

**Wykorzystanie informacji kontekstowej do poprawy efektywności widmowej
w przyszłych systemach radiokomunikacyjnych**

**Utilization of context information for spectral-efficiency enhancement
in future radio communication systems**

mgr inż. Łukasz Kułacz

Promotor: *dr hab. inż. Adrian Kliks, prof. uczelni*

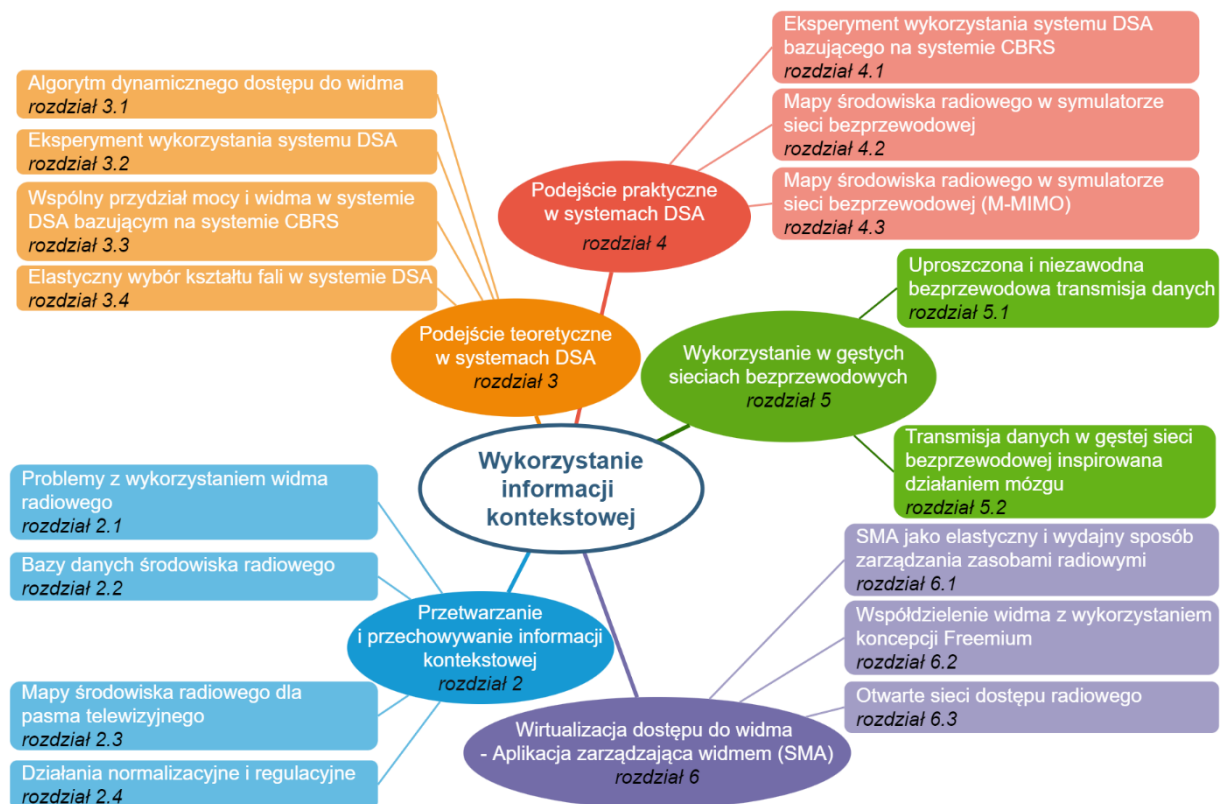
Streszczenie rozprawy doktorskiej

Współcześnie telekomunikacja bezprzewodowa to już nie tylko środek komunikacji między ludźmi, ale bardziej - a może nawet przede wszystkim - wygodny sposób na dostarczanie treści i multimediów niezależnie od tego, gdzie się znajdujemy. Oferowane usługi charakteryzują się różnymi wymaganiami, przeważnie odnoszącymi się do oczekiwanych wartości przepływności. Coraz większa liczba urządzeń końcowych, wyposażonych w wyświetlacze o dużych rozmiarach i o dużej rozdzielczości skutkuje ogromnym wzrostem zapotrzebowania na ilość przesyłanych danych. Pewnym rozwiązaniem tego problemu jest przydzielanie i wykorzystywanie większej szerokości pasma do transmisji. Jednak statyczne przydzielanie zasobów radiowych różnym usługom powoduje, że swobodne ich wykorzystanie jest niemożliwe, głównie ze względu na umowy, regulacje i ograniczenia licencyjne. Wykorzystanie kolejnych (dotychczas nieużywanych) zakresów częstotliwości z kolei wiąże się z bardziej skomplikowanym środowiskiem propagacyjnym i często z koniecznością projektowania i produkcji nowych urządzeń radiowych. W konsekwencji taki podział zasobów radiowych nie jest efektywny, a w wielu sytuacjach wiąże się z niewystarczającą alokacją zasobów dla jednej usługi i nadmiarem zasobów dla innej. Można jednak przyrzeć się obecnie zarezerwowanym już fragmentom pasma radiowego i ich wykorzystaniu; w wielu przypadkach zauważyć można obszary geograficzne i określone przedziały czasowe, w których niektóre fragmenty