

Radio Environment Maps, and Machine Learning
Techniques for Spectral and Energy Efficiency
Improvement of Wireless Communications, with
Emphasis on Massive MIMO Systems.

Doctoral Dissertation



Author: mgr inż. Marcin Hoffmann

Supervisor: dr hab. inż. Paweł Kryszkiewicz, Prof. PUT

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

September 25, 2025

Abstract

The evolution of mobile networks towards 5G and 6G introduces unprecedented challenges in simultaneously meeting diverse Quality of Service (QoS) requirements across enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC), and massive Machine-Type Communications (mMTC). Central to this complexity are Massive Multiple-Input Multiple-Output (MMIMO) systems and their extensions, such as User-Centric Cell-Free (UCCF) MMIMO, which provide substantial spectral efficiency (SE) gains but demand significant hardware and computational resources, increasing the energy consumption. In this context, improving both SE and Energy Efficiency (EE) emerges as a critical research challenge.

This dissertation proposes the utilization of Radio Environment Maps (REMs) and Machine Learning (ML) techniques to enhance SE and EE in 5G and 6G networks. REMs, originally conceived for dynamic spectrum management within Cognitive Radio, are extended by the PhD candidate to store multidimensional location-dependent data, such as interference distributions, mobility patterns, or QoS metrics. The PhD candidate makes REM actionable through ML, including Reinforcement Learning (RL) and Federated Learning (FL), and demonstrates data-driven optimization strategies for wireless networks, overcoming the limitations of purely analytical approaches.

The research hypothesis of the dissertation is formulated as follows: **The usage of information stored in Radio Environment Maps can improve spectral and energy efficiency of wireless networks, especially those using massive MIMO, by utilizing machine learning.**

The PhD candidate confirmed the research hypothesis by demonstrating in the dissertation his contributions based on 16 peer-reviewed publications in the top journals and presented at renowned conferences. The contributions span three representative use cases. For V2X communications (URLLC), the PhD candidate proposed novel models of localization error, interference-aware frequency assignment, and beam management algorithms. In the MMIMO domain (eMBB), the PhD candidate designed REM-enhanced ML solutions for intelligent cell and antenna activation, dynamic optimization of power amplifier operation point, interference coordination, and management of UCCF MMIMO network, achieving substantial SE and EE gains validated using the realistic simulator of MMIMO network based on 3D ray-tracing radio channel models. For IoT (mMTC), the PhD candidate's work addresses vulnerabilities to Denial-of-Service attacks through a Signaling Storm Detection algorithm, validated in both simulations and a real-world 5G testbed.

Streszczenie

Rozwój sieci 5G i 6G stawia nowe wyzwania związane z potrzebą jednoczesnego spełniania wymagań różnych klas ruchu tzn. usług szerokopasmowych (ang. enhanced Mobile Broadband), dostępu ultra-niezawodnego o niskim opóźnieniu (ang. Ultra-Reliable Low Latency Communications), oraz masowej komunikacji między maszynami (ang. massive Machine-Type Communications). Dodatkowo, kluczowym elementem sieci 5G i 6G jest zastosowanie systemów wieloantenowych MMIMO (ang. Massive Multiple-Input Multiple-Output), które zapewniają poprawę efektywności widmowej, kosztem zużycia znacznych zasobów sprzętowych oraz energetycznych. W tym kontekście, zwiększenie zarówno efektywności widmowej, jak i energetycznej staje się kluczowym wyzwaniem badawczym dla nowoczesnych sieci mobilnych.

Niniejsza rozprawa doktorska proponuje wykorzystanie Map Środowiska Radiowego REM (ang. Radio Environment Maps) oraz uczenia maszynowego ML (ang. Machine Learning) do zwiększenia efektywności widmowej i energetycznej w sieciach 5G i 6G. REM'y, które pierwotnie wykorzystywano do dynamicznego zarządzania widmem, zostały rozszerzone przez doktoranta tak, aby przechowywały wielowymiarowe dane geolokalizacyjne, np. rozkłady interferencji. Dane zgromadzone w REM mogą być efektywnie wykorzystane dzięki technikom ML, w tym tzw. uczeniu ze wzmocnieniem oraz uczeniu federacyjnemu do optymalizacji sieci 5G/6G. Pozwala to przewyżżyć ograniczenia metod analitycznych.

Hipoteza badawcza rozprawy brzmi: **Wykorzystanie informacji przechowywanych w REM'ach oraz metod ML, może poprawić efektywność widmową i energetyczną sieci bezprzewodowych, zwłaszcza tych wykorzystujących technikę MMIMO.**

Doktorant potwierdził hipotezę badawczą, prezentując w rozprawie swoje osiągnięcia oparte na cyklu 16 publikacji w najbardziej uznanych międzynarodowych czasopismach naukowych i materiałach konferencyjnych. W zakresie komunikacji między pojazdami doktorant zaproponował nowe modele błędu lokalizacji, algorytmy przypisywania częstotliwości dla konwoju pojazdów, oraz zarządzanie wiązkami. W domenie MMIMO doktorant opracował rozwiązania wykorzystujące REM i ML do inteligentnej aktywacji komórek i anten, optymalizacji punktu pracy wzmacniacza mocy, koordynacji interferencji oraz zarządzania siecią MMIMO zorientowaną na użytkownika, uzyskując poprawę efektywności widmowej i energetycznej, potwierdzoną za pomocą symulatora sieci MMIMO opartego na modelu kanału radiowego z śledzeniem promieni. W przypadku sieci IoT (ang. Internet of Things) doktorant zaproponował metodę wykrywania i przeciwdziałania atakom typu Denial-of-Service. Zaproponowane rozwiązanie zostało zweryfikowane poprzez symulacje, jak i w laboratoryjnej sieci 5G.