



POLITECHNIKA
GDAŃSKA



WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI
I INFORMATYKI

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł oryginalny: Modeling of Directional Radio Links and the Accuracy of 5G Link Budget Estimation

Tytuł w języku polskim: Modelowanie radiowego łącza kierunkowego a poprawność estymacji bilansu energetycznego w systemach 5G

Autor: Mgr inż. Kamil Bechta

Promotor: Dr hab. inż. Cezary Ziółkowski, prof. WAT

Promotor pomocniczy: Dr hab. inż. Jan Kelner

Recenzent: Dr hab. inż. Sławomir J. Ambroziak, prof. PG
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
e-mail: slawomir.ambroziak@pg.edu.pl
tel.: +48 516-470-737

Data recenzji: 14.06.2021 r.



1. Podstawa prawna i układ recenzji

Podstawą prawną sporządzenia niniejszej recenzji jest Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego nr 35/RDN ITiT/2021 z dnia 11 maja 2021 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kamila Mirosława Bechty. Uchwała ta została podjęta w związku z art. 190 ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” i na podstawie przepisów wewnętrznych Wojskowej Akademii Technicznej.

Recenzja dotyczy najistotniejszych zagadnień dotyczących zarówno zawartości merytorycznej rozprawy, jak i jej strony formalnej. W kolejnych częściach recenzji odniesiono się do następujących aspektów rozprawy:

- charakter rozprawy,
- cel badań i teza rozprawy,
- zastosowana metodyka badawcza,
- oryginalność rozprawy,
- analiza źródeł bibliograficznych,
- analiza strony formalnej rozprawy,
- słabe strony rozprawy,
- przydatność praktyczna otrzymanych wyników.

W ostatniej części przedstawiono podsumowanie recenzji oraz decyzję dotyczącą spełniania wymagań wynikających z art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”.



2. Charakter rozprawy

Rozprawę doktorską pana mgr. inż. Kamila Bechty stanowi zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie czternastu artykułów naukowych, co pozostaje w zgodzie z zapisami art. 187 ust. 3 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”.

Rozprawa ma charakter doświadczalny i dotyczy zagadnień zastosowania skutecznych charakterystyk promieniowania anten do zwiększenia dokładności szacowania bilansu kierunkowego łącza radiowego w sieciach piątej generacji. Istotna część przeprowadzonych badań była oparta na symulacjach, w szczególności: porównanie charakterystyk nominalnych i skutecznych różnych typów anten, analiza wpływu zastosowania skutecznych charakterystyk anten na wyniki określania maksymalnej ekspozycji na promieniowanie elektromagnetyczne od stacji bazowych sieci 5G, szacowanie wzajemnych interferencji między urządzeniami sieci radiowej CBRS (*Citizens Broadband Radio Service*), czy też analiza porównawcza metod wspólnego modelowania charakterystyki anteny kierunkowej i zjawiska kąтового rozpraszania mocy w kanale radiowym. Z drugiej strony, na drodze do udowodnienia postawionej tezy i weryfikacji zaproponowanych rozwiązań, doktorant przeprowadził również badania pomiarowe, które posłużyły m.in. do estymacji kąтового rozproszenia mocy w określonych warunkach propagacyjnych i dla różnych rodzajów anten.

3. Cel badań i teza rozprawy

Głównym celem rozprawy była ocena wpływu wspólnego modelowania charakterystyki anteny kierunkowej i zjawiska kąтового rozproszenia mocy w kanale radiowym na poprawność szacowania bilansu energetycznego łącza radiowego w systemach 5G, co ma kluczowe znaczenie dla efektywnego procesu planowania i optymalizacji każdej sieci radiowej, także sieci piątej generacji. Zarówno motywacja podjęcia badań, jak i ich cel zostały przedstawione w rozprawie



w sposób bardzo czytelny i jasny. Podczas realizacji kolejnych etapów badań, pan mgr inż. Kamil Bechta starał się dowieść metodami naukowymi prawdziwości postawionej przez siebie tezy, która została sformułowana w sposób następujący:

Odwzorowanie wpływu zjawiska kąowego rozproszenia mocy na charakterystyki anten kierunkowych z kształtowaną wiązką w znaczący sposób zwiększa dokładność szacowania bilansu energetycznego łącza radiowego, a także efektywność procesu planowania i optymalizacji sieci 5G.

4. Zastosowana metodyka badawcza

Z uwagi na fakt, że rozprawa ma charakter doświadczalny, dowody na potwierdzenie postawionej tezy uzyskane zostały w wyniku eksperymentów przeprowadzonych zarówno w środowisku symulacyjnym, jak i w wyniku pomiarów zrealizowanych w warunkach rzeczywistych.

