

Adrian Kliks, Paweł Kryszkiewicz
Katedra Radiokomunikacji, Politechnika Poznańska
Pl. M. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań
{adrian.kliks | pawel.kryszkiewicz} @put.poznan.pl
Karol Kowalik, Michał Kołodziejcki
INEA, Wierzbowa 84, 62-081 Wysogotowo
{ karol.kowalik | michal.kolodziejcki }@inea.com.pl



Poznań, 21-23 czerwca 2017

ANALIZA MOŻLIWOŚCI WSPÓLDZIELENIA CZĘSTOTLIWOŚCI W PASMIE F – STUDIUM PRZYPADKU

ANALYSIS OF SPECTRUM SHARING OPPORTUNITIES IN F-BAND – CASE STUDY

Streszczenie: W artykule skupiono się na analizie możliwości efektywnego i dynamicznego wykorzystania zasobów częstotliwościowych w pasmie F (3 – 4 GHz) przypisanych do operatora w celu równoczesnego świadczenia dwóch różnych usług. W szczególności rozważono współistnienie radiolinii dla klientów biznesowych oraz dostarczanie szerokopasmowego Internetu dla odbiorców indywidualnych. Przedstawiono analizę teoretyczną rozważanej propozycji dynamicznego przydziału zasobów, a także zaprezentowano wyniki wstępnych testów laboratoryjnych.

Abstract: This paper focuses on the analysis of opportunities of effective and dynamic spectrum sharing in F-band (3 – 4 GHz) assigned to one operator, with the purpose of the simultaneous delivery of various services. In particular, the coexistence of microwave links (for business clients) and broadband internet services (for individuals) has been considered. The theoretic analysis of this use-case is followed by the results of the initial laboratory experiments.

Słowa kluczowe: dynamiczny przydział zasobów radiowych, radiolinie, WiMAX

Keywords: dynamic radio resource allocation, radiolines, WiMAX

1. WSTĘP

Zagadnienie efektywnego wykorzystania zasobów częstotliwościowych stanowi jeden z fundamentów rozwoju szeroko rozumianej telekomunikacji bezprzewodowej. Nieustannie zwiększające się wymagania klientów względem jakości dostarczanych przez operatorów usług istotnie stymulują proces powstawania nowych rozwiązań, pozwalających na lepsze użycie dostępnych pasm częstotliwościowych [5]. Jednym z możliwych rozwiązań pozwalających na zwiększenie efektywności wykorzystania pasma radiowego jest wprowadzenie zaawansowanych algorytmów z zakresu przetwarzania sygnałów. Jednak obecnie problem nieefektywnego wykorzystania zasobów częstotliwościowych w kontekście wprowadzania przyszłych systemów bezprzewodowych (tzw. piątej generacji i późniejszych) jest często łączony z technologią radia kognitywnego [1]. Zakłada się w niej, że fragmenty pasma częstotliwościowego oryginalnie przypisane do konkretnego typu usługi, a jednak wolne w danym czasie i w danej lokalizacji, mogą być dynamicznie wykorzystane w celu równoczesnego

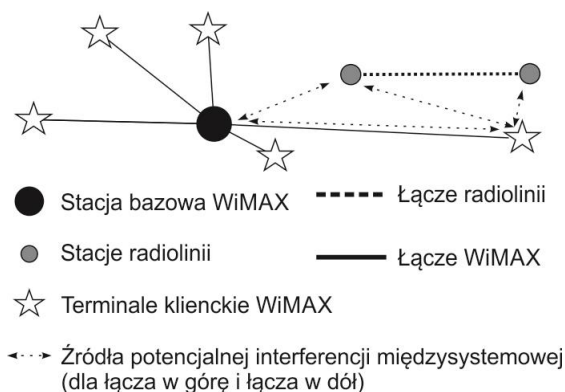
go świadczenia usług innym użytkownikom (tzw. nielicencjonowanym). Jest to możliwe tylko w sytuacji, gdy nowe usługi nie będą powodowały pogorszenia jakości usług oferowanych tzw. użytkownikom pierwotnym lub inaczej licencjonowanym. Takie jednak założenie pociąga za sobą konieczność dokładnej analizy środowiska radiowego i natychmiastowego reagowania na zachodzące w nim zmiany. W literaturze można odnaleźć wiele rozważań i analiz prowadzonych w odniesieniu do poszczególnych elementów systemów bezprzewodowych opartych na koncepcji radia kognitywnego. Dotyczą one m.in. poszczególnych faz cyklu kognitywnego [3], np. uczenia się systemu. Z dotychczasowych wyników można wysnuć wniosek, że technologia ta wymaga jeszcze wielu gruntownych badań zarówno teoretycznych jak i (może w szczególności) eksperymentalnych.

