

Zakład Kompatybilności Elektromagnetycznej (Z-21)

**Metody badawcze służące opracowaniu standardów i
wdrożeniu systemów radia kognitywnego**

Raport Z21/21300021/1477/11

WROCLAW, grudzień 2011

Metryka dokumentu

Nr pracy : Z21/21300021/1477/11

Nazwa pracy : Metody badawcze służące opracowaniu standardów i wdrożeniu systemów radia kognitywnego

Zleceniodawca : Praca Statutowa

Data rozpoczęcia : Styczeń 2011 r.

Data zakończenia : Grudzień 2011 r.

Słowa kluczowe : Cognitive Radio, EMC, White Space Spectrum,

Kierownik pracy : dr inż. Dariusz Więcek

Wykonawcy pracy : mgr inż. Bartłomiej Gołębiowski
dr inż. Maciej Grzybkowski
mgr inż. Marek Michalak
mgr inż. Daniel Niewiadomski
dr inż. Marian Oziwicz
dr inż. Janusz Sobolewski
prof. Ryszard Strużak
mgr inż. Monika Szafrąńska
dr inż. Dariusz Więcek
mgr inż. Paweł Winkel
mgr inż. Jacek Wroński
inż. Dariusz Wypiór

Praca wykonana w Pracowni Gospodarki i Inżynierii Widma
Zakładu Kompatybilności Elektromagnetycznej
Instytutu Łączności we Wrocławiu

Kierownik Pracowni Gospodarki i Inżynierii Widma: dr inż. Dariusz Więcek
Kierownik Zakładu Z21: dr inż. Janusz Sobolewski

Niniejsze opracowanie może być powielane i publikowane wyłącznie w całości
Powielanie i publikowanie fragmentów wymaga uzyskaniu zgody Instytutu Łączności

© Copyright by Instytut Łączności, Wrocław 2011

SPIS TREŚCI

1. Wstęp.....	6
2. Rozpoznanie widma radiowego w Polsce pod kątem implementacji radia kognitywnego.8	8
2.1 Sposoby wykorzystania widma radiowego przez systemy radia kognitywnego	10
2.2 Wybór zakresów częstotliwości dostępnych w Europie na potrzeby radia kognitywnego	15
2.3 Literatura do rozdziału 2.....	25
3. Metody estymacji widma częstotliwości dla zastosowań radia kognitywnego	26
Wprowadzenie.....	26
3.1 Czułość metod badania widma. Wymagania	29
3.1.1 Wymagane poziomy detekcji sygnałów licencjonowanych	29
3.1.1.1 Pasma DTV; sygnały TV	29
3.1.1.2 Pasma DTV, sygnały bezprzewodowych mikrofonów	29
3.1.2 Wymagania sprzętowe.....	30
3.1.3 Problemy.....	31
3.1.3.1 Ukryty użytkownik licencjonowany (hidden primary user).....	31
3.1.3.2 Czas trwania oraz częstość badania widma w wersji z pojedynczymi	31
odbiornikami	31
3.2 Koncepcja wspólnego rozpoznawania widma.....	32
3.3 Podstawy detekcji sygnału w obecności szumu	32
3.4 Miernik energii (radiometr)	36
3.4.1 Ograniczona liczba próbek	36
3.4.2 Statystyki Gaussa.....	39
3.5 Algorytmy rozpoznawania zajętości widma.....	40
3.5.1 Okno przesuwne (Sliding Window)	40
3.5.2 Rozkład spektralny macierzy autokorelacji sygnału	40
3.5.3 Korelacje czasowe cyklicznego prefiksu CP	41
3.5.4 Korelacja podnośnych pilotowych w sygnale DTV	43
3.5.5 Korelacja obwiedni częstotliwościowej sygnałów (SFD)	46
3.6 Porównanie jakości proponowanych metod sensingu	51
3.7 Propozycje metod sensingu w standardzie IEEE 802.22.....	60
3.7.1 Norma IEEE 802.22. Cognitive Radio Wireless Regional Area Networks Standard	60
(WRAN)	60
3.7.1.1 Standard IEEE 802.22.1	61
3.7.1.2 Specyfikacja IEEE 802.19	61
3.7.1.3 Project IEEE 802.15 Wireless Personal Area Networks (WPAN).....	62
3.7.1.4 Standard 802.11 Wireless Local Area Networks (WLAN)	62
3.7.2 Informacyjny przegląd algorytmów badania widma w normie IEEE 802.22	62

3.7.2.1	Algorytmy niezależne od typu sygnału.....	63
3.7.2.2	Algorytmy badania zajętości kanału w paśmie TV	63
3.7.2.3	Równoległe badanie zajętości kanałów w paśmie TV	64
3.8	Radio kognitywne w zakresie WLAN. Propozycja organizacji sensingu	65
3.8.1	Prototyp kognitywnego radia w wersji NTT	65
3.9	Wnioski	69
3.10	Terminologia oraz akronimy	71
3.11	Literatura do rozdziału 3.....	73
4.	Wyznaczenie dostępnych kanałów radiowych w paśmie telewizyjnym w Polsce...	75
	Wprowadzenie.....	75
4.1	Wyznaczenie dostępnych kanałów radiowych w Polsce	78
4.1.1	Ochrona rzeczywistych zasięgów DVB-T	78
4.1.2	Metoda wyznaczania białych przestrzeni widma	80
4.1.2.1	Metoda wyznaczania białych przestrzeni widma zapewniająca ochronę Planu GE06.....	80
4.1.2.2	Metoda wyznaczania białych przestrzeni widma zapewniająca ochronę rzeczywistej sieci stacji DVB-T.....	82
4.2	Wyniki analiz dostępności kanałów radiowych w Polsce	83
4.2.1	Wyniki analiz dostępności kanałów radiowych dla ochrony obszarów rezerwacji GE06	83
4.2.2	Wyniki analiz dostępności kanałów radiowych z uwzględnieniem rzeczywistych zasięgów sieci DVB-T	86
4.2.3	Wyniki analiz dostępności kanałów radiowych z uwzględnieniem rzeczywistych zasięgów sieci DVB-T zgodnie z Raportem ECC 159.	90
4.3	Podsumowanie	93
4.4	Literatura do rozdziału 4.....	94
5.	Instalacja modelowa i pomiary sieci wykorzystujące elementy radia kognitywnego	95
5.1	Instalacja modelowa dla radia kognitywnego	95
5.2	Platforma testowa oprogramowania dla instalacji modelowej radia kognitywnego	96
5.2.1	Analizator widma.....	102
5.2.2	Baza danych REAM	102
5.2.3	Synchronizacja terminali.....	112
5.3	Badania laboratoryjne instalacji modelowej systemu radia kognitywnego	114
5.4	Testy działania algorytmu kognitywności systemu - analiza przełączeń	122
5.5	Podsumowanie	125
6.	Podsumowanie pracy statutowej.....	126

1. Wstęp

Współczesna telekomunikacja coraz częściej wykorzystuje techniki radiowe aby zapewnić łączność, dostęp do Internetu czy przesyłanie informacji w sposób bezprzewodowy z dowolnego miejsca, w dowolnym czasie, w ruchu samochodowym, kolejowym czy pieszym jak również między stałymi punktami. Liczba abonentów telefonicznych sieci komórkowych w Polsce już wielokrotnie przekroczyła liczbę abonentów stacjonarnych i nadal rośnie, a bezprzewodowy dostęp do Internetu staje się równie ważny jak dostęp stacjonarny i jest obecnie przedmiotem gwałtownego rozwoju. To wszystko sprawia, że presja na rozwój systemów bezprzewodowych jest ogromna, a prognozowane ogromne potrzeby nie mogą być zaspokojone przy pomocy aktualnie istniejących rozwiązań. Potrzebne jest opracowywanie i stosowanie nowych technik transmisyjnych, które jeszcze efektywniej wykorzystają widmo radiowe, niezbędny jest również rozwój infrastruktury sieci stacji poprzez uzupełnienia zasięgów, jak również dodawania lokalnych stacji bazowych w postaci piko czy femto komórek. Potrzebne są także aktualnie opracowywane nowe techniki dostępu do pasma radiowego, tak aby wykorzystać jak najefektywniej cenne częstotliwości radiowe w przyszłych rozwiązaniach technicznych.

