

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI
POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ**

Tytuł rozprawy: **Non-Orthogonal Multiple Access with Successive Interference Cancellation and its Applications (Nieortogonalny wielodostęp z sukcesywną eliminacją interferencji i jego zastosowania)**

Autor rozprawy: **Hind Salim Ghazi**

Wprowadzenie

Recenzja sporządzona została w związku z umową o dzieło nr 0310/2021/24 zawartej pomiędzy Recenzentem a Wydziałem Informatyki Technicznej i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Informatyki Technicznej i Telekomunikacji w Politechnice Poznańskiej. Recenzję wykonano zgodnie z wymogami „Ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym” z dnia 20 lipca 2018 roku oraz „Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym” z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami.

1. Jaki jest problem naukowy (teza) rozprawy i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

Recenzowana rozprawa dotyczy bardzo istotnych zagadnień związanych z rozwojem nowych technologii sieci bezprzewodowych 5G i 6G, związanym z ogromnym wzrostem zapotrzebowania na usługi realizowane przez te sieci, w szczególności masowym stosowaniu technologii IoT (Internet of Thing), Industrial IoT (IIoT) i różnych scenariuszy połączeń pomiędzy urządzeniami (Device) typu D2X, pojazdami (Vehicle) V2X itp. Niezależnie od wielkiego zróżnicowania usług, typowego dla środowiska sieci heterogenicznych, wymagania dotyczące niezawodności, ciągłości połączeń, jakości transmisji, niezbędnej przepływności powodują ciągły wzrost zapotrzebowania na widmo częstotliwości.

Dwa kierunki prac są związane z problemem zasobów widmowych. Pierwszym jest ekspansja w kierunku coraz wyższych zakresów częstotliwości (fale THz, fale świetlne). Drugi polega na poszukiwaniu nowych technik transmisyjnych w kanałach radiowych dla lepszego ich wykorzystania. Recenzowana praca wiąże się z rozwojem technik dostępowych i sieciowych dla sieci Nowej Generacji (NG). Autor zaproponował nowe rozwiązanie detektora dla wieloużytkowej detekcji sygnałów w systemie Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) z zastosowaniem własnej propozycji wykorzystania techniki Successive Interference Cancellation (SIC).

Uważam, że problem naukowy pracy został zdefiniowany poprawnie i w sposób jasno określający obszar i zakres prac. Autor sformułował dwie tezy:

- Wydajność transmisji NOMA w łączu w górę, wspomaganą zasadą sukcesywnej eliminacji zakłóceń SIC, można znacznie poprawić w komunikacji cyfrowej poprzez zastosowanie nowego algorytmu detekcji, który umożliwi odbiornikowi prawidłowe wykrywanie informacji uczestniczących użytkowników, pomimo, że różnice przydzielonych im poziomów mocy są bardzo małe.

- Jakość transmisji dwukierunkowej retransmisji można poprawić poprzez zastosowanie proponowanej detekcji SIC w odbiorniku przekaźnika w takim systemie.

Tezy zostały sformułowane poprawnie, zgodnie z wyznaczonymi celami badań. Udowodnienie tez wymagało poszukiwań w obszarach związanych z pracą, znacznej wiedzy i umiejętności formułowania problemów naukowych i określania sposobów ich rozwiązania.

2. Czy autor rozwiązał postawiony problem i czy użył do tego właściwych metod?

Rezultaty uzyskane przez autora, zaprezentowane w pracy wskazują, że rozwiązał on zdefiniowany problem i tym samym udowodnił tezy rozprawy posługując się narzędziami analitycznymi i symulacyjnymi, właściwymi dla tego typu prac.

Rozprawa została napisana w sposób zwięzły i przejrzysty, jej tekst został podzielony na 6 rozdziałów. Układ rozdziałów i ich zawartość merytoryczna stanowią logiczny tok rozumowania, prowadzący do osiągnięcia postawionych celów rozprawy. Każdy z rozdziałów merytorycznych rozpoczyna się krótkim omówieniem zawartych w nim zagadnień i kończy podsumowującymi wnioskami.