Jednym z przypadków zastosowania radia kognitywnego jest sytuacja, kiedy pasmo jednego operatora jest wykorzystywane w dynamiczny sposób przez innego operatora. Warto wspomnieć tu o zaproponowanych już rozwiązaniach regulacyjnych, np. współdzieleniu pasma na zasadzie licencji (LSA, ang. *Licensed Shared Access*) [4]. Również z punktu widzenia jednego operatora dynamiczne wykorzystanie posiadanych zasobów widmowych oferuje szeroki wachlarz nowych możliwości. W niniejszym artykule rozważono przypadek, w którym pasmo licencyjnie wykorzystywane przed operatorem do świadczenia usług szerokopasmowego dostępu do Internetu klientom indywidualnym mogłoby być użyte do transmisji danych dla klientów biznesowych z wykorzystaniem radiolinii. W odróżnieniu od statycznego przypisania fragmentów pasma do dwóch różnych usług w rozważanej sytuacji podział pasma pomiędzy systemy byłby realizowany dynamicznie zgodnie z dobową i tygodniową charakterystyką ruchu poszczególnych użytkowników.

W dalszej części pracy przedstawiono dokładnie rozważany przypadek testowy, dla którego przeprowadzono analizę teoretyczną możliwości współdzielenia pasma (rozdział 2) pomiędzy rozważanymi systemami. Dyskusję teoretyczną poparto analizą wyników eksperymentu opisanego w rozdziale 3. Uzyskane rezultaty, opisane w części czwartej pracy, posłużyły do przedstawienia wniosków zawartych na końcu artykułu.

2. WSPÓLDZIELENIE ZASOBÓW W PASMIE 3600 – 3800 MHz

W rozpatrywanym przypadku (Rysunek 1) rozważamy dynamiczne wykorzystanie dostępnych zasobów częstotliwościowych w zakresie od 3600 do 3800 MHz. Obecnie w pasmie F świadczone są usługi dostarczania szerokopasmowego Internetu z wykorzystaniem technologii WiMAX (w standardzie IEEE 802.16e). Ze względu na wypieranie tej technologii przez nowsze rozwiązania (zwłaszcza system LTE/LTE-A) oraz zaprzestanie prac nad standardami IEEE 802.16 dalsze inwestowanie w systemy WiMAX wydaje się nieuzasadnione technicznie ani biznesowo. Lokalizacja odbiorników klientów końcowych jest znana i niezmienna w konkretnej, ograniczonej czasowo, perspektywie. Znana jest także charakterystyka ruchu obsługiwanego przez ten system. Posiadając te informacje można rozważyć uruchomienie nowego systemu bezprzewodowego, pracującego w zakresie pasm oryginalnie przeznaczonych dla systemu WiMAX. W szczególności rozważany jest system typu punkt-punkt oparty na radioliniach, który obsługiwałby klientów biznesowych (zgłaszających znacznie większe wymagania co do parametrów obsługi niż klienci indywidualni). Sytuację tę należałoby traktować jako dynamiczne współdzielenie pasma pomiędzy systemy o tym samym poziomie ważności (ang. *co-primary sharing*).