W roku 2000 (praca doktorska Mitola, UK) powstała koncepcja radia kognitywnego (Cognitive Radio – CR), które z zasady ma wykorzystywać elementy obserwacji otoczenia, nauki zmian i decyzji odnośnie sposobów transmisji bezprzewodowej na zasadzie inteligentnej. Choć sama koncepcja jest złożona i może dotyczyć różnych elementów (warstwy fizycznej, warstwy dostępowej czy wyższych warstw) w ostatnich latach rozwijana jest zasadniczo koncepcja kognitywnego dostępu do pasma radiowego jako tzw. dynamiczny dostęp do widma (Dynamic Spectrum Access) lub oportunistyczny dostęp do widma (Opportunistic Spectrum Access). Bazuje ona na obserwacji fizycznych zjawisk: za pomocą sensingu (detekcji fizycznej) widma lub wykorzystywaniu informacji wcześniej przygotowanych w inny sposób (bazy geolokalizacyjne, radiowy kanał pilota kognitywnego), które z definicji mają zawierać i dostarczać informacji na temat tego co dzieje się w widmie radiowym w poszczególnych miejscach, aby na tej podstawie podjąć decyzję o rozpoczęciu transmisji obejmującą np.: maksymalną dopuszczalną moc promieniowaną, maksymalną wysokość nadajnika czy rodzaj transmisji (np. szerokość kanału, modulacja, charakterystyka anteny). Zasadniczo koncepcja ta polega na wykorzystywaniu tzw. białych przestrzeni widma radiowego (White Space Spectrum) określających parametry w przestrzeni radiowej (położenie, wysokość anteny, moc, częstotliwość) pozwalające na wykorzystanie danej przestrzeni przez dodatkową transmisję

niezakłócającą innych (istniejących dotychczasowych) użytkowników widma radiowego. Najczęściej mamy tu do czynienia z oportunistycznym dostępem do widma – czyli emisją w tym samym lub zbliżonym zakresie częstotliwości, który wykorzystują inne istniejące systemy radiowe, a który może być dodatkowo wykorzystywany w sposób oportunistyczny (wykorzystujący istniejącą sposobność) dzięki zapewnieniu wymaganej stosownej kompatybilności elektromagnetycznej (ocenianej np. jako wymagana separacja geograficzna, częstotliwościowa czy przestrzenna). Techniki kognitywnego dostępu do widma są obecnie na świecie intensywnie badane i rozwijane i znajdują się obecnie w fazie przedwdrożeniowej. Pierwsze komercyjne standardy powstały w 2010-2011r. a ich wdrożenie może nastąpić w najbliższych latach, trwają również prace nad kolejnymi standardami, zwłaszcza takimi, które pozwolą na zastosowanie stosunkowo niedrogich rozwiązań technicznych, gdyż dotychczasowe rozwiązania ze względu na ich złożoność i kosztowność mogą mieć problem z powszechną akceptacją.

W niniejszej pracy podjęto działania zmierzające do przygotowania do wdrożenia w kraju przyszłych systemów radia kognitywnego. Dokonano przeglądu widma radiowego w Polsce (Rozdział 2) pod kątem możliwości aplikacji radia kognitywnego w poszczególnych zakresach częstotliwości, następnie dokonano przeglądu algorytmów sensingu widma radiowego (Rozdział 3) celem porównania rozwiązań i wskazania najbardziej korzystnych metod możliwych do praktycznego zastosowania, dokonano analizy pasm telewizyjnych w Polsce oceniającej wstępną dostępność widma radiowego pasma UHF w poszczególnych punktach kraju (Rozdział 4) możliwego do wykorzystania po wyłączeniu telewizji analogowej w Polsce planowanego na 2013 r. a także dokonano pierwszych eksperymentów w sieci kognitywnej pod kątem możliwości stworzenia w IŁ laboratorium (testbed) radia kognitywnego. Prowadzone prace są pionierskie w Polsce i w Europie stąd ich elementy wykorzystywane są do publikacji na forum międzynarodowym. W roku 2011 wybrane elementy zaprezentowano w ramach COST-TERRA IC0905 oraz jako polski dokument roboczy zgłoszony do grupy CEPT PT SE43. Stanowią również podstawę do nawiązywania kontaktów i współpracy z innymi ośrodkami naukowymi celem podejmowania przyszłych wspólnych badań (np. w ramach FP7) a także mogą stanowić wkład do grup standaryzacyjnych zajmujących się przygotowywaniem standardów radia kognitywnego (np. IEEE 1900.7), w których również uczestniczą przedstawiciele IŁ.

2. Rozpoznanie widma radiowego w Polsce pod kątem implementacji radia kognitywnego

Technika radia kognitywnego będzie w przyszłości niewątpliwie wdrażana w naszym kraju. Z pewnym wyprzedzeniem należy już teraz wskazać zakresy częstotliwości, gdzie może być ulokowana. W niniejszym rozdziale przeanalizowane zostaną zakresy częstotliwości, które potencjalnie mogą być wykorzystane do wdrożenia systemów radia kognitywnego. Pod uwagę zostaną wzięte aktualne i planowane przeznaczenia częstotliwości w Polsce (w tym także w kontekście przeznaczeń europejskich) oraz istniejący plan zagospodarowania poszczególnych zakresów częstotliwości, które mogą stać się przedmiotem rozważania potencjalnych możliwości implementacji radia kognitywnego.

Analizy widma dostępnego na terytorium Polski dla systemów radiokomunikacyjnych przeprowadzone będą w aspekcie możliwości wprowadzenia sieci radia kognitywnego w jego wybranych częściach (w tym w pasmach licencjonowanych oraz nielicencjonowanych – ogólnodostępnych) w sposób scentralizowany bądź rozproszony. Na podstawie wyników tych analiz wyciągnięte będą wnioski odnośnie zagospodarowania rozpatrywanych zakresów.

Istota gospodarki widmem zasadza się jak dotychczas na utrzymywaniu ścisłych reguł rządzących sposobami obsady tego widma przez różne służby radiowe, a w konsekwencji przez różne systemy radiowe. Naczelną zasadą procesu zarządzania widmem jest utrzymanie trzech etapów działania: przeznaczenia zakresów częstotliwości, planowania (czy rezerwacji) częstotliwości oraz przydziałów częstotliwości. Utarło się, że etapy te, podlegające tzw. regule 3P (Przeznaczenia, Planowanie, Przydział), zgodne jest z angielską regułą 3A (Allocation, Allotment, Assignment). W myśl tak sformułowanej zasady zarządzania przydziały częstotliwości dla systemów (sieci) radiowych następują po uprzedniej rezerwacji częstotliwości, która z kolei mogła mieć miejsce w z góry określonych wycinkach widma (zakresach częstotliwości), objętych stosownymi przeznaczeniami. W danym zakresie częstotliwości pracować mogą więc tylko takie służby radiowe, dla których ten zakres był przeznaczony. Współużytkowanie tych zakresów przez różne służby było ryzykowne, ze względu na konieczność przestrzegania zasad kompatybilności międzysystemowej. Stąd w początkach działalności regulacyjnej zakładano, że w danym zakresie częstotliwości pracować mogła tylko jedna służba, np. tylko radiodyfuzyjna, lub tylko ruchoma lądowa.

