

Poznań University of Technology
Faculty of Computing and Telecommunications
Institute of Radiocommunications



Abstract of Doctor of Philosophy Dissertation

New Two-Way Relaying Transmission Schemes for 5G Wireless Communication Systems

Nowe techniki transmisji dwukierunkowej przez
stację przekaźnikową w systemach 5G

mgr inż. Karolina Lenarska

Supervisor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Wesółowski

Poznań, 2024

1. Abstract

Wireless communications is one of the fastest developing technologies in our time, with new products and services emerging on an almost daily basis. These developments present enormous challenges for communications engineers, as the demand for increased wireless capacity grows explosively.

One of the key technology components proposed to meet these expectations is the introduction of Relay Nodes (RN), which play an important role in 5G mobile networks. Relays have the ability to increase the reliability and capacity of the system while at the same time reducing operational costs. A particularly promising relay technology is bidirectional communication through the relay. The classic approach of the so-called two-way relaying involves two users exchanging messages; however, in the literature extended communication flows are also introduced such as MIMO Y channel that considers three users instead of two.

Due to the broadcast nature of the wireless medium, simultaneous transmission within the same frequency band from multiple transmitters to the relay, as well as multi-user transmission from the relay to all users inevitably result in interference among them. Consequently, effectively managing this interference at the receiver emerges as one of the primary challenges. This dissertation addresses the problem of interference management in the bidirectional communication through the relay by means of multiple antenna transmission (MIMO) with user-specific, advanced precoders and dedicated receivers.

First, a new method for the broadcast phase of two-way relaying is introduced, incorporating MU-MIMO with the proposed Maximum Ratio Transmission (MRT) and Codebook Maximum Ratio Transmission (CB-MRT) precoders, along with an interference cancellation receiver. Simulation results show that this advanced beamforming approach effectively reduces interference during the broadcast phase, achieving both low Block Error Rate (BLER) and high throughput. Furthermore, compared to the traditional network coding scheme, this new transceiver design offers flexibility in selecting modulation and coding schemes for each message and accommodating asymmetric traffic.

In the second research problem addressed in this dissertation, the focus shifts to a more advanced communication flow: the MIMO Y channel with a Signal Space Alignment (SSA) technique utilized in the multiple access phase. The SSA scheme, when combined with well-designed beamforming vectors, effectively aligns the data signals received by the relay to match its receiving capabilities. However, its robustness against an additional interference source, such as an adversarial jammer that intentionally interrupts legitimate transmissions, degrading reception performance, has not been considered in the literature.

This dissertation presents two antijamming strategies designed to mitigate the jammer signal at the relay. The first strategy introduces a new precoding algorithm, called Antijamming SSA (AJ-SSA), which projects the jamming signal and interference onto the null space of each signal pair. The second strategy, named Jammer's Interference Cancellation (J-IC), applies standard SSA at the transmitter and then removes jammer-induced interference at the relay by subtracting an estimate of the disturbance, based on minimizing received signal energy, from the incoming signal. The performance of these strategies in terms of BLER in various channel configurations is verified through link-level simulations, demonstrating their effectiveness in mitigating

jamming signals in the SSA-based MIMO Y channel.

The author constructed the simulation package which models the physical layer of the 5G system and was used in simulation experiments to validate the proposed solutions. For that reason, the chapters containing the reports on the performed research have been preceded by the chapter introducing basic features of the 5G physical layer that are further needed in the investigations. It should be noted that the main results reported in this thesis have already been partially verified in the review process due to previous publications in the international journal and the international conference.

2. Streszczenie

Komunikacja bezprzewodowa jest jedną z najszybciej rozwijających się technologii naszych czasów z regularnie pojawiającymi się nowymi usługami i produktami. Ten dynamiczny rozwój stawia przed projektantami systemów bezprzewodowych znaczące wyzwania i niesie za sobą rosnące wymagania w zakresie przepustowości, niskiego opóźnienia i niezawodności sieci komunikacyjnych.

Jedną z kluczowych idei zaproponowanych w celu sprostania tym oczekiwaniom jest wprowadzenie stacji przekanikowych (ang. *Relay Nodes*, RN), które odgrywają istotną rolę w sieciach komórkowych 5G, ponieważ przyczyniają się do zwiększenia niezawodności i pojemności systemu, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów operacyjnych. Szczególnie obiecującym wykorzystaniem przekaźników jest transmisja dwukierunkowa (ang. *Two Way Relaying*, TWR), w której dwie oddalone od siebie stacje wymieniają się wiadomościami za pośrednictwem stacji przekaźnikowej. W literaturze zaproponowano wiele rozszerzeń schematu TWR, w tym transmisję dwukierunkową z trzema stacjami nadawczymi, określaną jako schemat „MIMO Y”.

