeń. Wydaje się, że nie zawsze jednak prawidłowo stosuje dwa podobne skróty: OFDM i OFDMA. Jak wiemy, pierwszy dotyczy wielotonowej transmisji z wykorzystaniem podnośnych wzajemnie ortogonalnych w wybranym przedziale czasowym,

podczas gdy drugi z nich dotyczy metody wielodostępu bazującej na transmisji OFDM. Możemy więc mówić o symbolach OFDM, ale nie OFDMA. Można jednak rozpatrywać ramki lub podramki OFDMA. **Dyskusyjne jest również stwierdzenie (str. 32), że pasma ochronne w systemach, w których działa wielu użytkowników są utrzymane w celu spełnienia wymagań co do gabarytów widma.** Jest to prawda w przypadku transmisji w dół i dotyczy obu skrajów pasma sygnałów OFDM, ale w przypadku sygnałów w górę, pasma ochronne są stosowane pomiędzy sygnałami poszczególnych terminali również z powodu niedokładnych wartości częstotliwości nośnych poszczególnych terminali, co skutkowałoby interferencją pomiędzy podnośnymi sygnałami odbieranych w stacji bazowej od różnych terminali, gdyby pasm ochronnych nie stosować.

Studiując prace (np. doktorskie) i artykuły naukowe polskich autorów recenzent obserwuje typową prawidłowość, którą jest **brak cytowań prac i książek autorów polskich.** Jest tak i w przypadku ocenianej rozprawy. Warto dodać, że w literaturze polskiej jest kilka pozycji z zakresu systemów radiokomunikacji ruchomej, propagacji fal radiowych czy systemów LTE.

Podsumowując, pomimo wyszczególnionych wyżej uwag krytycznych (nie wszystkie wymieniono w recenzji) rozdział o charakterze podstaw teoretycznych i charakterze przeglądowym można ocenić jako prawidłowy. Cytowana literatura jest bogata i świadczy o poważnej pracy wykonanej przez Autora rozprawy.

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

Zadaniem, które przed sobą postawił Autor było zbudowanie efektywnych obliczeniowo algorytmów modelowania kanałów radiowych w transmisji wielotonowej, gdy modele te są realizowane w dziedzinie częstotliwości. Zdaniem recenzenta cel ten jest w rozprawie osiągnięty. Dodatkowo, Autor założył możliwość zmienności charakterystyk kanału radiowego w takim stopniu, że kanał nie może być traktowany jako stały w trakcie pojedynczego symbolu OFDM z powodu mobilności terminali i efektu Dopplera. Drugim czynnikiem rozpatrywanym przez Autora był przypadek, gdy przedrostek cykliczny symbolu OFDM nie jest wystarczająco długi w porównaniu z rozproszeniem czasowym odpowiedzi impulsowej kanału. Według recenzenta uwzględnienie obu potencjalnych zjawisk w modelowaniu kanałów ma **znaczenie laboratoryjne** i pozwala na testowanie urządzeń i rozwiązań w sytuacjach raczej ekstremalnych (granicznych). Dobrze zaprojektowany system transmisji OFDM w zasadzie nie musi uwzględniać obu tych zjawisk. Przykład zasad projektowania takich systemów można znaleźć np. w książce **R. Van Nee i R. Prasada pt. OFDM Wireless Multimedia Communications, Artech House, Boston, 2000.** Zakłada się w niej, że skuteczna wartość rozproszenia czasowego odpowiedzi impulsowej kanału to około 20% czasu trwania przedrostka cyklicznego, a zakładając, że stanowi on nie więcej niż 20% długości symbolu OFDM, wynika z tego przedział ortogonalności a w konsekwencji odległości między podnośnymi. Oba zjawiska, które rozpatruje Autor nie powinny więc nominalnie występować. Gdyby w przedziale ortogonalności kanał był na tyle zmienny, że utracona jest własność ortogonalności, transmisja wielotonowa nie powinna być stosowana i należy zastosować transmisję z pojedynczą nośną i ewentualnie korektorem adaptacyjnym charakterystyki kanału. **Rzeczywistość może być jednak bardziej skomplikowana i uwzględnianie obu zjawisk (ICI i ISI) pozwala na testowanie zachowania urządzeń w warunkach „skrajnych”.**

Należy z satysfakcją podkreślić, że Autor zanalizował oba zjawiska i przedstawił stosowne modele je uwzględniające w dziedzinie częstotliwości korzystając bardzo sprawnie z macierzowego aparatu matematycznego. Wykazał się więc kunsztem, który jest wysoko

oceniany na poziomie rozprawy doktorskiej.