W miarę rozwoju służb radiowych zaczęły występować braki wolnych (niezajętych dla potrzeb konkretnej służby radiowej) częstotliwości, w konsekwencji tego przeznaczano dla potrzeb poszczególnych służb coraz to nowe (najczęściej wraz z rozwojem techniki radiowej

coraz to wyższe) zakresy częstotliwości. Ponadto wraz z rozwojem technik kompatybilnościowych zaczęto dopuszczać użytkowanie systemów różnych służb radiokomunikacyjnych w tym samym zakresie częstotliwości, np. radiodifuzji i radiokomunikacji ruchomej – początkowo na zasadzie różnych ważności służb (pierwszej i drugiej ważności), później umożliwiając lokowanie w jednym zakresie kilku służb pierwszej i drugiej ważności. Jednak praktycznie współużytkowanie wielu różnych służb w jednym zakresie, na tym samym obszarze, było najczęściej niemożliwe ze względu na wzajemne zakłócenia. Stąd na obszarze jednego kraju, na terenie zarządzanym przez jedną administrację łączności, obsadzenie danego zakresu różnymi służbami radiowymi prawie zawsze nie mogło mieć miejsca. Natomiast bardzo często w tym samym zakresie częstotliwości różne służby pracowały w różnych krajach (np. w jednym radiodifuzja, w drugim radiokomunikacja ruchoma lądowa). Powodowało to konieczność uzgadniania sposobu pracy różnych systemów, po różnych stronach granicy, celem uniknięcia szkodliwych zakłóceń istotnych szczególnie na terenach przygranicznych.

Implementacja służby jednego rodzaju (określonego typu systemu lub sieci radiowej) na tym samym obszarze, w tym samym zakresie częstotliwości, powodowała jednak zbyt ekstensywne zagospodarowanie widma. W celu uniknięcia wzajemnych zakłóceń wewnątrzsystemowych stosowano separację częstotliwościową lub obszarową (czasem oba rodzaje razem), co dawało w efekcie powstawanie luk zarówno w pokryciu częstotliwościowym, jak i obszarowym.

Nowa polityka w obsadzaniu wybranych pasm częstotliwościowych (neutralność techniczna), postępująca konwergencja usług, a co za tym idzie konieczność elastycznej gospodarki zasobami widmowymi spowodowały odwrócenie trendu „monokulturowego” sposobu zagospodarowania poszczególnych zakresów częstotliwości. Dopuszczona została możliwość implementacji różnych systemów radiowych reprezentujących różne służby radiowe w jednym i tym samym zakresie częstotliwości. Postępowanie takie ma na celu uzyskanie możliwie najbardziej efektywnego wykorzystania zasobów widmowych. Wypełnienie luk w pokryciu częstotliwościowym oraz obszarowym (dla porządku można dodać, że w przypadku pracy z przerwami w czasie można zapierać również luki czasowe) poprzez uruchamianie pracy innych, niż pierwotnie tam dedykowane systemy radiowe, zapewnia bardziej wydajną eksploatację dostępnych zasobów widma na określonym terenie.

Wraz z rozwojem technik radiokomunikacyjnych oraz z rozwojem organizacji wykorzystania widma częstotliwości radiowych możliwe stało się zwiększenie efektywności wykorzystania widma. Dzieje się tak głównie skutkiem postępu w procesie zapewniania

kompatybilności elektromagnetycznej i to zarówno w sferze sprzętowej (np. zwiększenie odporności odbiorników na zakłócenia, czy lepsza filtracja produktów modulacji pasożytniczych w nadajnikach) jak i w sferze programowo- sygnałowej (np. wprowadzenie do użytku nowych, cyfrowych technik modulacyjnych, stosowanie sygnałów ultra szerokopasmowych czy zaawansowanych technik kodowania sygnałów).

Radio kognitywne doskonale wpasowuje się w postęp techniczny zapewniając, przy szybkim rozwoju techniki monitoringu stanu widma radiowego, możliwość bardzo efektywnego wykorzystania przestrzeni elektromagnetycznej.

2.1 Sposoby wykorzystania widma radiowego przez systemy radia kognitywnego

Współużytkowanie widma częstotliwości radiowych może odbywać się na wielu płaszczyznach. Zwykle rozróżniane są cztery aspekty współużytkowania widma [1]: architektura systemów, sposób przeznaczenie widma, technika dostępu do widma oraz metoda współużytkowania. Współużytkowanie rozpatrywane pod kątem architektury może być zcentralizowane (gdzie przydział częstotliwości oraz procedury dostępowe sterowane są przez jakąś centralną jednostkę) lub zdecentralizowane (gdzie przydział i dostęp podporządkowane są lokalnym prawom, które są odrębnie nadawane każdemu z węzłów sieci radiowej). W aspekcie sposobu przeznaczenia widma na potrzeby radia kognitywnego dostęp do tego widma może być kooperacyjny bądź niekooperacyjny. W przypadku dostępu kooperacyjnego poszczególne częstotliwości przydzielane są w wyniku przetworzenia informacji o oddziaływaniu zakłóceń interferencyjnych pochodzących z jednego węzła na pracę innych węzłów radia kognitywnego. Natomiast w sytuacji, gdy dostęp jest niekooperacyjny analizowana jest sytuacja w jednym węźle, nie rozpatruje się zakłóceń oddziałujących na inne węzły – powoduje to, co prawda, nieoptymalne wykorzystanie przestrzeni widmowej, ale ogranicza ruch w sieci spowodowany wymianą służbowej korespondencji międzywęzłowej.

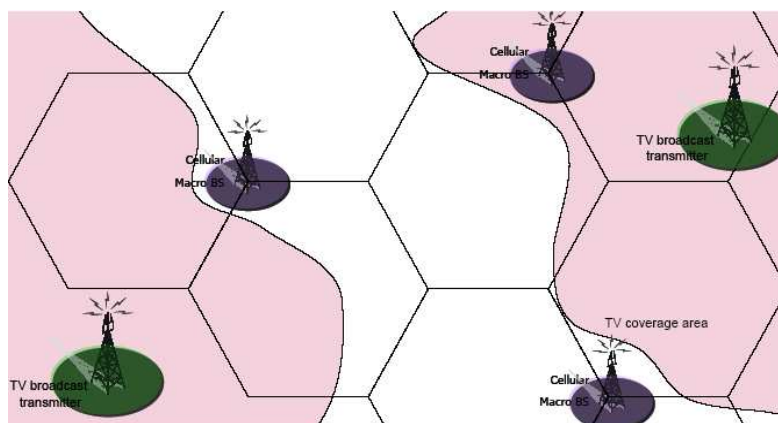
Z analiz technik dostępu do widma wynika, że współużytkowanie może wystąpić w dwóch sytuacjach: jako eksploatacja nakładkowa (overlay) lub podkładkowa (underlay). W przypadku współużytkowania nakładkowego, w danym zakresie częstotliwości węzły sieci radia kognitywnego (sieci wtórnej w stosunku do sieci pierwotnej – uprzednio wykorzystywanej, np. telewizji cyfrowej) eksploatują jedynie te części widma (podzakresy częstotliwości), które niewykorzystane są przez głównych użytkowników tego zakresu. Pociąga to za sobą minimalizację zakłóceń wprowadzanych do sieci pierwotnej przez sieć

wtórna, jednak wymaga ścisłego przestrzegania reguł kompatybilności nie tylko wspólnokanałowej, lecz również sąsiedniokanałowej. Podczas współużytkowania podkładowego wykorzystywany jest pełny dostępny zakres częstotliwości, jednak sieć wtórna wykorzystywać może jedynie techniki ultraszerokopasmowe (z rozproszeniem widma, pracujące często poniżej poziomu szumów środowiskowych), aby nie powodować szkodliwych zakłóceń w sieci pierwotnego użytkownika tego zakresu. Jeżeli chodzi o metody współużytkowania widma, to rozróżnia się również dwa przypadki. W pierwszym z nich mamy do czynienia ze współużytkowaniem wewnątrzsieciowym, w ramach sieci jednego operatora radia kognitywnego, natomiast w przypadku drugim – ze współużytkowaniem zewnątrzsieciowym, gdzie na pewnym obszarze widmo może być eksploatowane przez kilku operatorów radia kognitywnego. Klasyfikacja powyższa nie odnosi się do przypadków tzw. wtórnego rynku częstotliwości, gdy właściciel widma – nie wykorzystując go w pełni – odsprzedaje bądź wynajmuje część swoich praw do użytkowania widma.