Rozdział 2 zawiera teoretyczne podstawy dotyczące technik wielodostępu w systemach mobilnych. Scharakteryzowana została technika nieortogonalnego wielodostępu NOMA z szerokim przeglądem literatury, na podstawie której dokonano porównania metod ortogonalnych i nieortogonalnych dostępu w systemach, w szczególności opartych na różnicowaniu mocy sygnałów w downlinku i uplinku wykorzystując algorytmy usuwania interferujących sygnałów dla detekcji sygnału słabszego. Jako miarę w algorytmie klasyfikacji wykorzystano unormowaną wartość tłumienia kanału w stosunku do mocy interferencji i szumu. Scharakteryzowano 5 podstawowych technik proponowanych dla detekcji sygnału użytkownika. Opisano tu podstawowe algorytmy parowania sygnałów dla procesu decyzyjnego oraz wybrane metody alokacji mocy. W rozważaniach przyjęto kilka założeń. Po pierwsze, że szum i interferencja mają charakter gaussowski, co wymaga uzasadnienia, po drugie, że w kanałach dostępowych występują wielodrożna propagacja i szum gaussowski, co nie znajduje odbicia we wzorach na przepustowość (2.11, 2.12). Przedstawione w rozdziale analizy prowadzą do konkluzji o możliwości rozdzielania sygnałów według ich mocy z zastosowaniem algorytmu SIC. Noma jest jedną z kluczowych technik stosowanych w systemach 5G, gdyż, jak słusznie stwierdzono, charakteryzuje się wysoką efektywnością widmowa w porównaniu z metodami OMA. Szkoda, że autor nie przytoczył z literatury żadnej zależności lub rysunków ilustrujących stwierdzenia zapisane w podrozdziale 2.5.

Rozdział 3 rozpoczyna omówienie idei SIC i bardzo krótki fragment o jej zastosowaniu, po czym autor przechodzi do opisu detektorów opartych na SIC. Uważam, że bardzo krótki fragment dotyczący podstawowego schematu SIC, mógłby być przeniesiony do kolejnego podrozdziału bez zmniejszenia czytelności, gdzie zamieszczono opis idei detektora SIC w downlinku i uplinku systemu bazującego na dywersyfikacji mocy NOMA. Dla zwiększenia czytelności zamieszczono schematy odpowiednie dla dekodera w odbiornikach terminali użytkowników i stacji bazowej.

Następnie Autor opisał scenariusz badawczy dla przypadku transmisji uplink w systemie standardu IEEE 802.11 wykorzystującym technikę OFDM z kooperacyjnym dostępem sterowanym przez punkt dostępowy sieci WiFi. W badaniach przyjęto wykorzystanie 2 systemów modulacyjnych QPSK i 16QAM i zbadanie zachowania odbiornika wykorzystującego zaproponowaną i opisaną tu ze szczegółami metodę detektora NOMA SIC. Symulowano dwa rodzaje kanałów AWGN i wielościeżkowy z zanikami Rayleigha. Dla pierwszego przypadku nie zostały pokazane żadne wyniki, a Autor ograniczył się jedynie do stwierdzenia, że dekodery miękkie zapewniają 2dB zysk dla $BER=10^{-3}$ w porównaniu z dekoderni twardym. Dla przypadku drugiego przyjęto wykorzystać model kanału Naftali dla rozproszenia odpowiedniego dla typowych warunków propagacji, wykazując, że jakość detekcji jest lepsza dla większych różnic poziomów

mocy w łączach i maleje wraz ze wzrostem rozproszenia opóźnienia. Bardzo ważnym wnioskiem jest stwierdzenie, że ważna jest synchronizacja transmisji w obydwu kanałach.