Ze względu na specyfikę komunikacji bezprzewodowej, jednoczesna transmisja w tym samym paśmie częstotliwości od wielu stacji do przekaźnika, a także transmisja z przekaźnika do wszystkich użytkowników nieuchronnie prowadzi do wystąpienia zakłóceń między sygnałami różnych użytkowników. W związku z tym, efektywne zarządzanie interferencją staje się jednym z podstawowych wyzwań tego typu technik. Niniejsza dysertacja poświęcona została problemowi zarządzania interferencją w komunikacji dwukierunkowej przez przekaźnik poprzez wykorzystanie transmisji wieloantenowej (ang. *Multiple-Input-Multiple-Output*, MIMO), zaawansowanych technik prekodowania oraz korekcji sygnałów w odbiorniku.

W rozprawie przedstawiono dwie nowe metody realizacji fazy rozgłoszeniowej schematu TWR, bazujące na technice MU-MIMO (ang. *Multi-User MIMO*). Zaproponowano dwa algorytmy kodowania wstępnego - MRT (ang. *Maximum Ratio Transmission*) oraz CB-MRT (ang. *Codebook-MRT*) mające na celu ukształtowanie wiązek dedykowanych do każdej stacji odbiorczej w taki sposób, aby maksymalizować sygnał pożądaný. Zakłócenia pochodzące od sygnału przeznaczonego dla drugiej stacji, usuwano w korektorze każdego odbiornika. Przeprowadzone badania pozwoliły na zweryfikowanie zaprezentowanej techniki transmisyjnej dla fazy rozgłoszeniowej schematu TWR i potwierdziły skuteczność zaproponowanych algorytmów.

Kolejnym zagadnieniem rozważanym w tej rozprawie jest wieloantenowa dwukierunkowa transmisja przez stację przekaźnikową z trzema użytkownikami (model MIMO Y), transmitującymi po jednej wiadomości do każdego z dwóch pozostałych użytkowników. Faza wielodostępu została zrealizowana z wykorzystaniem techniki SSA (ang. *Signal Space Alignment*), której zadaniem jest takie ukształtowanie sygnałów transmitowanych przez każdego użytkownika, aby w odbiorniku stacji przekaźnikowej nałożyły się one na siebie w taki sposób, by dopasować się do jego zdolności odbiorczych. Technika SSA z dobrze zaprojektowanymi wektorami prekodowania wstępnego efektywnie zarządza interferencją między użytkownikami, natomiast jej odporność na dodatkowe źródła zakłóceń nie była rozważana w literaturze. W związku z tym, w niniejszej rozprawie zaproponowano dwie strategie eliminacji interferencji pochodzącej od zewnętrznego urządzenia zakłócającego. W ramach pierwszego rozwiązania o nazwie AJ-SSA (ang. *Antijamming Signal Space Alignment*), wektory kodowania wstępnego oraz korektor w odbiorniku, zaprojektowane są w taki sposób, aby zarówno interferencja po-

chodząca od innych sygnałów danych jak i ta pochodząca od stacji zakłócającej zostały wyzerowane. W drugiej strategii o nazwie J-IC (ang. *Jammer's Interference Cancellation*) eliminacja zakłóceń pochodzących od stacji zewnętrznej odbywa się tylko w odbiorniku poprzez odjęcie estymaty sygnału zakłócającego. Jakość obu metod kompensacji wpływu zakłóceń mierzona poziomem BLER w różnych konfiguracjach została zweryfikowana za pomocą symulacji na poziomie łącza. Wyniki symulacji pokazują ich skuteczność w eliminacji wpływu sygnałów zakłócających w kanale MIMO Y.

Autorka skonstruowała pakiet symulacyjny, który modeluje warstwę fizyczną systemu 5G New Radio i który był używany w eksperymentach symulacyjnych mających na celu oszacowanie jakości proponowanych rozwiązań. Z tego powodu rozdziały, w których przedstawione są raporty na temat przeprowadzonych badań są poprzedzone rozdziałem wprowadzającym podstawowe własności warstwy fizycznej systemu 5G, które są następnie wykorzystywane w badaniach. Warto dodać, że główne wyniki przedstawione w tej rozprawie zostały już częściowo zweryfikowane w procesie recenzyjnym z powodu ich wcześniejszego przedstawienia w czasopiśmie międzynarodowym oraz na międzynarodowej konferencji o dużym zasięgu.