Pewne **zastrzeżenia** można mieć do rozdziału 4, w którym Autor przedstawił **wyniki swoich symulacji komputerowych**, w trakcie których weryfikował wprowadzone przez siebie modele kanałów. Weryfikacji wykonał dla kilku rozpatrywanych rodzajów odbiorników. **Wybór częstotliwości nośnej równej 6 GHz wymagałby uzasadnienia**. W systemach 5G New Radio takiej częstotliwości się nie przewiduje do zastosowania. Wyniki symulacji w sposób istotny **zależą od zastosowanego schematu modulacji i kodowania (MCS – Modulation and Coding Scheme)**, których do wyboru jest wiele. W rzeczywistych systemach wybór MCS podlega optymalizacji w trakcie transmisji w zależności od aktualnych warunków propagacyjnych i zastosowanego algorytmu rozdziału zasobów radiowych. Autor zastosował modulację **QPSK lub 16-QAM z kodem LDPC** o sprawności 0.64, ale na temat **długości zastosowanych ciągów kodowych** nie można znaleźć w pracy informacji. Długość ciągów kodowych ma istotny wpływ na jakość dekodowania, więc jest jednym z kluczowych parametrów, które powinny być podane. Dodatkowo uważam, że Autor zastosował **nie w pełni prawidłowy sposób obliczania przybliżonych wartości LLR**, które następnie używał jako próbki wejściowe dla dekodera LDPC z miękkim wejściem. Zastosowany wzór może prowadzić do nie w pełni prawidłowych wyników symulacyjnych. Autor najpierw bowiem dokonuje korekcji współczynnika kanału dla odebranego symbolu danych a następnie wyznacza przybliżone wartości LLR dla tak skorygowanego symbolu. Nawiasem mówiąc, **wzór (4.10) jest przybliżeniem zasady ML (Maximum Likelihood), nie zaś MAP**. Należałoby bowiem uwzględnić prawdopodobieństwa *a priori* symboli danych, albo założyć, że są one równe. Wystarczy przeanalizować cytowaną przez Autora pracę [113]. Prawidłowo obliczone przybliżone wartości LLR powinny wynikać z następującego rozumowania:

Niech każdy punkt zastosowanej konstelacji będzie odwzorowany w ciąg bitów (b_1, \dots, b_m) . Niech $\Lambda_{0,i}$ będzie zbiorem punktów konstelacji odpowiadających zeru na pozycji b_i ($i=1, \dots, m$) zaś $\Lambda_{1,i}$ - bitowi $b_i=1$ na pozycji i -tej. Oznaczmy symbol odebrany jako s . Jest to symbol o nieskorygowanej przez korektor wartości. Zgodnie z kryterium ML (lub MAP, gdy założymy, że każdy punkt konstelacji jest tak samo prawdopodobny) uproszczona wartość LLR dla bitu b_i ($i=1, \dots, m$) powinna być wyznaczana ze wzoru:

$$LLR(b_i) \approx -\frac{1}{\sigma^2} \left(\arg \min_{\lambda_0 \in \Lambda_{0,i}} |s - h\lambda_0|^2 - \arg \min_{\lambda_1 \in \Lambda_{1,i}} |s - h\lambda_1|^2 \right), \quad i = 1, \dots, m$$

gdzie h jest współczynnikiem kanału dla symbolu s . **Zatem, po bardziej precyzyjnym sformułowaniu wzoru (4.10) niż w pracy wyniki z niego uzyskane należałoby pomnożyć przez wartość $|h|^2$.**

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

Oryginalność rozprawy polega na zaproponowaniu algorytmów modelowania kanału radiowego w dziedzinie częstotliwości z uwzględnieniem zjawisk interferencji między podnośnymi sygnałów OFDM oraz interferencji międzysymbolowej wynikającej ze zbyt krótkiego przedrostka cyklicznego w porównaniu z długością odpowiedzi impulsowej kanału. Częściowe wyniki badań zostały opublikowane przez Autora w czasopiśmie *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* (lista JCR) i kilku konferencjach międzynarodowych, wśród których najbardziej wartościowe to EUSIPCO

2017, ISWCS 2018 oraz IEEE VTC 2018 – Fall). Częściowe wyniki przedstawione w artykule w czasopiśmie oraz w pracach konferencyjnych zostały więc poddane pozytywnej weryfikacji przez niezależnych recenzentów z kręgów międzynarodowych. Jest to dowodem wartości opracowanych wyników względem aktualnego stanu wiedzy.

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

Rozprawa jest napisana w sposób jasny i zrozumiały, choć w kilku wzorach można znaleźć usterki (np. wzór (2.3), wzór (4.10) lub też definicja macierzy F w kontekście dyskretnej odwrotnej transformacji Fouriera we wzorze (2.13)). Recenzent przyznaje, że w dłuższym tekście jest to trudne do uniknięcia. Autor dysponuje zaawansowaną umiejętnością posługiwania się językiem angielskim pozwalającą na formułowanie długich tekstów naukowych na dobrym poziomie, co trzeba docenić. Szkoda jedynie, że Autor nie dokonał jeszcze jednego przeglądu tekstu (samodzielnie lub z pomocą filologa). Dałoby się wtedy uniknąć wielu drobnych błędów językowych, które niestety w tekście można jeszcze znaleźć.

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

Słabe strony rozprawy zostały już w zasadzie wymienione powyżej. Szczególnie dotyczą one rozdziału o podstawach teoretycznych a częściowo również rozdziału z wynikami symulacyjnymi. Wymienione słabe strony nie mają jednak większego wpływu na wartość wyników rozprawy.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Autor rozpatruje w rozprawie zagadnienia o charakterze przydatnym dla modelowania transmisji sygnałów radiokomunikacji cyfrowej, w szczególności modele symulacyjne kanałów radiowych. Autor w zasadzie ograniczył swoje rozważania do systemów SISO. Wyniki byłyby znacznie bardziej przydatne, szczególnie w kontekście systemów 4G i 5G, gdyby Autor rozpatrywał działanie w trybie MIMO, o massive MIMO nie wspominając. Modele kanałów mogłyby się wtedy znacząco różnić stopniem komplikacji od tych rozpatrywanych w rozprawie.

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 nadmiarem
- e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.

Podsumowując pragnę podkreślić, że recenzowana rozprawa pomimo przedyskutowanych wyżej pewnych niedoskonałości, spełnia stosowne wymagania dotyczące prac doktorskich sformułowane w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Stosując tradycyjną skalę stopni oceniłbym ją na ocenę dobrą. W związku z tym wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