pasma nie są wykorzystywane. W świetle ogromnego zapotrzebowania na widmo radiowe podejście to wymaga przemyślenia. Ponieważ popyt na usługi bezprzewodowe w większości przypadków jest dynamiczny i zależy od różnych czynników (takich jak pora dnia, dzień tygodnia, pora roku, ale także lokalizacja), podział zasobów radiowych powinien być również dynamiczny.

Efektywność widmowa to miara, która ocenia wydajność wykorzystania zasobów radiowych. Można ją definiować jako liczbę transmitowanych bitów w jednostce czasu przy danej szerokości pasma. Dlatego celem samym w sobie jest maksymalizacja tej wartości, to jest przesyłanie jak największej liczby bitów przy zachowaniu tej samej szerokości pasma. Wartość tę można poprawić na wiele sposobów, np. poprzez opracowanie zaawansowanych metod alokacji zasobów radiowych, sterowanie mocą nadawczą urządzeń, wykorzystanie systemów wieloantennowych itp. Miara ta jest korzystna dla oceny działania systemu dynamicznego dostępu do widma, którego podstawowym założeniem jest jej poprawa względem metody statycznego przydziału widma. Jednak najlepsze wyniki często wymagają dostępu do wielu dodatkowych informacji (tzw. informacji kontekstowych), takich jak pozycja użytkowników, historyczne statystyki obecności użytkowników, jakości ich usług itp. Przy stale rosnącym zapotrzebowaniu na usługi bezprzewodowe poprawa efektywności widmowej jest konieczna i nieunikniona. W konsekwencji informacje kontekstowe stają się bardzo ważnymi lub wręcz kluczowymi danymi potrzebnymi do osiągnięcia tego celu. Ten fakt z kolei stwarza potrzebę opracowania algorytmów i systemów, które gromadzą, przechowują, przetwarzają, aktualizują i, co najważniejsze, wykorzystują informacje kontekstowe. Jednocześnie kluczowym aspektem jest określenie, jakich dokładnie informacji kontekstowych wymaga dany algorytm lub system do działania.