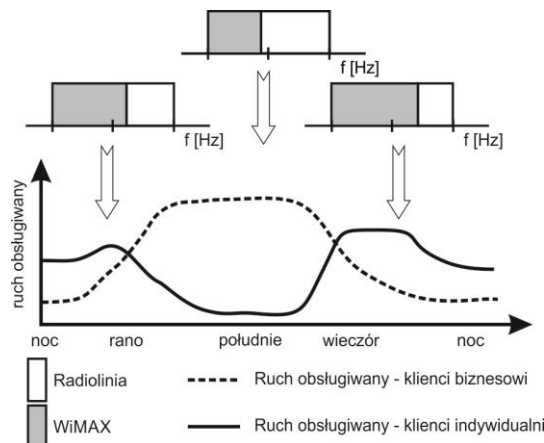
Rysunek 1. Przykładowy schemat współdzielących się systemów pracujących w pasmie F

Przypadek ten jest ciekawy z kilku powodów:

- w przypadku radiolinii możliwe jest wykorzystanie relatywnie wysokich mocy nadawczych EIRP, ponieważ stosuje się bardzo kierunkowe anteny; daje to możliwość transmisji danych na duże odległości, ale może skutkować także wysokim poziomem zakłóceń obserwowanych przez inne elementy współdzielących się systemów jeśli także one znajdują się w wiązce głównej transmisji;
- założono możliwość dynamicznego doboru parametrów transmisji (np. zmiany szerokości wykorzystywanego pasma częstotliwościowego, mocy nadawczej, częstotliwości nośnej) zarówno w przypadku systemu WiMAX, jak i radiolinii (Rysunek 2)
- pasmo należy do jednego operatora, jest więc to przypadek zastosowania uproszczonej wersji technologii radia kognitywnego w ramach zasobów

dostępnych dla jednego podmiotu (brak interferencji pochodzących od innych systemów).

Analiza Rysunku 2 pozwala stwierdzić, że w zależności od pory dnia (i odpowiadającego jej poziomu ruchu obsługiwanego i oferowanego) szerokość pasma przypisanego do poszczególnych systemów będzie stosownie zmieniana. Zmiana szerokości dostępnego pasma transmisyjnego odbywać się będzie tylko w zakresie dopuszczonym przez standard i producenta sprzętu.



Rysunek 2. Przykładowe przypisanie zasobów częstotliwościowych pomiędzy dwa współistniejące systemy na podstawie dostępnej informacji o ruchu

W przypadku współistnienia dwóch lub więcej systemów transmisyjnych w tym samym paśmie radiowym konieczne jest zbadanie ich wzajemnego oddziaływania na siebie. W tym celu ważne jest określenie i zbadanie poziomu zakłóceń obserwowanych przez oba systemy. Źródła tych zakłóceń są dwojakie i wynikają z: a) nieidealnej charakterystyki filtrów nadawczych i powiązanej z nią tzw. maski widmowej (określającej dopuszczalne maksymalne moce sygnału obserwowane w pasmie sąsiednich; jest to parametr określający stronę nadawczą), b) nieidealnej selektywności filtrów odbiorczych, przechwytyjących także niepożądane sygnały z pasm sąsiednich do nominalnego (cecha odbiornika). Pierwsze z źródeł zakłóceń wyrażane jest często miarą znaną jako ACLR (ang. *adjacent channel leakage ratio*), drugie zaś – miarą ACS (ang. *adjacent channel selectivity*). Łączny poziom zakłóceń określany jest często jako ACIR (ang. *adjacent channel interference ratio*):

$$ACIR = \frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}} \quad (1)$$

Często rozważanym parametrem jest tzw. współczynnik ochronny β (ang. *protection ratio*). Jest to połączenie wartości ACIR z minimalnym stosunkiem mocy sygnału użytecznego do mocy interferencji. Co istotne, jest to wartość bezpośrednio mierzalna w środowisku laboratoryjnym. Określa ona minimalną różnicę mocy (wyrażoną w dB) pomiędzy sygnałem pożądanym i sygnałem interferującym obserwowanym na wejściu odbiornika (przy założeniu poziomu szumu własnego odbiornika znacznie poniżej mocy interferencji). Zauważmy, że znajomość wartości β , a także wartości odbieranej mocy sygnału użytecznego P (tzn. minimalnej mocy zapewniającej

poprawny odbiór sygnału z założonym poziomem jakości – typowo dla najniższego indeksu modulacji i kodowania sygnału) oraz tłumienia ścieżki T (między nadajnikiem systemu interferującego, a odbiornikiem podlegającym interferencji), pozwala na wyliczenie maksymalnej mocy nadawczej systemu interferującego I_{\max} [2]:

$$I_{\max[\text{dBm}]} = P_{[\text{dBm}]} - \beta_{[\text{dB}]} + T_{[\text{dB}]} \quad (2)$$