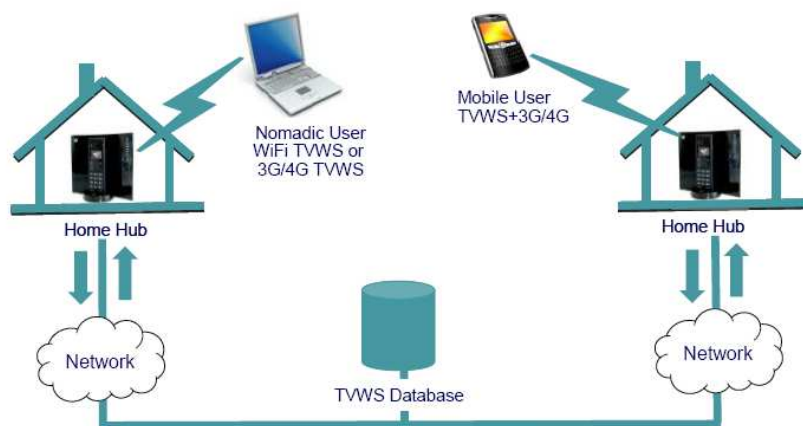
Ogólnie rzecz biorąc, użytkowanie systemów radia kognitywnego polega na wyszukaniu i zagospodarowaniu luk, tzw. białych przestrzeni (ang. white spaces), w przestrzeni widma radiowego wykorzystywanego przez systemy radiowe pierwotnie użytkujące wybrane zakresy częstotliwości, zwane dalej systemami pierwotnymi. Sposoby wyszukiwania i zagospodarowania nie będą w niniejszym rozdziale omawiane, przedstawiony natomiast będzie przegląd zakresów częstotliwości, które potencjalnie mogą służyć do implementacji radia kognitywnego. Z samej zasady działania radia kognitywnego wynika, że nie wszystkie zakresy będą mogły być do tego celu użyte. Jak dotychczas, generalnie uważano że radio kognitywne może być stosowane w zakresach częstotliwości aktualnie wykorzystywanych przez telewizję. W ramach europejskiego programu FP7 QUASAR dokonano próby określenia możliwości zastosowań radia kognitywnego w koegzystencji z niektórymi rodzajami służb radiowych i w ramach określonego typu środowiska [2]. Ustalono tam, że najbardziej obiecującymi scenariuszami wprowadzenia radia kognitywnego do środowiska będą jego implementacje w pasmach zajętych przez systemy telewizyjne – gdzie na obszarach lukowych jako systemy wtórne można wdrożyć systemy komórkowe, (rys. 1), lub – podobne do WiFi – radiowe systemy dostępne (rys. 2).

Jak się wydaje, takie same systemy (komórkowe lub dostępne) można wdrożyć w zakresach częstotliwości zajmowanych przez systemy radiofoniczne, gdzie pomimo starannego planowania nadal występuje wiele luk w pokryciu (rys.3) [3]. W obu tych przypadkach, zarówno wtedy, jak pierwotnymi będą systemy radiowe czy telewizyjne, systemy wtórne mogą być rozwijane zarówno w otwartej przestrzeni jak i w pomieszczeniach zamkniętych. W trakcie

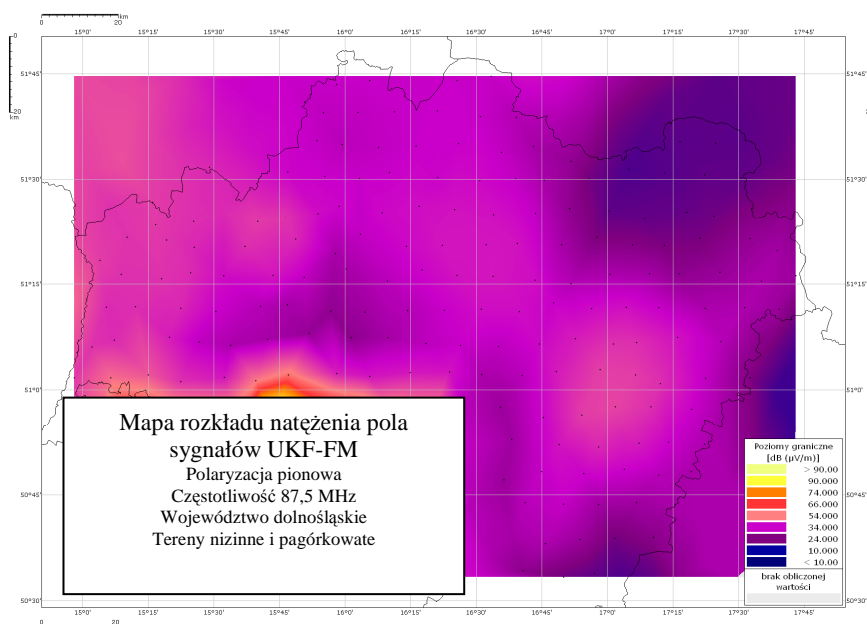
wykonywania programu QUASAR założono ponadto, że systemy radia kognitywnego mogą być implementowane również w zakresach częstotliwości zajmowanych przez pierwotne systemy radarowe (radiolokalizacja i radionawigacja) i lotnicze [2]. Jednak w takich przypadkach systemy wtórne mogą być używane jedynie w pomieszczeniach zamkniętych (rys 4.), a w skrajnych przypadkach (bardzo niskie moce) na obszarach ulic w dużych miastach [4] – pod warunkiem, że zachowany będzie określony odstęp od poziomu zakłóceń odbiornika radarowego.



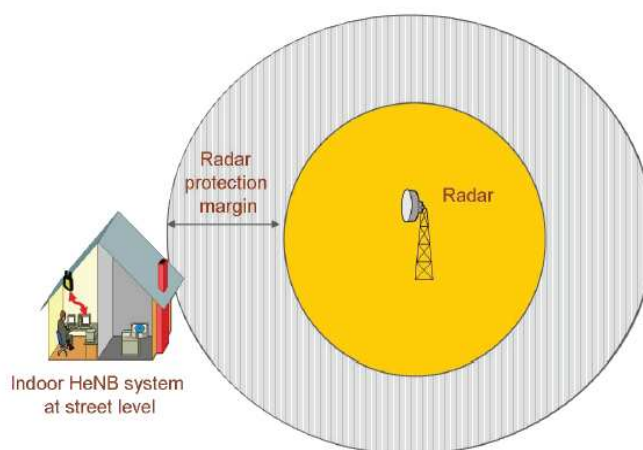
Rys. 1 Wykorzystanie „białych przestrzeni” widma w paśmie TV przez systemy komórkowe pracujące w trybie radia kognitywnego [2]



Rys. 2 Idea wykorzystania „białych przestrzeni” widma w paśmie TV przez systemy dostępne przy wykorzystaniu bazy danych [2]



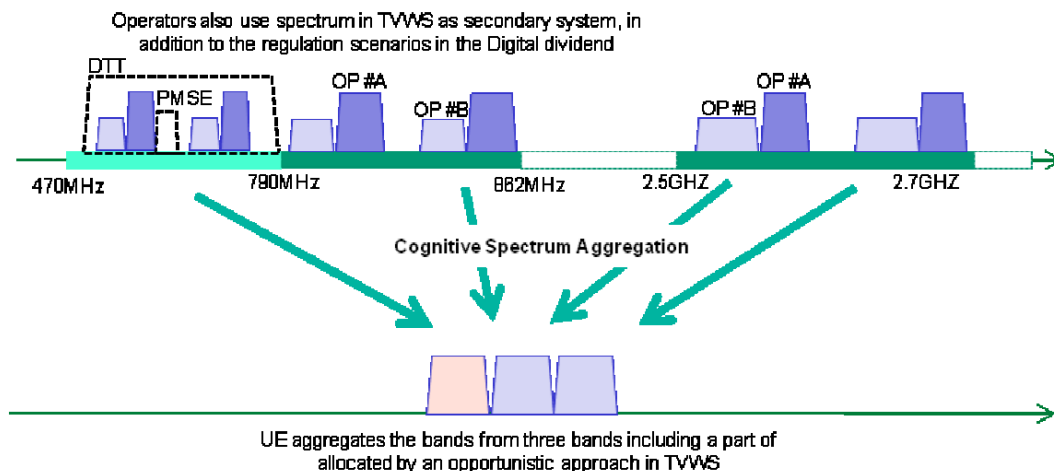
Rys. 3 Ilustracja luk (ciemne kolory) w) w rozkładzie natężenia pola radiowych stacji UKF-FM na częstotliwości 87,5 MHz – do wykorzystania przez radio kognitywne [3]