W kolejnym 4 rozdziale Autor opisał własną propozycję algorytmu detekcji dla systemu NOMA, w którym zastosowano usprawnienie detektora SIC, którego idea jest stosowanie chwilowych decyzji dotyczących słabszych sygnałów, co w rezultacie zapewnia osiągnięcie bardziej miarodajnych decyzji o słabszych sygnałach.

W rozdziale można wyróżnić dwie części. W pierwszej zamieszczono opis modelu systemu transmisji OFDM z dwoma kanałami uplink oraz teoretyczne modele odbiorników ze standardowym detektorem SIC oraz proponowanym ulepszonym detektorem SIC. Następnie przeprowadzona została teoretyczna analiza prawdopodobieństwa błędów symboli w każdym z kanałów dla obydwu modeli. Niezależnie od faktu, że w analizie przyjęto uproszczenie pomijające wpływ kodowania kanałowego, uzyskano oryginalne wyrażenia określające prawdopodobieństwa błędów dla kanału silnego i słabego. Ważnym wnioskiem jest, że wykorzystanie tentatywnej decyzji z kanału 2 przy detekcji symboli w kanale 1, pozwala na wyznaczenia bardziej efektywnych wartości LLR detektora miękko-decyzyjnego dla łącza 1, co pozwala na korekcję większej liczby błędów w tym kanale. To z kolei przyczynia się do bardziej dokładnej rekonstrukcji sygnału X_1 i w rezultacie powoduje zmniejszenie prawdopodobieństwa błędów w kanale X_2 .

W drugiej części przedstawiono wyniki symulacji przeprowadzonych dla dwóch przypadków kanałów: z idealnymi współczynnikami i z estymowanymi współczynnikami. Ponieważ standard IEEE 802,11a nie wspiera systemu NOMA, Autor zaproponował prostą metodę estymacji współczynników kanału na podstawie preambuł wymiany krótkich pakietów na starcie NOMA z powtarzaniem w czasie zależnie od warunków kanału. Dla dłuższych pakietów testowych różnice między charakterystykami BER(SNR) uzyskiwanymi dla estymowanych parametrów i dla parametrów idealnych maleją. Na podstawie symulacji wykazano, że właściwości odbiorników z proponowanym rozwiązaniem detektora SIC są lepsze niż dla detektora standardowego w każdych warunkach dyspersyjnych w obydwu przypadkach, co uzasadnia pierwszą z tez rozprawy. Autor stawia wniosek, że zmiana procedury MAC w systemach WiFi z CSMA/CD na NOMA z SIC umożliwi odbiór sygnałów od terminali wielokrotnie lepszą jakością.

Następny 5 rozdział jest poświęcony udowodnieniu drugiej tezy rozprawy o skuteczności wykorzystania proponowanej metody detekcji SIC w sieciach ze stacjami przekaźnikowymi. Procedury bezprzewodowego kodowania sieci w warstwie fizycznej (WPNC) są proponowane w literaturze jako efektywne techniki zwiększenia przepustowości wielopakietowego systemu odbiorczego dzięki wykorzystaniu charakterystyk interferencji użytkownika. Rozdział zawiera szeroki przegląd metod bezprzewodowego kodowania sieciowego, w szczególności PNC, gdzie wykorzystywana jest rozsiewcza natura łączności bezprzewodowej pomiędzy użytkownikami, gdy nie występuje między nimi ścieżka bezpośrednia, a połączenie jest realizowane za pomocą dwukierunkowych przekaźników. PNC umożliwia tu dwufazową retransmisję jednocześnie w kanale w górę i w dół, gdzie węzeł przekaźnikowy odbiera sygnały od użytkowników i koduje transmisję w kanale w dół do terminali umożliwiając im detekcję adresowanych do nich sygnałów.

