



**Politechnika Wroclawska**

**FIELD OF SCIENCE: Engineering and Technology**

**DISCIPLINE OF SCIENCE: Information and Communication Technology**

## **DOCTORAL DISSERTATION**

### **Improvements of the Performance of Energy-Efficient 5G Massive MIMO Base Stations**

**Łukasz Skomra**

**Supervisor:**

**Prof. dr hab. inż. Kamil Staniec**

**Assistant supervisor:**

**Dr.-Ing. Björn Jelonnek**

**Keywords: Massive MIMO, distortion, energy consumption, peak-to-average-power ratio reduction**

**WROCŁAW 2024**

## Streszczenie

Stacje bazowe wykorzystujące systemy wieloantenowe Massive MIMO (ang. *Massive multiple-input multiple-output*), używane w sieciach komórkowych 5. generacji, umożliwiają bezprecedensowy wzrost osiągalnych szybkości transmisji danych dzięki multipleksowaniu przestrzennemu wielu użytkowników. Ponieważ obiekty infrastruktury stacji bazowych odpowiadają za większość zużycia energii elektrycznej w sieciach komórkowych, energooszczędna praca stacji bazowych Massive MIMO jest kluczem do zrównoważonego zapewnienia wysokiej wydajności wielu użytkownikom sieci.

Znaczna część literatury dotyczącej Massive MIMO albo zakłada, że zniekształcenia wprowadzane w nadajnikach (ang. *transmitters*, TXs) stacji bazowych łączą się w sposób niespójny po stronie użytkownika, albo wprost ignoruje w analizie wpływ niedoskonałości sprzętowych. Tego rodzaju uproszczenia mogą prowadzić do użytecznych w praktyce wniosków, pod warunkiem unikania nasycenia we wzmacniaczach mocy (ang. *power amplifiers*, PAs). Jednak zastosowanie w tym celu restrykcyjnego ograniczenia poziomu mocy wejściowej (ang. *input back-off*, IBO) pogarsza efektywność energetyczną. Dążąc do zmniejszenia wymaganego IBO, wiele prac badawczych nad redukcją stosunku mocy szczytowej do średniej (ang. *peak-to-average-power ratio*, PAPR) wykorzystuje stopnie swobody w kanale Massive MIMO dążąc do osiągnięcia transmisji wolnej od zniekształceń. W praktyce może to być nadmiernie restrykcyjne założenie. Zarówno szum odbiornika jak i odebrane zakłócenia z transmisji do innych użytkowników (w tej samej lub innej komórce) ograniczają szybkość łącza w dół (ang. *downlink*, DL), niezależnie od wpływu zniekształceń.

Celem niniejszej rozprawy jest wyjaśnienie, czy zniekształcenia wprowadzane do sygnału w stacjach bazowych Massive MIMO mogą istotnie wpływać na szybkość transmisji danych w DL. Zniekształcenia nieliniowe wprowadzane przez ograniczenie mocy szczytowej, wynikające z nasycenia w PA lub z redukcji PAPR, stanowią kluczowy element analizy. Zakres badań obejmuje kompaktowe liniowe i prostokątne układy antenowe.

Pierwszym istotnym rezultatem rozprawy jest zaproponowanie dwóch modeli predykcyjnych dla określenia wielkości wektora błędu (ang. *error vector magnitude*, EVM) po stronie użytkownika, w scenariuszach komunikacji z LoS (ang. *line-of-sight*), w oparciu o oczekiwania dotyczące charakterystyki promieniowania produktów intermodulacji (ang. *intermodulation products*, IMPs) trzeciego rzędu. Pierwszy z zaproponowanych modeli bazuje na kategoryzacji IMPs na kierowane do użytkowników i filtrowane przestrzennie (promieniujące w konkretnych kierunkach). Część energii IMP, która jest wprost kierowana

w kierunkach zgodnych z sygnałem transmitowanym do użytkowników zmniejsza się wraz ze wzrostem liczby multipleksowanych przestrzennie użytkowników. Jednakże wykazano analitycznie, że istnieją niekorzystne kombinacje kierunków kątowych użytkowników, skutkujące promieniowaniem części filtrowanych przestrzennie IMPs również w kierunkach użytkowników. Drugi z modeli, bazujący na analizie macierzy prekodowania, obejmuje przypadki niekorzystnych kombinacji kierunków kątowych transmisji i odzwierciedla skutki ograniczonej rozdzielczości kątowej układu antenowego.

Badania zależności EVM od kombinacji lokalizacjach użytkowników przeprowadzono w oparciu o metodę Monte Carlo. Porównano statystyki uzyskane dla symulacji numerycznych z modelu predykcyjnego opartego na prekodowaniu i symulacji poziomu łącza (ang. *link-level simulation*, LLS), wykorzystując redukcję PAPR z podejściem opartym o ICF (ang. *iterative clipping and filtering*) jako źródło zniekształceń nieliniowych. Uzyskana prognoza była ogólnie pesymistyczna, zgodnie z oczekiwaniami wynikającymi z modelowania jedynie IMP trzeciego rzędu, z typowym odchyleniem około 0.7 dB. Wynik ten sugeruje, że proponowany model może stosunkowo dobrze odzwierciedlać zależność od kierunków kątowych transmisji w statystykach EVM, dla zniekształceń nieliniowych wynikających z ograniczenia mocy szczytowej.

W rozważaniach wpływu zniekształceń na osiągalne szybkości transmisji danych w DL, obliczenia wydajności widmowej uzupełniono o czynnik uwzględniający moc zniekształceń odbieranych przez użytkownika, oszacowaną na podstawie modeli predykcyjnych EVM. Związek między rozkładem stosunku sygnału do zakłóceń i szumu (ang. *signal-to-interference-plus-noise ratio*, SINR) w sieci komórkowej a wpływem zniekształceń badano za pomocą symulacji numerycznych wykorzystując metodę Monte Carlo. Zgodnie z oczekiwaniami, zakres zaobserwowanego SINR był stosunkowo szeroki (około 20 dB rozpiętości pomiędzy 10. a 90. percentylem), co skutkowało różnym poziomem istotności wpływu zniekształceń na poszczególne transmisje. W przykładzie z 16 komórkami, obniżenie IBO z 10 dB do 6 dB spowodowało ponad 20% redukcję szacowanego zużycia energii, kosztem spadku przepustowości komórek o mniej niż 3%.

Specyficzne zestawy kombinacji kierunków kątowych transmisji prowadzące do promieniowania wszystkich wygenerowanych IMPs w kierunku użytkowników zostały zidentyfikowane analitycznie i potwierdzone w LLS. W tych odstających scenariuszach można oczekiwać pełnej spójnej kombinacji zniekształceń w lokalizacjach użytkowników, niezależnie od liczby anten oraz ilości zmultipleksowanych przestrzennie warstw transmisji. W efekcie, widoczny jest brak poprawy EVM mierzonego dla użytkownika w porównaniu