Rys. 4 Ilustracja sposobu wykorzystania radia kognitywnego w zakresie użytkowanym przez stacje radarowe [4]

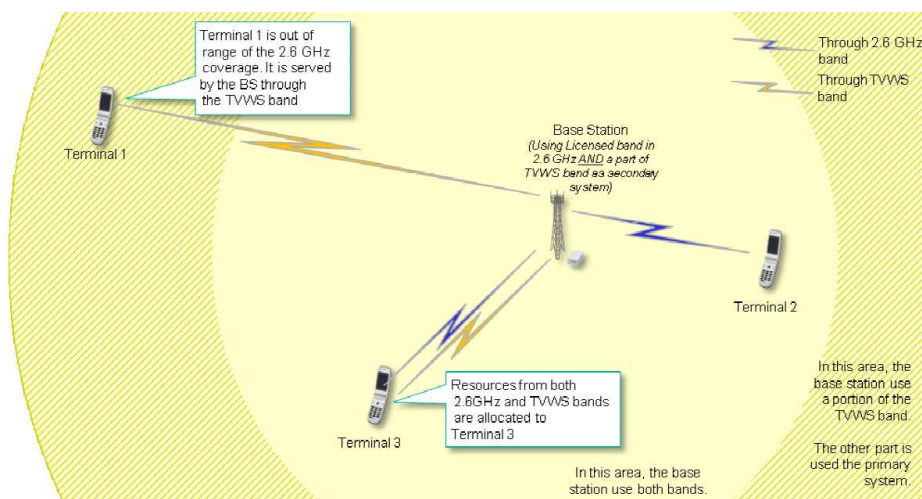
Systemy radia kognitywnego mogą być rozwijane w ramach jednego zakresu częstotliwości – wykorzystywanego przez jeden system pierwotny, jednak mogą również wykorzystywać jednocześnie kilka podzakresów częstotliwości. Mogą to być podzakresy sąsiednie, podzakresy od siebie odseparowane, ale wchodzące w skład jednego zakresu, wreszcie możliwe jest użycie kilku podzakresów z różnych, nawet znacznie od siebie odseparowanych zakresów częstotliwości. Przykład taki, użycia systemów pracujących w różnych zakresach częstotliwości celem wykorzystania „białych przestrzeni” widma radiowego pasm telewizyjnych (TVWS – TV white spaces) przedstawiony jest na rys. 5 [5]. Metody agregacji częstotliwości przez radio kognitywne rozważane są m.in. w pracach prowadzonych

na rzecz projektu SACRA (Spectrum and Energy Efficiency through multi-band Cognitive Radio) prowadzonego w Europie w ramach Siódmego Programu Ramowego (FP7).

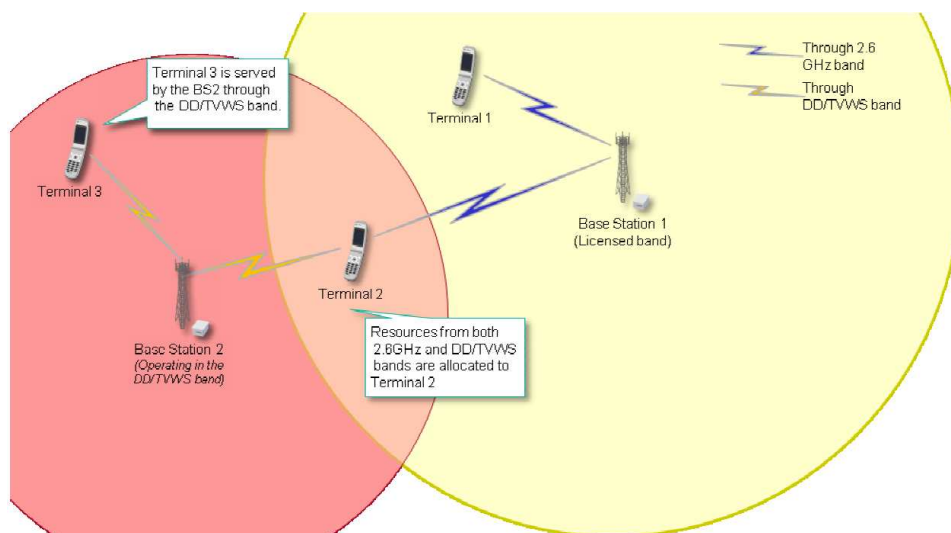


Rys. 5 Ilustracja sposobu wykorzystania i agregacji przez radio kognitywne kilku zakresów częstotliwości

Niezależnie od wykorzystywanego zakresu częstotliwości można wyróżnić dwa sposoby agregacji częstotliwości: wewnątrz obszaru obsługi danej stacji (nadawczej, bazowej, etc.) oraz na przecięciu różnych obszarów obsługi. Przypadki takie, oparte tutaj na przykładzie stacji operujących w pasmach TV i 2,6 GHz, przedstawione są na rys. 6 i 7.



Rys. 6 Przykład agregacji częstotliwości wewnątrz jednego obszaru obsługi [5]



Rys. 7 Przykład agregacji częstotliwości na przecięciu dwóch obszarów obsługi [5]

Jak wynika z powyższych przykładów, zarówno stacje bazowe, jak i terminale użytkownika radia kognitywnego mogą eksploatować częstotliwości z obu rozpatrywanych zakresów w zależności od tego, w którym obszarze obsługi będą zlokalizowane. Z punktu widzenia konstrukcji sprzętu radiowego istotne jest, jakie zakresy częstotliwości mogą być wykorzystane do potrzeb radia kognitywnego. W przypadku, gdy zaistnieje duża różnica pomiędzy częstotliwościami środkowymi skrajnych zakresów, które mogą być przyporządkowane potrzebom radia kognitywnego, budowa terminali bądź stacji bazowych może się okazać trudna a w granicznym przypadku niemożliwa, jeżeli uwzględniony zostanie stan obecnej techniki. Z kolei, gdy różnica ta będzie zbyt mała, mogą się pojawić problemy z zapewnieniem niezbędnej kompatybilności wewnątrzsystemowej.

2.2 Wybór zakresów częstotliwości dostępnych w Europie na potrzeby radia kognitywnego

Przegląd zakresów częstotliwości, które potencjalnie mogą być wykorzystane przez radio kognitywne jest niżej wykonany w oparciu o jedyny dokument zawierający informacje o zalecanym przeznaczeniu i głównym zastosowaniu częstotliwości w Europie – europejskiej tablicy przeznaczeń częstotliwości ECA (European Common Allocation) [6]. Przegląd ten powinien być w zasadzie dokonany w granicach częstotliwości, wewnątrz których (arbitralnie wybranych, zgodnie ze stanem obecnej wiedzy) można efektywnie ulokować systemy radia kognitywnego, tj. w zakresie 29,7 MHz – 6000 MHz. Jednak dolna granica tego zakresu, stanowiąca zarazem granicę wykorzystywania systemów radiokomunikacji ruchomej lądowej,

ze względu na niezłą propagację fal radiowych na tych częstotliwościach (co skutkuje możliwością rozchodzenia się na dalekie odległości sygnałów zakłócających) może być przesunięta do ok. 80 MHz, gdzie prawdopodobieństwo sporadycznej propagacji na dalekie odległości istotnie maleje. Z kolei górna granica wybrana została ze względu na rosnące tłumienie propagacyjne centymetrowych fal radiowych, które jak dotychczas nie są wykorzystywane do potrzeb radiokomunikacji ruchomej lądowej.

Teoretycznie, radio kognitywne może być zaimplementowane w każdym zakresie częstotliwości. Nie istnieje bowiem taki zakres częstotliwości, w którym efektywność wykorzystania widma równa była jedności. Jednak część zakresów, wyodrębnionych na mocy przeznaczeń częstotliwości, powinna być zajęta jedynie przez systemy tym zakresom dedykowane. Dotyczy to np. ważnych służb ratunkowych, alarmowania i powiadamiania, gdzie z uwagi na specyfikę służby trudno mówić o konieczności pełnego wykorzystania przydzielonych odcinków widma. Stąd liczba zakresów częstotliwości, które można rozpatrzeć pod kątem implementacji radia kognitywnego jest ograniczona.