Ponadto w większości przypadków sam rodzaj informacji kontekstowych nie jest wystarczający, należy bowiem określić również format rejestrowanych informacji, ich dokładność, częstotliwość aktualizacji itp. W świetle tych faktów konieczne jest przyjrzenie się samej informacji kontekstowej, jej reprezentacji oraz sposobowi zarządzania nią. W tym miejscu warto przyrzeć się np. bazom środowiska radiowego, które z powodzeniem można wykorzystać w procesie alokacji zasobów radiowych. Tego typu bazy danych nie tylko przechowują informacje kontekstowe, ale także umożliwiają wnioskowanie na ich podstawie. Nie sposób nie wspomnieć również o istotnym obecnie trendzie, w którym dostęp radiowy jest zwirtualizowany. Koncepcja wirtualizacji, poprzez wyodrębnienie samego algorytmu zarządzania widmem, umożliwia implementację tego algorytmu w postaci aplikacji. Podejście to skutkuje brakiem konieczności przeprojektowywania całego systemu w celu zmiany sposobu dostępu do widma.

Po połączeniu wszystkich przedstawionych powyżej aspektów zastosowanie dynamicznego podziału widma z wykorzystaniem informacji kontekstowych wydaje się obiecującym rozwiązaniem problemu niewystarczających zasobów radiowych i często nieefektywnego ich wykorzystania. Skłania to do postawienia następującej tezy badawczej: „Z pomocą informacji kontekstowej możliwe jest zaprojektowanie algorytmu zarządzania widmem, w wyniku którego zwiększa się efektywność widmowa systemu”. W rozprawie zostanie przedstawione obszernie uzasadnienie postawionej tezy poprzez analizę teoretyczną i weryfikację eksperymentalną samego systemu dostępu do widma. Strukturalny podział rozprawy pokazano na Rysunku 1. Główny temat pracy jest koncepcyjnie podzielony na pięć części, w których każdej części poświęcony został osobny rozdział. Każdy z nich natomiast zawiera kilka podrozdziałów, w których opisane zostały przeprowadzone badania lub eksperymenty.



Rysunek 1 Schemat struktury rozprawy doktorskiej.

Samo zagadnienie informacji kontekstowej to dość obszerny temat i dlatego, aby wprowadzić czytelnika, rozdział drugi poświęcony jest przede wszystkim opisowi informacji kontekstowych i aspektów z nimi związanych, w tym przykładu pozyskiwania, przechowywania i wykorzystywania takich informacji. W szczególności zaprezentowano tam pojęcia map środowiska radiowego oraz map usług radiowych, które posłużyły za podstawę działania systemu dynamicznego dostępu do widma rozważanego na początku rozdziału trzeciego. W tym przypadku mapy środowiska radiowego mogą być budowane na podstawie informacji o mocy odbieranej w paśmie telewizyjnym na analizowanym obszarze. Wykorzystanie zestawu pomiarowego umożliwiło wypełnienie omawianej mapy danymi rzeczywistymi. Następnie za pomocą interpolacji możliwe było uzupełnienie brakujących miejsc na mapie (tj. punktów bez powiązanych z nimi pomiarami) w analizowanym obszarze, tworząc kompletną mapę mocy odbieranego sygnału. Procedura ta pozwala zaproponować, zaprojektować i przetestować system dynamicznego dostępu do widma, który umożliwia wykorzystanie danego pasma do innych celów, tj. do nadawania danych nielicencjonowanych użytkowników, przy zachowaniu oryginalnej, trwającej już transmisji. To z kolei jest praktycznym przykładem wykorzystania informacji kontekstowych do poprawy efektywności widmowej na określonym obszarze.