3. WSTĘPNA ANALIZA WSPÓLDZIAŁANIA SYSTEMÓW

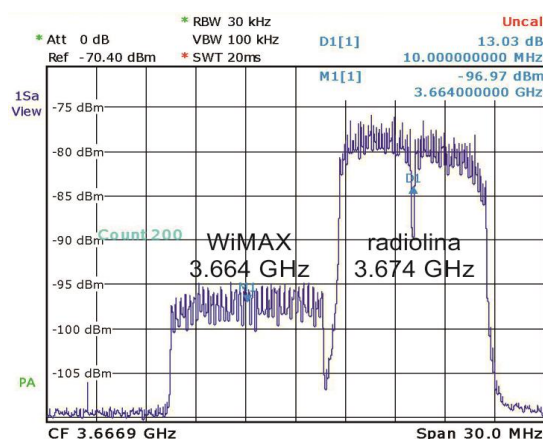
W rozważanym przypadku zbadane zostało współistnienie dwóch systemów opartych o modulację OFDM o szerokości pasma równej 10 MHz – systemu WiMAX IEEE 802.16e (system priorytetowy) oraz radiolinii. W obu przypadkach występował duplex czasowy, a podział zasobów na łącze w górę i w dół był równomierny. Pierwszy z badanych systemów pracował w trybie MIMO 2x2 i został zrealizowany za pomocą stacji bazowej i urządzenia końcowego CPE (ang. *customer-premises equipment*). Częstotliwość nośna wynosiła 3.664 GHz, a moc nadawcza stacji bazowej mogła być zmieniana w zakresie od około -40 do +27.5 dBm. W celu wyznaczenia współczynnika ochronnego β rozważono przypadek, w którym moc nadawana systemowi WiMAX wynosiła 25 dBm. Obserwowana wówczas w odbiorniku (łącze w dół) wartość RSSI wynosiła -40 dBm, co wynika z bliskości nadajnika i odbiornika w warunkach laboratoryjnych. W łączu w górę moc odbierana na stacji bazowej (AP, access point) wynosiła -70 dBm. Dla tych wartości obserwowana w CPE i w AP wartość stosunku sygnału do szumu wynosiła odpowiednio 28 i 31 dB (rzeczywiste wartości prawdopodobnie były wyższe, system raportuje wartości z maksimum ok. 30 dB), a stosowany tryb modulacji i kodowania to QAM-64 z kodowaniem o sprawności 5/6. Zastosowane anteny kierunkowe miały zysk równy 16 dBi. Podkreśliśmy jednak, że systemy pracują w strefie pośredniej i wewnątrz budynku, co wpływa na interpretację wyników. W przypadku systemu WiMAX rozważono przypadek przesyłania tylko danych sterujących.

Drugim systemem, współistniejącym z systemem WiMAX, była radiolinia pracująca na częstotliwości nośnej wynoszącej 3.674 GHz. Szerokość zajmowanego pasma częstotliwościowego wynosiła również 10 MHz, natomiast moc nadawana ustalona była na wartość -5 dBm. Radiolinia pracowała w trybie MIMO 2x2 z wykorzystaniem dywersyfikacji polaryzacyjnej i anten o zysku równym 19.5 dBi. Przy braku interferencji, szacowana przepustowość dla radiolinii wynosiła około 65 Mbps (uzyskana w trybie 2x64-QAM 5/6). Dla radiolinii rozważaliśmy przypadek najmniej korzystny z punktu widzenia systemu chronionego, gdy w trybie ciągłym przesyłane były dane (jeśli nie zaznaczono inaczej).



Rysunek 3. Zdjęcie przedstawiające układ pomiarowy

W pierwszej konfiguracji częstotliwości nośne obu systemów były od siebie oddalone o 10 MHz (brak nachodzenia widm częstotliwościowych). Obserwowany w tej sytuacji wykres widmowej gęstości mocy, przy założeniu wymuszenia pełnego ruchu w radiolinii, przedstawia Rysunek 4.