Następnie, w rozdziale opisano model systemu TWRC z PNC z dwoma terminalami. W eksperymencie symulacyjnym wykorzystano model sieci IEEE 802,11a z transmisją OFDM, jak poprzednio. Modele te zostały w sposób przejrzysty opisane i wykorzystane w badaniach symulacyjnych. Porównując wyniki uzyskane w warunkach kanału dyspersyjnego dla typowego dekodowania PNC z wynikami uzyskanymi dla proponowanego detektora SIC dla dwu przypadków z idealnymi i estymowanymi parametrami kanału, widać że proponowana metoda poprawia charakterystyki BER, co udowadnia drugą tezę rozprawy.

Rozprawę kończą zwięzłe wnioski. Podsumowano podstawowe osiągnięcia dysertacji oraz wskazano kierunki przyszłych badań.

Sposób rozwiązania problemu i doboru metod należy uznać za właściwe w sensie celów badawczych. Praca zawiera analizy teoretyczne, opisy proponowanych rozwiązań i procedur oraz

wyniki badań dla wybranych modeli symulacyjnych. Uzyskane wyniki zostały zinterpretowane poprawnie oraz zakończone konstruktywnymi wnioskami. Tym samym Doktorant, używając właściwych metod badawczych osiągnął zamierzony cel pracy, uzasadniając postawioną w niej tezę. Rozprawa jest napisana w sposób poprawny i zwięzły. Autor wykazał zdolność do poprawnego formułowania problemów, właściwie uogólniając i wykorzystując wyniki pochodzące z różnych źródeł bibliograficznych.

3. *Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?*

Znaczący wzrost przepływności dla sieci NG – 5G, a jeszcze większy zakładany dla sieci 6G jest istotnym wymaganiem dla zastosowania wszechobecnej transmisji bezprzewodowej. Wymaga to wzmocnionych praz w zakresie poszukiwania rozwiązań zwiększających efektywność wykorzystania dostępnych i nowych zasobów widmowych. Dotyczy to w szczególności zmian w warstwach fizycznej i sieciowej, które w dysertacji są przedmiotem badań.

A zatem rozprawa dotyczy „gorącego” obszaru intensywnych prac badawczych. Uzyskane rezultaty, których podstawowym efektem jest wykazane zwiększenie właściwości transmisyjnych z zastosowaniem proponowanych przez Autora rozwiązań są bardzo ważne z punktu widzenia rozwoju sieci horyzontu 2030.

4. *Na czym polega oryginalny dorobek autora i jakie jest jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?*

Autor uzyskał dwa podstawowe, znaczące osiągnięcia:

- algorytm odbioru sygnałów nadawanych z NOMA,
- koncepcja wykorzystania proponowanej metody NOMA SIC w dwukierunkowym układzie przekaźnikowym.

Do oryginalnego dorobku Autora zaliczam:

- analizy teoretyczne w zakresie Nieortogonalnego Multi-dostępu w sieciach bezprzewodowych zwłaszcza Nowych Generacji, jako metody zapewniającej znaczące zwiększenie efektywności wykorzystania zasobów radiowych,
- szczegółową analizę wykorzystania procedur SIC do detekcji sygnałów NOMA w szczególności w odbiornikach stacji bazowych,
- opracowanie autorskiej metody zwiększającej efektywność algorytmów unikania zakłóceń interferencyjnych MUI,
- analizę teoretyczną jakości transmisji przy zastosowaniu detekcji NOMA SIC z wyprowadzeniem zależności analitycznych wyznaczających prawdopodobieństwa błędu elementowego BER
- wykazanie wyższej skuteczności opracowanej metody w porównaniu do standardowych odbiorników NOMA SIC dla wybranego standardu bezprzewodowej sieci WiFi i związanego z tym opracowania modelu symulacyjnego sieci WiFi z proponowanymi modyfikacjami standardu IEEE 802.11a dotyczącymi wdrożenia NOMA i wykorzystania odbiornika SIC,
- analizę możliwości wykorzystania zaproponowanej metody w rozwiązaniach sieciowych z dwustronnym przekaźnikiem umożliwiającym połączenia w sytuacji bez bezpośredniej widoczności anten korespondentów, a w związku z tym opracowanie procedury dwukierunkowego relayingu wykorzystującego NOMA SIC w sieciach z kodowaniem warstwy fizycznej PNC,
- wykazanie większej efektywności w postaci redukcji BER dla zastosowania proponowanego rozwiązania w porównaniu z klasycznym PNC.