W pierwszej kolejności zdefiniowano pojęcia nominalnych i skutecznych charakterystyk anteny, a następnie przeprowadzono symulacje mające na celu porównanie obu typów charakterystyk z uwzględnieniem różnych rodzajów anten i układów antenowych oraz kanałów radiowych dla różnych środowisk zdefiniowanych w dokumencie 3GPP TR 38.901, pt. „*Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*”. Wykazano, że stosowanie charakterystyk nominalnych powoduje przeszacowanie poziomu sygnału użytecznego w łączu w dół, a także niedoszacowanie poziomu interferencji w tym łączu, co bezpośrednio prowadzi do istotnego przeszacowania stosunku mocy sygnału do mocy szumu i interferencji (SINR) w łączu w dół. W takim stanie rzeczy zaproponowano metodę poprawy stosunku SINR, która polega na zastąpieniu w obliczeniach zysku nominalnego anteny jej zyskiem skutecznym. Dokładność zaproponowanej metody oraz jej przydatność zostały potwierdzone symulacyjnie.



W kolejnym kroku na bazie badań pomiarowych przeprowadzono estymację kąтового rozproszenia mocy w określonych warunkach propagacyjnych i dla różnych układów antenowych, a następnie przeprowadzono optymalizację geometrii wybranych układów antenowych, mającą na celu maksymalizację mocy promieniowanej (dla anten nadawczych), czy też mocy odbieranej (dla anten odbiorczych) w określonych warunkach propagacyjnych. Zaproponowana metoda optymalizacyjna, stanowiąca przedmiot zgłoszenia patentowego, została zweryfikowana zarówno symulacyjnie jak i pomiarowo. Wykazano, że dzięki zastosowaniu zaproponowanej metody optymalizacji geometrii układu antenowego można uzyskać znaczący wzrost stosunku SINR w łączu w dół (nawet o 6,6 dB), co ma przełożenie na istotny wzrost pojemności sieci.

Trzeci etap badań skoncentrowany był na wpływie uwzględniania skutecznych charakterystyk promieniowania anten na wyniki określania maksymalnej ekspozycji na promieniowanie elektromagnetyczne pochodzące od stacji bazowych 5G. Wykazano, że w rzeczywistych środowiskach propagacyjnych istnieje duże ryzyko przeszacowania maksymalnej ekspozycji (nawet o ponad 4 dB) w porównaniu z dotychczas stosowanymi metodami, wykorzystującymi nominalne charakterystyki promieniowania anten, czego konsekwencją może być niepotrzebne ograniczanie mocy nadawanej w łączu w dół albo przeszacowanie zasięgów stref ochronnych. W świetle powyższego zaproponowano metodę redukcji tego przeszacowania przy pomocy skutecznego współczynnika ekstrapolacji, uwzględniającego rzeczywiste warunki propagacyjne. Zaproponowana metoda jest zdecydowanie mniej złożona obliczeniowo w porównaniu z metodą symulacyjną, wykorzystującą pełen model kanału radiowego. Na podkreślenie zasługuje fakt, że zaproponowana przez doktoranta metoda została uwzględniona w najnowszej wersji standardu IEC 62232:2017, pt. *„Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radio-communication base stations for the purpose of evaluating human exposure”*.



Badania przeprowadzone w kolejnym etapie miały na celu ocenę różnicy dokładności szacowania parametrów sieci radiowej CBRS (*Citizens Broadband Radio Service*) pracującej na częstotliwości 3,5 GHz, przy zastosowaniu nominalnych i skutecznych charakterystyk anten podczas analizy interferencji. Uzyskane w wyniku symulacji wyniki pokazują, że wartość interferencji pomiędzy parą urządzeń CBSD (*CBRS Device*) może być niedoszacowana nawet o 6 dB w przypadku stosowania w obliczeniach bilansu energetycznego łącza radiowego nominalnej charakterystyki anteny, co ma bezpośredni wpływ na efektywność rozdziału zasobów radiowych w systemach z dynamicznym dostępem do widma. Wobec powyższego zaproponowano algorytm przydziału kanałów w sieciach CBRS, który bazuje na sieciach neuronowych i który również jest przedmiotem zgłoszenia patentowego.

W ramach ostatniej części badań przeprowadzono analizę porównawczą dwóch różnych metod wspólnego modelowania charakterystyki anteny kierunkowej i zjawiska kąowego rozpraszania mocy w kanale radiowym. Opisywane w rozprawie podejście, polegające na wyznaczeniu skutecznej charakterystyki anteny zostało porównane z metodą modelowania kąowego rozproszenia mocy z wykorzystaniem wieloeliptycznego modelu propagacyjnego MPM (*Multi-elliptical Propagation Model*). Przeprowadzone eksperymenty symulacyjne pokazały, że w przypadku stosowania obu metod uzyskiwane wyniki są podobne, co pozwala uznać metodę MPM za wystarczająco skuteczną, stanowiącą alternatywę dla czasochłonnych symulacji z wykorzystaniem pełnego modelu kanału radiowego.