Rysunek 4. Widmowa gęstość mocy systemu WiMAX oraz radiolinii

Eksperymentalnie stwierdzono, że przy takim wyborze parametrów transmisji możliwe jest wykorzystanie pasma częstotliwościowego dotychczas przeznaczanego do sygnałów systemu WiMAX do nadawania sygnału z radiolinii. Zwróćmy uwagę, że dla dowolnie dużych mocy nadawanych (w zakresie dopuszczalnym dla posiadanych urządzeń), nie zaobserwowaliśmy istotnego spadku jakości w żadnym systemie bezprzewodowym, które wynikać mogłyby z niedoskonałości zastosowanych filtrów nadawczych i odbiorczych. W przypadku małych mocy nadawczych (-5 dBm dla WiMAX oraz 8 dBm dla radiolinii) obserwowany SNR dla systemu chronionego WiMAX był na poziomie około 30 dB. W przypadku wysokiej mocy nadawczej dla radiolinii (25 dBm) zaobserwowano pogorszenie SNR tylko dla łącza w górę o 8 dB. Zauważmy, że w tym przypadku wartość współczynnika ochronnego β może być mniejsza niż -15 dB.

4. WYNIKI EKSPERYMENTU WSPÓLDZIELENIA PASMA

Przypadek opisany w poprzednim rozdziale (brak nakładania się widm sygnałów) stanowi punkt wyjścia do określenia wartości współczynnika ochronnego w sytuacji, kiedy widma poszczególnych systemów na siebie nachodzą. W krytycznym przypadku założyliśmy,

że oba rozpatrywane systemy pracują na tej samej częstotliwości nośnej (3.664 GHz). W wyniku przeprowadzenia kolejnych testów udało się znaleźć wartości mocy nadawczych, dla których oba systemy miały ustanowione połączenie, jednak nie było możliwe jednoczesne przesyłanie danych użytkownika. Wzajemne zakłócenie (uniemożliwiające transmisję danych użytkownika) występowało w sytuacji, kiedy moc obserwowana na analizatorze widma w pasmie 10 MHz dla sygnału WiMAX wynosiła -56 dBm, radiolinia mogła pracować z mocą -54.2 dBm. Oznacza to, że system WiMAX musiał mieć moc co najwyżej o 1.8 dB niższą od mocy sygnału z radiolinii. Możliwe, że w tym przypadku transmisja kanałów sterujących była możliwa dzięki pracy systemów z podziałem w czasie. Przy zwiększeniu mocy nadawczej jednego z systemów, drugi system nie mógł ustanowić połączenia pomiędzy stacją bazową a urządzeniem końcowym. Podane wyżej wartości odpowiadały wartości mocy nadawczej równej -5 dBm (WiMAX) oraz 8 dBm (radiolinia).

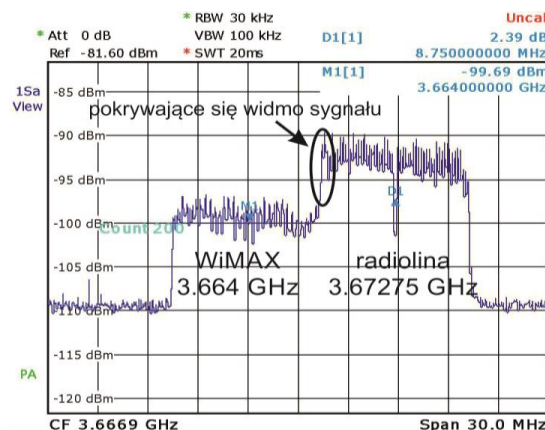
Ponieważ naszym celem było efektywne wykorzystanie widma przy założeniu bezbłędnej transmisji danych w oby systemach, dlatego w drugim przypadku testowym rozważyliśmy częściowe tylko nakładanie się widm sygnałów. Szerokość pokrywającego się pasma wynosiła 2.5 MHz (25% całej szerokości nominalnej rozpatrywanych sygnałów). W radiolinii nadawany był sygnał danych (co odpowiada wysokiemu wykorzystaniu dostępnych zasobów transmisyjnych). Dla mocy systemu WiMAX -5 dBm (najgorszy przypadek) i dla mocy z radiolinii 25 dBm, system WiMAX w ogóle nie mógł ustanowić połączenia. Po obniżeniu mocy w radiolinii do 8 dBm – uzyskane wartości obserwowanego SNR dla systemu WiMAX w łączu w dół wynosiły 2-3 dB, natomiast dla łącza w górę: 5-6 dB. Można więc stwierdzić, że dla takiej wartości nie jesteśmy w stanie praktycznie (dla dopuszczalnych sprzętowo wartości mocy) wyznaczyć sensownej wartości współczynnika ochronnego. Takie nakładanie się widm uniemożliwia współistnienie systemów z transmisją danych.