Należy podkreślić, że praca oprócz niewątpliwiej wartości poznawczej w zakresie sieci bezprzewodowych NG ma bardzo istotne znaczenie aplikacyjne, co sprawia, że jej przydatność praktyczna jest bardzo duża dla efektywnej implementacji systemów mobilnych 5G, a następnie 6G.

5. *Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy autora i znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?*

Z analizy merytorycznego zakresu rozprawy oraz wykazanego, oryginalnego dorobku Autora wynika, że posiada on dogłębną wiedzę w zakresie objętym rozprawą. Szczególnie dotyczy to standardów sieci bezprzewodowych, technik transmisyjnych proponowanych dla przyszłościowych systemów (zwłaszcza 5G), ale również obszarów modelowania oraz badań symulacyjnych, co świadczy o zdolności Autora do rozwiązywania samodzielnych problemów naukowych za pomocą opanowanego warsztatu badawczego.

Literatura jest dobrana właściwie i obejmuje najnowszą wiedzę w zakresie obszaru badawczego Doktoranta. Obszerny wykaz literatury świadczy o znajomości współczesnego stanu wiedzy w zakresie obszaru badań. Wykaz literatury zawiera 5 pozycji, których współautorem jest Hind Salim Ghazi.

6. *Jakie są wady i słabe strony rozprawy?*

Rozprawa jest napisana z dużą dbałością o poprawność językową i edytorską i nie zawiera błędów merytorycznych. Tym nie mniej występuje w pracy kilka niedociągnięć, które osłabiają wrażenie czytelnika. Zaliczam do nich:

- przede wszystkim brak jest czytelnego opisu modelu kanału propagacyjnego, w wielu miejscach znajdujemy fragmenty, czasami nieodpowiedniej interpretacji, jak np. na str.22 pod wzorem (2.2), gdzie napisano składnik ω i symbolizuje biały szum gaussowski włączając interferencje między-komórkowe, co sugeruje, że ten szum zawiera interferencje, a to wymaga dodatkowego komentarza, tym bardziej, że w kolejnych zdaniach pojawia się wartość $N_{0,i}$, która oznacza moc zakłóceń uwzględniającą szum i interferencje,
- niezrozumiałe jest używanie pojęć complex channel coefficient h_i , channel gain g_i , propagation pathloss g_i ,
- dlaczego zakłada się, że dla strong user tłumienie jest większe niż dla weak user (str.50), chyba jest odwrotnie, ponieważ pierwszy z użytkowników jest bliżej, co zresztą widać na rys 2.10 oraz na przykładzie rys.3.12, że gdy moc weak channel jest większa $g=0.1$ charakterystyka błędów się pogarsza,
- na rys.4.8 zilustrowano obszary decyzyjne dla detekcji symboli X_2 , natomiast w zależności (4.25) występują inne granice całkowania, a to wymaga wyjaśnienia.

Mam też drobną uwagę dotyczącą rysunków 5.2 i 5.3, gdzie strzałki niebieskie od użytkownika B powinny być inaczej skierowane.

7. *Do której z wymienionych kategorii Recenzent zalicza rozprawę:*

- a) *niespełniających wymagań,*
- b) *wymagającą wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,*
- c) *zadowalająco spełniającą wymagania*
- d) *wyraźnie wykraczająca poza poziom przeciętny (spełniająca wymagania z nadmiarem)*
- e) *wybitnie dobra.*

Reasumując, uważam, że Autor rozwiązał problem naukowy osiągając zamierzone cele, a sposób rozwiązania i zawartość merytoryczna przedstawionej rozprawy spełnia zadowalająco wymagania stawiane przez obowiązujące przepisy rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