Rozdział trzeci jest poświęcony teoretycznym rozważaniom na temat wykorzystania różnych rodzajów informacji kontekstowych do projektowania lub ulepszania działania dynamicznego systemu przydziału widma. Słowo „teoretyczny” zostało tutaj użyte w celu wskazania badań (symulacji i eksperymentów), które nie narzucają ograniczeń wynikających z wykorzystania określonej technologii transmisji, standardu sieci itp. Najgorszym przypadkiem dla efektywności widmowej jest sytuacja, gdy nikt nie używa wybranego fragmentu pasma, a jednocześnie ktoś inny chce uzyskać dostęp do widma. W tym przypadku często rozważa się metody współdzielenia widma oparte na wykrywaniu transmisji użytkowników pierwotnych. Detekcja ta pozwala zachować dotychczasowe (pierwotne) przeznaczenie danego fragmentu pasma, ale w przypadku chwilowego braku pierwotnych użytkowników – umożliwia wykorzystanie tego samego pasma do innych celów. Takie rozwiązanie prezentuje m.in. rozdział trzeci, gdzie eksperyment z wykorzystaniem bazy danych środowiska radiowego z informacjami o mocy odbieranej w paśmie telewizyjnym pozwala użytkownikom nielicencjonowanym na transmisję przy jednoczesnej ochronie licencjonowanych użytkowników. Dzięki temu możliwe było prowadzenie transmisji wideo pomiędzy nielicencjonowanymi użytkownikami korzystającymi z pasma telewizyjnego w warunkach laboratoryjnych z zachowaniem możliwości odbioru telewizji naziemnej w tym samym miejscu. Warto w tym miejscu podkreślić, że jest to możliwe w wielu miejscach (zwłaszcza wewnątrz budynków) ze względu na często niskie wykorzystanie pasma telewizyjnego oraz często niski poziom sygnału odbieranego wewnątrz budynków (gdzie do prawidłowego odbioru telewizji niezbędna jest antena zewnętrzna). Kolejnym problemem jest rozdzielenie widma pomiędzy różnych użytkowników w taki sposób, aby odpowiadało to ich potrzebom przy jednoczesnej maksymalizacji efektywności widmowej. Przy założeniu dodatkowej możliwości sterowania mocą nadawczą użytkowników problem ten staje się bardzo złożony. W rozdziale trzecim opisana została próba rozwiązania tego problemu, w której proponuje się dwustopniowe suboptymalne algorytmy do jednoczesnej alokacji zasobów i sterowania mocą. Dzięki wykorzystaniu informacji kontekstowych możliwe było zmaksymalizowanie średniej przepływności użytkowników na km^2 , co zwiększa efektywność widmową na jednostkę powierzchni. Ponadto w tym rozdziale opisano algorytm, który optymalizuje wydajność widmową poprzez odpowiedni dobór kształtu fali dla użytkowników. Wybranie kształtu fali o mniejszym upływie mocy do sąsiednich kanałów pozwala na inny (często korzystniejszy) sposób przydzielania kanałów między użytkownikami. Algorytm wyboru kształtu fali użytkowników nielicencjonowanych poprawia wydajność widmową systemu poprzez zwiększoną elastyczność w przydzielaniu widma użytkownikom, co z kolei przekłada się na większą liczbę użytkowników korzystających z ta sama część widma.

W tym rozdziale pokazano poprzez symulacje komputerowe i prosty eksperyment z wykorzystaniem rzeczywistego sprzętu, że bez wątplenia można poprawić efektywność widmową, zakładając obecność bazy informacji kontekstowych i stosując odpowiedni algorytm, który te informacje kontekstowe uwzględnia podczas pracy w systemie.