W ostatnim kroku rozważono sytuację, kiedy widma sygnałów nadawanych nachodzą na siebie w zakresie 1.25 MHz (co uwzględniając szerokości pasm ochronnych skutkuje relatywnie niewielką wartością wspólnego pasma częstotliwościowego - Rysunek 5). W tej sytuacji dla wartości mocy nadawczych wynoszących -5 dBm dla systemu WiMAX oraz 8 dBm dla radiolinii, obserwowana wartość SNR w systemie WiMAX dla łącza w dół wynosiła 25 dB, zaś dla łącza w górę 26 dB. Wartość współczynnika ochronnego β to -7 dB.

5. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych współdzielenia pasma częstotliwościowego w zakresie pasma F na przykładzie systemu WiMAX oraz radiolinii. Uzyskane rezultaty pozwalają wysnuć kilka wniosków, będących podstawą poprawnego ukie-
runkowania dalszych prac w zakresie współdzielenia widma. Po pierwsze, w krytycznej sytuacji, kiedy anteny odbiorcze obu systemów znajdują się fizycznie blisko siebie, poprawne działanie jest możliwe tylko dla bardzo

niewielkiego nachodzenia się widm (około 1 MHz). Sytuacja ta, niekorzystna z punktu widzenia poprawności koncepcji współdzielenia pasma, może ulec znaczącej poprawie w momencie, kiedy anteny odbiorcze będą od siebie istotnie oddalone (wykorzystana byłaby duża kierunkowość radiolinii i charakter transmisji punkt-punkt). Warto zauważyć, że wyniki uzyskane były w warunkach laboratoryjnych, jednak odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem były w oby przypadkach niewielkie. Uzyskane rezultaty są obiecujące, wymagają jednak potwierdzenia w testach polowych.



Rysunek 5 Widmowa gęstość mocy systemu WiMAX oraz radiolinii; nakładające się widma w zakresie 1.25 MHz

PODZIEKOWANIA

Praca naukowa finansowana ze środków EU w ramach projektu H2020 5G-PPP COHERENT (nr umowy: 671639).

LITERATURA

- [1] Bogucka Hanna, "Technologie radia kognitywne", *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa 2013, ISBN 9788301171995
- [2] Martínez-Pinzón Gerardo, Cardona Narcis, Garcia-Pardo Concepcion, Fornés-Leal Alejandro and Ribadeneira-Ramírez Jefferson Alexander, "Spectrum Sharing for LTE-A and DTT: Field Trials of an Indoor LTE-A Femtocell in DVB-T2 Service Area," *IEEE Transactions on Broadcasting*, 62 (3): 552-561, 2016, doi: 10.1109/TBC.2016.2582338
- [3] Mitola Joseph III. and Maguire Gerald, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, 6 (4), 13–18, 1999.
- [4] Matinmikko Marja i in., "Overview and comparison of recent spectrum sharing approaches in regulation and research: From opportunistic unlicensed access towards licensed shared access," *2014 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DYSPAN)*, McLean, VA, 2014, 92-102 doi: 10.1109/DySPAN.2014.6817783
- [5] Wesolowski Krzysztof, "Systemy radiokomunikacji ruchomej", *WKŁ*, 2006, ISBN 978-83-206-1883-9