5. Oryginalność rozprawy

W rozprawie zaproponowano koncepcję skutecznej charakterystyki promieniowania anteny wraz z metodą szacowania skutecznego zysku anteny i zwiększenia dokładności szacowania bilansu energie-



tycznego łącza radiowego. Opracowano algorytm optymalizujący geometrię układu antenowego w określonych warunkach propagacyjnych, który ma na celu zwęszanie skutecznego zysku układu antenowego. Zaproponowano także metodę szacowania kąтового rozproszenia mocy, bazującą na minimalizacji liczby niezbędnych do tego celu pomiarów. Oryginalnym rozwiązaniem zaprezentowanym w rozprawie jest również metoda szacowania maksymalnej ekspozycji na promieniowanie elektromagnetyczne w warunkach kąтового rozproszenia mocy i z wykorzystaniem skutecznego współczynnika ekstrapolacji. Kolejnym osiągnięciem przedłożonej rozprawy jest zaproponowanie metody poprawy efektywności przydziału kanałów w sieciach CBRS, która to metoda stanowiła podstawę do rozszerzenia wymagań stawianych w specyfikacjach WINNF-TS-3002, pt. „*Signalling Protocols and Procedures for Citizens Broadband Radio Service (CBRS): Extension to Spectrum Access System (SAS) - Citizens Broadband Radio Service Device (CBSD) Interface Technical Specification*” oraz WINNF-TS-5006, pt. „*CBSD Antenna Pattern Database Technical Specification*”. Ostatnim niezwykle istotnym osiągnięciem jest wykazanie, że model MPM może być traktowany jako alternatywa dla powszechnie stosowanego modelu kanału radiowego zdefiniowanego przez 3GPP.

W świetle powyższego należy uznać, że oryginalne osiągnięcia rozprawy w istotny i niezaprzeczany sposób poszerzają obecny stan wiedzy.

6. Analiza źródeł bibliograficznych

Przez wzgląd na charakter i konstrukcję rozprawy, każdy artykuł naukowy zawiera swój własny wykaz źródeł bibliograficznych, przy czym na podkreślenie zasługuje fakt, że są to pozycje aktualne i tematycznie zbieżne z przedmiotem rozprawy. Wskazuje to na dobrą orientację doktoranta w aktualnym stanie wiedzy w zakresie zarówno najnowszych badań naukowych, jak i standardów dotyczących sieci piątej generacji. Warto również zauważyć, że doktorant odwołuje



się także do prac swojego autorstwa, co z jednej strony wskazuje, że prowadzone przez niego prace wpisują się w najnowsze trendy rozwoju radiokomunikacji, z drugiej natomiast świadczy o powiązaniu tematycznym przedłożonego do recenzji cyklu publikacji.

7. Analiza strony formalnej rozprawy

Strukturę dokumentu stanowiącego podstawę niniejszej recenzji należy uznać za poprawną, kompletną i czytelną. W skład dokumentu wchodzi streszczenia w języku angielskim i polskim, lista przedkładanych publikacji naukowych wraz ze szczegółowym opisem wkładu doktoranta w powstanie poszczególnych artykułów, lista rysunków, lista skrótów oraz lista załączników w postaci przedkładanych artykułów składających się na monotematyczny cykl publikacji. Główną częścią dokumentu jest napisana w języku angielskim charakterystyka przeprowadzonych prac badawczych, która obejmuje swoim zakresem wstęp, motywację i cele przeprowadzonych prac badawczych wraz z tezą rozprawy, a także główne wyniki badań, które stanowią podstawę do stwierdzenia, że teza rozprawy została dowiedziona, co zostało podkreślone w podsumowaniu.

Jak to zostało wcześniej wspomniane, rozprawę doktorską stanowi zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie czternastu artykułów naukowych. Spośród przedstawionych artykułów, pięć stanowi artykuły w renomowanych wysokopunktowanych czasopismach (m.in. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* - 200 punktów MEiN, *IEEE Access* - 100 punktów MEiN, czy też *Sensors* - 100 punktów MEiN), a siedem pozycji to referaty opublikowane i wygłoszone na niezwykle istotnych z punktu widzenia tematyki rozprawy konferencjach międzynarodowych (m.in. *IEEE 5G World Forum*, *European Conference on Antennas and Propagation*, *European Conference on Networks and Communications*). Dwa artykuły zostały zgłoszone do publikacji w czasopismach i w momencie składania rozprawy doktorskiej były w fazie recenzji.