Rozdział czwarty przedstawia praktyczne podejście do wykorzystania informacji kontekstowych w dynamicznym systemie dostępu do widma. Wspomniany aspekt „praktyczny” dotyczy przede wszystkim dodatkowych ograniczeń narzucanych przez już działającą sieć, gdzie nie możemy jej modyfikować, a dodatkowo musimy uwzględnić ograniczenia wprowadzane przez zastosowany standard, protokół lub system transmisji. W porównaniu z rozdziałem trzecim, opisane tutaj eksperymenty są tutaj bliższe rzeczywistej implementacji w już funkcjonujących sieciach. Pierwszym opisanym eksperymentem są testy terenowe proponowanego dynamicznego systemu dostępu do widma, który umożliwia nowym nielicencjonowanym użytkownikom dostęp do zasobów radiowych przy jednoczesnej ochronie użytkowników głównych. Zaprojektowano kolejny system dostępu do widma, który tym razem w testach polowych w rzeczywistej sieci potwierdził możliwość korzystania z widma przez nielicencjonowanych użytkowników bez zauważalnego spadku jakości licencjonowanej transmisji. Ten eksperyment, przeprowadzony przy użyciu rzeczywistego sprzętu i komercyjnej radiowej sieci dostępu do Internetu, był kolejnym potwierdzeniem słuszności postawionej w pracy tezy. W tym przypadku głównymi użytkownikami są punkty dostępu do sieci radiowej zaimplementowanej w technologii WiMAX w kilku wsiach. Drugim opisywanym eksperymentem jest symulacja komputerowa działającej w budynku sieci LTE, której zasoby są udostępniane użytkownikom spoza budynku. Głównym ograniczeniem jest używany system transmisji LTE. Zaproponowano algorytm półtrwałego planowania, który korzystając z informacji kontekstowej o historii alokacji zasobów dla użytkowników, pozwala zaalokować zasoby niektórym użytkownikom na dłuższy czas (niż domyślnie). Powoduje to zmniejszenie ilości danych sterujących przesyłanych przez sieć poprzez zmniejszenie liczby decyzji planisty. Trzecim opisanym eksperymentem jest ponownie symulacja sieci bezprzewodowej; jednak w tym przypadku brane jest pod uwagę gęste środowisko radiowe i system wieloantenny z bardzo dokładnym modelem kanału opartym na metodzie śledzenia promieni. Sposób przypisywania użytkowników do komórek jest modyfikowany na podstawie historycznych decyzji. Głównym ograniczeniem tego podejścia jest wykorzystanie sieci LTE-A, co znacznie ogranicza swobodę przypisywania użytkowników do komórek, poprzez konieczność sterowania odpowiednimi parametrami dostępnymi już w sieci. W tym przypadku wykorzystanie informacji kontekstowych poprawia przepływność wszystkich użytkowników sieci, przy niewielkim koszcie jakim jest większa liczba przełączeń między użytkowników między komórkami.

W zakresie efektywności widmowej w sieciach radiowych nie sposób nie wspomnieć o obserwowanym od pewnego czasu trendzie (szczególnie w kontekście sieci 5G), który zakłada zwiększenie gęstości węzłów sieci i zmniejszenie rozmiaru komórek (zwiększenie ich liczby). Rozdział piąty przedstawia rozważania dotyczące wykorzystania informacji kontekstowych w bardzo gęstych sieciach radiowych. Główną inspiracją do opisywanych prac jest obserwacja układu nerwowego człowieka (zwłaszcza mózgu), gdzie wykorzystywana jest bardzo prosta metoda transmisji, gdzie gęstość połączeń nerwowych jest ogromna. Oczywiście połączenia neuronowe są znacznie bardziej podobne do przewodowego systemu transmisji, ale wiele obserwacji z układu nerwowego można nadal wykorzystywać w bezprzewodowych systemach transmisji. W szczególności wyróżniono dwa dodatkowe typy komórek w ludzkim układzie nerwowym, tj. astrocyty i mikroglej. Astrocyt działa jako rodzaj łącznika między dwoma niezależnymi układami (układem krążenia i układem nerwowym) i możliwość wpływu jednego układu na drugi drugiego. Z drugiej strony mikroglej jest niezbędną komórką układu odpornościowego, która początkowo jest w stanie spoczynku.