Jak wynika z rozważań prowadzonych powyżej, dla potrzeb radia kognitywnego, w różnych konfiguracjach, można przeznaczyć w zasadzie te zakresy częstotliwości, które przeznaczone są dla potrzeb systemów naziemnych – telewizji, radiofonii, radiolokalizacji, radionawigacji, lotniczych (ziemia – powietrze) oraz zakresy zwolnione przez telewizję analogową (dywidenda cyfrowa). Radio kognitywne, na zasadzie agregacji częstotliwości może wykorzystywać ponadto wszelkie zakresy przeznaczone dla radiokomunikacji ruchomej lądowej, problemem może być tutaj znalezienie luk w widmie, gdyż przy dobrym projektowaniu można zapewnić wysoką efektywność widmową w tych zakresach. Możliwe, choć trudne ze względu na duże prawdopodobieństwo istnienia potencjalnych zakłóceń, jest wykorzystywanie zakresów częstotliwości przeznaczonych dla użytkowników nielicencjonowanych (pasma obywatelskie czy pasma ISM – Industrial, Scientific, Medical). Wątpliwe wydaje się szerokie użycie do celów radia kognitywnego zakresów częstotliwości przeznaczonych dla służb stałych (np. dla systemów dostępowych), głównie z uwagi na konieczność unikania zakłóceń pochodzących od systemów służby stałej (w takich przypadkach sygnały zakłócające rozchodzą się na pewnych kierunkach na stosunkowo duże odległości, co powodowane jest stosowaniem anten o dużych zyskach energetycznych). Jednakże wtedy można rozważać wprowadzenie technik kognitywnego dostępu do widma w ograniczonym zakresie. W takich przypadkach radio kognitywne ewentualnie mogłoby być stosowane w pomieszczeniach zamkniętych. Jak wspomniano powyżej, nie ma natomiast możliwości użytkowania radia kognitywnego w zakresach częstotliwości przeznaczonych dla

potrzeb służb ratunkowych. Z tego względu nie powinno się implementować tego radia w zakresach przeznaczonych dla radionawigacji satelitarnej (GPS, Galileo, Glonass).

Istnieje duża zależność wyboru zakresu częstotliwości, w którym planuje się użycie radia kognitywnego (na korzystnych zasadach, jako systemu wtórnego) od tego, jak ma być pozyskana wiedza o stanie środowiska elektromagnetycznego w otaczającej to radio rzeczywistości. Innymi słowami zakres częstotliwości, w którym ma być użytkowane radio kognitywne (system wtórny) zależy także od tego, w jaki sposób zamierza się wykrywać i wykorzystywać istniejące luki zajętości wielowymiarowej przestrzeni widma radiowego (zawierającej m.in. współrzędne geograficzne, częstotliwość pracy, szerokość kanału, dopuszczalną moc promieniowaną (maskę widmową), charakterystyki anten, wzniesienia anten, azymuty głównego promieniowania, czas pracy, itp.).

Podstawowe techniki służące radiu kognitywnemu do prowadzenia analiz stanu środowiska celem wykrywania luk w zajętości przestrzeni radiowej systemów pierwotnych można podzielić na dwie grupy: aktywne i pasywne. W ramach technik aktywnych radio kognitywne samo podejmuje decyzje o rozpoznawaniu stanu zajętości przestrzeni widma radiowego (wyszukiwaniu i określeniu rozmiarów luk) natomiast w przypadku technik pasywnych radio kognitywne zadowala się informacją o lukach w zajętości widma pozyskaną z innych źródeł informacji. Do technik tych zaliczyć można:

- sensing (rozpoznanie zajętości poprzez bezpośrednią analizę stanu widma częstotliwości radiowych prowadzoną przez stacje radia kognitywnego) widma,

- użycie sygnałów radiolatarni oznajmiających zajętość bądź możliwość wykorzystania określonego kanału radiowego. Możliwe jest tu użycie kognitywnych kanałów pilotowych (służących do identyfikacji w danym rejonie użytych technik radiowych i skojarzonych z nimi częstotliwości), lub kognitywnych kanałów sterujących umożliwiających wymianę informacji pomiędzy sensorami zajętości widma a poszczególnymi stacjami radia kognitywnego (informacja ta może dotyczyć różnych spraw: jak np. zasad dostępu do różnych pasm, sposobów uzyskiwania praw do korzystania z widma, czy lokalnej dostępności określonych pasm częstotliwości)

- wykorzystanie informacji zawartych w bazach danych o środowisku systemów pierwotnych (położenie geograficzne, parametry elektryczne, parametry sieciowe, sposób wykorzystania środków radiowych, cechy transmisyjne, preferencje użytkowników itp.);

- użycie metod geolokacyjnych (w tym również baz danych) do określenia położenia nadajników, odbiorników, stacji bazowych czy terminali systemów pierwotnych oraz do określenia częstotliwości, które mogą być użyte w danym położeniu geograficznym.

Każda z technik możliwych do wykorzystania posiada swoje specyficzne wady i zalety. Techniki bierne korzystają z zasobów informacji zgromadzonych wcześniej, dane o środowisku elektromagnetycznym oraz sposobie jego wykorzystania uzyskane zostały przy tym bądź przez uprzednie dokonanie stosownych badań empirycznych, bądź przez symulację stanu tego środowiska przeprowadzoną na podstawie informacji o rozmieszczeniu stacji radiowych systemu pierwotnego. Dużą zaletą korzystania z tego rodzaju techniki jest możliwość natychmiastowego odwzorowania stanu środowiska EM poprzez tworzenie stosownych map zasięgów radiowych, map zajętości częstotliwości, uwzględnienie rozkładu temporalnego średniego ruchu radiowego, czy wspomnianych wyżej dostępności (praw do korzystania z widma) do poszczególnych pasm częstotliwości. Wadą jest to, że w momencie korzystania z uprzednio zgromadzonych danych informacje dotyczące stanu środowiska mogą być już częściowo nieaktualne, a w przypadku czerpania danych pochodzących z symulacji (np. zasięgów użytkowych czy zakłóceńowych stacji systemu pierwotnego lub rozmiarów jego ewentualnych stref ochronnych) informacje mogą być obarczone błędami wynikającymi z niedostatecznie precyzyjnie odwzorowanej rzeczywistości.

W przypadku technik czynnych, które polegają na aktualnym monitorowaniu stanu środowiska, kłopot pojawia się przy konieczności szybkiego i odpowiedniego przetworzenia wyników celem natychmiastowego ich wykorzystania w organizacji systemów wtórnych (radia kognitywnego). Ponadto mogą zaistnieć problemy związane z tym, że systemy monitorujące (sensingowe) mogą nie wykryć nadajników o zbyt małej mocy, mogą nie uwzględnić poziomu lokalnych zakłóceń „przykrywających” sygnały o niskim poziomie mocy pochodzące od systemów pierwotnych, czy nierównomierności ukształtowania powierzchni ziemi „maskujących” sygnały systemów pierwotnych odbieranych za wzniesieniami, w kotlinach, na stokach gór itp. [8].

W przedstawionej poniżej Tabelicy 1. zawarte są informacje dotyczące potencjalnego wykorzystania w Polsce różnych zakresów częstotliwości wyodrębnionych w pasmach VHF i UHF (według podziału obowiązującego w Europejskiej Tabelicy Przeznaczeń Częstotliwości ECA) dla potrzeb radia kognitywnego w Europie. Zawarta jest też tam sugestia odnośnie możliwości rozwinięcia systemów radia kognitywnego w wybranych obszarach, terenach, czy miejscach. Informacje te zostały podane z pewną dozą subiektywności, gdyż bazują na dostępnych, posiadanych i skrótowo opisanych powyżej wiadomościach. Uwzględniono tutaj również możliwość dokonywania agregacji częstotliwości. Należy jednak raz jeszcze zwrócić uwagę na to, że wprowadzenie radia kognitywnego jako systemu wtórnego w przestrzeń elektromagnetyczną zajęta przez inne systemy radiowe (pierwotne) wymaga dokonania

szczególności badań kompatybilnościowych, pozwalających na określenie szczegółowych warunków implementacji tego radia. Do warunków takich zaliczyć należy moce nadajników, czułości odbiorników, czy separacje odległościowe i częstotliwościowe. Kryteria implementacji możliwych systemów radia kognitywnego w zakresie 470 – 790 MHz (zajmowanym dotychczas przez systemy radiodifuzyjne i przeznaczonym na ich potrzeby) zostały przedstawione w Sprawozdaniu CEPT [7].