Zdecydowana większość, bo aż trzynaście artykułów składających się na cykl publikacji, to artykuły stanowiące pracę zbiorową, a jeden to artykuł w pełni indywidualny, przy czym należy zauważyć, że w jedenastu artykułach pan mgr inż. Kamil Bechta jest wymieniany jako pierwszy autor, co może świadczyć o jego kluczowej roli podczas prowadzenia badań i prezentacji ich wyników. Na podkreślenie zasługuje również to, że prace badawcze prowadzone są przez doktoranta we współpracy z firmą Nokia (jej oddziałami w Polsce, Francji i Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej) oraz z Wojskową Akademią Techniczną. Wobec powyższego fakt, że przedłożone artykuły naukowe są pracami zbiorowymi, stanowi naturalną konsekwencję prowadzenia badań w międzynarodowym zespole badawczym, przy oczywistym założeniu, że wkład doktoranta w osiągnięcie przedstawianych wyników jest szczegółowo wyodrębniony, co w przypadku recenzowanej pracy zostało przedstawione w rozdziale drugim rozprawy.

8. Słabe strony rozprawy

Podobnie jak w każdej pracy naukowej i każdym opracowaniu ją opisującym, także w recenzowanej rozprawie wnikliwy czytelnik może dopatrzeć się słabych stron, przy czym warto podkreślić, że w przypadku rozprawy pana mgr. inż. Kamila Bechty istotnych uwag dotyczących aspektów merytorycznych jest niewiele. W tym miejscu można stwierdzić, że pewien niedosyt może budzić fakt, iż nie wszystkie badania symulacyjne zostały zweryfikowane na drodze pomiarowej, dzięki czemu i tak już wysoka wartość merytoryczna pracy mogłaby zostać jeszcze zwiększona. Należy także zwrócić uwagę na drobniejsze błędy i uchybienia rozprawy, wymienione poniżej:

- W polskojęzycznym streszczeniu doktorant pisze o komorze bezechowej, co w opinii recenzenta stanowi kalkę z języka angielskiego, a poprawny termin w języku polskim to komora bezodbićciowa.



- Na stronie 5. rozprawy, w 9. wierszu drugiego akapitu błąd literowy, a mianowicie: „...stosunku sygnału użytecznego do szumi...”.
- Na stronie 20. rozprawy, w 2. wierszu pod równaniem (D-5), a także na stronie 30., w 3. wierszu pod równaniem (D-10), zdania rozpoczynają się od symboli matematycznych, co w opinii recenzenta jest niezalecane.
- W równaniach (D-7) i (D-8) nie podano w jakich jednostkach wyrażone zostały parametry $B_{v0}, B_{h0}, B_{ve}, B_{he}, \sigma_v, \sigma_h$.
- Wyższa rozdzielczość wykresów na rys. D-5 znacząco zwiększyłaby ich czytelność i estetykę.
- W równaniach (D-11)-(D-14) nie podano w jakich jednostkach wyrażone zostały parametry $B_{h0}^{Nom}, B_h^{Nom}, B_{v0}^{Nom}, B_v^{Nom}, \sigma_v, \sigma_h$.

Należy podkreślić, że wyżej wymienione słabe strony rozprawy nie mają istotnego wpływu na jej wysoki poziom naukowy.

9. Przydatność praktyczna otrzymanych wyników

Zaprezentowane w rozprawie wyniki prowadzonych prac badawczych mogą znaleźć i znajdują zastosowanie w procesie planowania i optymalizacji sieci piątej generacji. Nie bez znaczenia jest fakt, że prace te prowadzone są przez doktoranta we współpracy z firmą Nokia (jej oddziałami w Polsce, Francji i Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej), która jest bezpośrednio zainteresowana zwiększaniem wydajności sieci 5G. Ponadto, jak to zostało już wspomniane, zaproponowane rozwiązania zostały zgłoszone do ochrony patentowej, a także zostały uwzględnione w odpowiednich standardach.



10. Podsumowanie

Po zapoznaniu się recenzenta z przedłożoną rozprawą doktorską oraz po przeanalizowaniu jej różnych aspektów należy stwierdzić, że bez wątpienia prezentuje ona ogólną wiedzę teoretyczną doktoranta oraz oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego. Ponadto sposób przeprowadzenia badań i ich dokumentacji jednoznacznie pokazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez doktoranta.

Mając na względzie powyższe, a także uwzględniając poprawną stronę formalną rozprawy doktorskiej, należy uznać rozprawę doktorską pana mgr. inż. Kamila Bechty za spełniającą wymogi wynikające z art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Dodatkowo wysoki poziom naukowy rozprawy i jej bardzo duże znaczenie praktyczne pozwala wnioskować o jej wyróżnienie.

Stawomir J. Rubiński