Jednak w przypadku wykrycia anomalii układu nerwowego, zamienia się ona w aktywną formę i podejmuje próbę „naprawy” tej anomalii. Inspiracja płynąca z opisanych komórek pozwala przede wszystkim na poprawę niezawodności sieci bezprzewodowej. W przypadku tej tezy informacja kontekstowa jest dwójaka. Węzeł inspirowany mikroglejem wykrywa problemy z transmisją (np. utratę transmisji sąsiedniego węzła). Natomiast w przypadku węzła inspirowanego astrocytami informacje zewnętrzne (spoza sieci) mogą pochodzić np. z czujników i mieć wpływ na działanie sieci. Efektywność widmowa jest w tym przypadku ściśle związana z niezawodnością transmisji. Warto zauważyć, że widmo jest efektywnie wykorzystywane, gdy za jego pomocą przesyłanych jest dużo informacji. Jednak dane przekazane przez sieć muszą być prawidłowe.

Kolejnym istotnym trendem w telekomunikacji jest obecnie (obserwowana od pewnego czasu) wirtualizacja dostępu radiowego, gdzie poszczególne funkcje sieci pełni oprogramowanie. W ostatnim, ale równie ważnym szóstym rozdziale, opisano kilka podejść do zarządzania widmem, lecz reprezentowanych w formie aplikacji do zarządzania widmem. Najpierw opisana jest aplikacja zarządzająca widmem używana w połączeniu z platformą Open Air Interface, która na podstawie wybranego zestawu reguł i zasad dobiera optymalny (według kryteriów określonych przez operatora) zestaw parametrów transmisji dla każdego użytkownika, a w szczególności zakres częstotliwości. Opisano autorski algorytm podejmowania decyzji wraz z implementacją na rzeczywistych urządzeniach (telefony komórkowe). W tym przypadku nie bierzemy pod uwagę bezpośrednio informacji kontekstowych - zaznaczmy jednak, że wybrany zestaw zasad ma zasadniczy wpływ na działanie analizowanego systemu, tj. jego wydajność widmową. Z kolei nawet w najprostszym scenariuszu zestawy zasad wybierane są na podstawie pewnych informacji kontekstowych. W najbardziej zautomatyzowanej formie na podstawie zebranych danych kontekstowych, algorytmy uczenia maszynowego dobierają odpowiednie zestawy reguł. Jest to przykład pośredniego wykorzystania informacji kontekstowych na wyższym poziomie zarządzania widmem. Następnie, w rozdziale szóstym, przedstawiono nowe podejście do współdzielenia widma, w którym niektóre pasma widma są dostępne bezpłatnie dla wszystkich użytkowników, a reszta widma jest dostępna za opłatą. Takie podejście zostało opisane z perspektywy użytkownika i właściciela takiej sieci („właściciela” widma). Podobnie jak w przypadku opisanej wcześniej sytuacji, nie bierzemy pod uwagę bezpośrednio informacji kontekstowych, ale zbiory reguł. To z kolei implikuje zmianę efektywności widmowej analizowanego systemu. Ostatnią pracą opisaną w tym rozdziale jest zastosowanie informacji kontekstowych w otwartej sieci dostępu radiowego. Jest to doskonały przykład, w którym cały system jest zwirtualizowany i możliwe jest dołączenie do takiego systemu aplikacji (tzw. xApp), które implementują określone funkcjonalności. Opisany został przykład aplikacji, która steruje ruchem użytkowników poprzez zmianę ich przypisania do komórek, zmianę przydziału zasobów radiowych i jednocześnie wybieranie pasma wykorzystywanego przez poszczególne komórki. Przedstawione w tym rozdziale koncepcje pokazują, że zmieniając sposób przypisywania pasm do stacji bazowych, przypisywania użytkowników do komórek, czy przydzielania użytkownikom zasobów radiowych, można poprawić wydajność widmową całego systemu. Warto jednak zauważyć, że musi to być to aktualny cel zdefiniowany przez zbiór zasad.

W tej rozprawie zostało pokazane z wielu perspektyw i na wiele sposobów, że istotnie możliwa jest poprawa efektywności widmowej w sieci bezprzewodowej poprzez wykorzystanie informacji kontekstowych, co potwierdza tezę postawioną w tej pracy.