Tablica 1. Możliwości implementacji radia kognitywnego w Europie w różnych zakresach częstotliwości

(Treść dostępna jest w IŁ o/Wrocław ul. Swojczycka 38, 51-501 Wrocław)

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Główne przeznaczenie służby wg Regulaminu Radiokomunikacyjnego	Główne przeznaczenie wg ECA	Główne wykorzystanie zakresu w Europie	Uwagi odnośnie możliwości wprowadzenia radia kognitywnego	Polecana metoda analizy stanu środowiska EM

Sugerowany w Tablicy 1. rodzaj polecanej metody analizy środowiska EM, która skutkuje podjęciem decyzji o możliwości zastosowania radia kognitywnego wynika głównie z użytkowania systemów pierwotnych w danym zakresie częstotliwości. Najogólniejsza zasada polega na zastosowaniu informacji o stanie środowiska uzyskanej z rozlicznych baz danych oraz wykorzystania np. takiej informacji przy użyciu radiolatarni transmitującej stosowne dane w przypadku prób wykorzystania luk w przestrzeni widmowej zajmowanej przez systemy o dość rzadko rozmieszczonych stacjach nadawczych, o strukturze łatwej do opisanie i „zamknięcia” jej w bazie danych. W przypadkach, gdy system pierwotny w danym zakresie częstotliwości składa się z dużej liczby stacji radiowych (szczególnie nadawczo-odbiorczych) i możliwe jest jego nierównomierne zagęszczenie, podjęcie stosownego działania w radiu kognitywnym skutecznie wspierać będzie sensing.

Przekazane powyżej sugestie odnośnie wykorzystania poszczególnych zakresów dla potrzeb radia kognitywnego odnoszą się do sytuacji częstotliwościowej i do wykorzystania zasobów widma elektromagnetycznego w chwili obecnej. Należy się też liczyć z koniecznością prowadzenia koordynacji transgranicznej w przypadkach potrzeb wdrożenia systemów radia kognitywnego w pobliżu granic państwowych.

2.3 literatura do rozdziału 2

- [1] Akyildiz I.F. et al.: A Survey on Spectrum Management In Cognitive Radio Networks, IEEE Communications Magazine, April 2008, p. 40 – 48,
- [2] Kronander J. et al.: QUASAR scenarios for white space assessments and exploitation, URSI EMC conference, Wrocław, Poland, September 2010, p. 512 – 516,
- [3] Program Wieloletni – Rozwój Telekomunikacji i Poczty w dobie społeczeństwa informacyjnego, Działania na rzecz oceny rzeczywistej zajętości widma elektromagnetycznego przez radiofonię UKF-FM na terenie Polski, SP IV.2, Pomiary natężenia pola fal radiowych w zakresie UKF-FM na wybranym obszarze Polski, Instytut Łączności, Wrocław, październik 2008,
- [4] Rahman M.I., Karlsson J.S., Feasibility evaluations for secondary LTE usage in 2.7-2.9 GHz radar bands, 22 IEEE Personal Indoor Mobile Radio Communications, Toronto, Canada, September 2011, p. 530 – 535,
- [5] Seventh Framework Programme, SACRA scenario study and system definition, SACRA, doc. D1.1, 16 July 2010,
- [6] CEPT ECC, The European Table of Frequency Allocations and Utilisations in the Frequency Range 9 kHz to 3000 GHz, ERC Report 25, Lisboa 02 - Dublin 03 - Kusadasi 04 - Copenhagen 04 - Nice 07 - Baku 08 - Kyiv 09,
- [7] CEPT ECC, Technical and Operational Requirements for the Possible Operation of Cognitive Radio Systems in the ‘White Spaces’ of the Frequency Band 470-790 MHz, ECC Report 159, Cardiff January 2011,
- [8] Marshall P., Quantitative Analysis of Cognitive Radio and Network Performance, Artech House, Boston, London, 2010,

3. Metody estymacji widma częstotliwości dla zastosowań radia kognitywnego

Wprowadzenie

Wzrastające zapotrzebowanie na wysoką przepustowość bezprzewodowych systemów komunikacyjnych wynika z przejścia od komunikacji fonicznej do aplikacji multimedialnych. W tej sytuacji statyczne przydziały częstotliwości nie zdołają zaspokoić wymagań stawianych przez rosnące zapotrzebowanie na szerokopasmowe kanały nowych urządzeń. Radio kognitywne to propozycja wykorzystywania pasm częstotliwości, które nie są w pełni wykorzystywane przez licencjonowanych użytkowników. Formalna definicja radia kognitywnego zaadoptowana przez Federalną Komisję Komunikacyjną (FCC: Federal Communications Commission) określa:

Radio kognitywne: radio lub system który bada (senses) swe otoczenie elektromagnetyczne i może dynamicznie i autonomicznie dostosować swe radiowe parametry w celu zmodyfikowania działania systemu w celu maksymalizacji przepustowości, niwelacji interferencji, ułatwienia dostępu wtórnych rynków

Graczami zainteresowanymi systemami radia kognitywnego są

- Użytkownik licencjonowany (pierwotny) – użytkownik, który posiada wyższy priorytet lub prawne ustalenia na użytkowanie określonej części spectrum częstotliwości
- Użytkownicy wtórni – posiadacze niższych priorytetów, którzy mogą korzystać z tego spectrum w taki sposób, by nie powodować zakłóceń w transmisji pierwotnego użytkownika

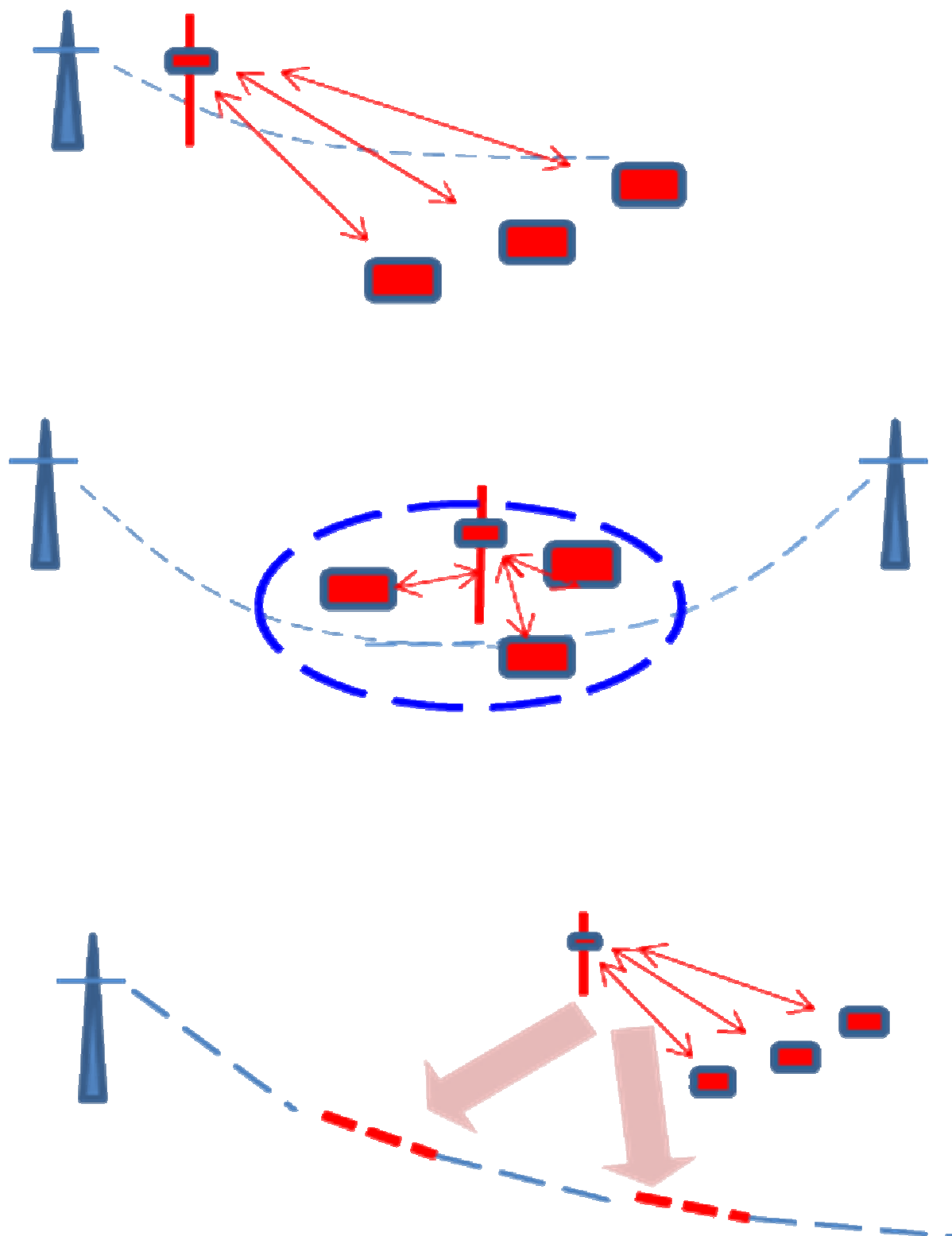
Użytkownicy wtórni winni posiadać zdolność radia kognitywnego przede wszystkim do badania lokalnego spectrum. Badanie spectrum jest zadaniem ostrzegania o zajętości spectrum i istnieniu pierwotnego użytkownika w bliskim otoczeniu. Ten cel może być osiągany poprzez:

- Geolokalizację w połączeniu z dostępem do baz zajętości spectrum
- Niemodulowany sygnał ostrzegawczy (beacon) nadawany przez pierwotnego użytkownika wskazujący na zajętość kanału i pozwalający na pomiar natężenia jego sygnału użytecznego
- Lokalne badanie spectrum (sensing) przez radio kognitywne

Badanie spectrum nie sprowadza się jedynie do pomiaru energii promieniowania w określonym zakresie, ale docelowo zawierać ma również badanie charakterystyk użytkownika spectrum takich jak czas, obszar, częstotliwość, kody (ortogonalne do kodów używanych przez pierwotnego użytkownika), rodzaj sygnału zajmującego spectrum (modulacja, nośna, pasmo, kąt padania promieniowania)

Różne scenariusze, dla których wykorzystywane są metody radia kognitywnego, prezentuje Rys. 1:

- Wersja A obrazuje podstawową funkcję takiego systemu: siatka użytkownika wtórnego działająca w zakresie pasma TV rozpoznaje w procesie sensingu wolne kanały i wybiera dla własnej transmisji spośród spełniających reguły administracyjne kanał o optymalnej relacji sygnału do szumu i interferencji. Oba systemy znajdują się w obszarze pokrycia użytkownika licencjonowanego, choć korzystają z różnych kanałów transmisyjnych
- W scenariuszu B sieć użytkownika wtórnego lokalizowana jest poza planowanymi obszarami pokrycia użytkowników licencjonowanych. Tym niemniej badanie zajętości widma jest w takiej sytuacji wymagane ze względów bezpieczeństwa transmisji użytkownika licencjonowanego, a także ze względu na stosowanie urządzeń objętych ochroną, a nie wymagających uprzedniej licencji, przede wszystkim mikrofonów bezprzewodowych
- Szkic C obrazuje możliwość wykorzystywania przerw w transmisji użytkownika licencjonowanego dla transmisji w sieci użytkownika wtórnego. Badanie widma w tej sytuacji jest priorytetem. Sytuacja taka jest analizowana np. w laboratoryjnej sieci bezprzewodowej WLAN japońskiego projektu badawczego NTT



Rys. 1. Scenariusze badania zajętości widma w paśmie TV

- A. wybieranie wolnego kanału
- B. sprawdzanie zajętości pokrycia
- C. kontrola przerw w transmisji

3.1 Czułość metod badania widma. Wymagania

Wymagania na poziomy sygnałów stawiane radiu kognitywnemu w Europie przez uprawnione organizacje międzynarodowe (raporty ECC) są zbliżone do danych wcześniej opracowanych przez komisję FCC w USA. W związku z dopuszczeniem radia kognitywnego do transmisji w paśmie telewizyjnym w USA obok wskazania kanałów niedostępnych dla radia kognitywnego dyrektywa FCC i raporty ECC podają poziomy sygnałów TV (użytkownika licencjonowanego), które winny być wykrywane w procesie badania widma (sensingu) przez użytkownika wtórnego. Porównując ten poziom z poziomem szumów na wejściu odbiornika widać, że chodzi o poziomy sygnału użytecznego poniżej poziomu szumu. Wyklucza to możliwość synchronizacji takiego sygnału w odbiorniku użytkownika wtórnego, a więc również demodulacji i dalszej obróbki pierwotnego sygnału. Badanie występowania pierwotnego sygnału – sensing - wymaga stosowania niekonwencjonalnych, nowych metod. Ten stan ilustruje przykład podany niżej.

3.1.1 Wymagane poziomy detekcji sygnałów licencjonowanych

3.1.1.1 Pasmo DTV; sygnały TV

- Sygnały TV wykrywane na poziomie odbieranej mocy: - 114 dBm

- Moc szumu w pasmie 6 MHz \approx - 100dBm

$$S/N \approx -15 \text{ dB}$$

W paśmie UHF wzmocnienie anten odbiorczych: \sim - 5 do - 3 dB

Detekcja sygnału TV wymaga wykrywania sygnałów na poziomie:

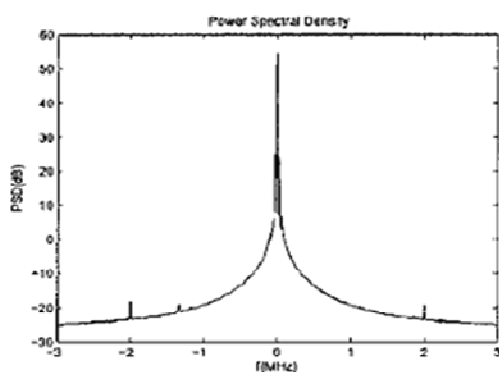
$$S/N \approx -20 \text{ dB}$$

3.1.1.2 Pasmo DTV, sygnały bezprzewodowych mikrofonów

Wykrywanie sygnałów na poziomie odbieranej mocy: - 114 dBm

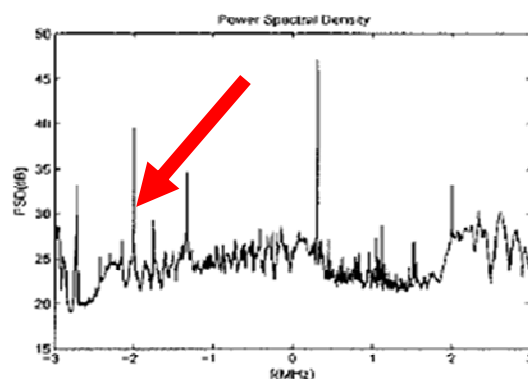
- Pasmo mikrofonu 200 kHz; dowolna lokalizacja w wolnym kanale TV

Przykład charakterystyki częstotliwościowej bezprzewodowego mikrofonu oraz jego lokalizacji w kanale TV ukazują Rys. 2 i 3.



Charakterystyka częstotliwościowa
beprzewodowego mikrofonu

Rys. 2.



Spektrum kanału TV: sygnał
beprzewodowego mikrofonu oraz
sygnałów interferencyjnych

Rys. 3

3.1.2 Wymagania sprzętowe

Wymagania stawiane sprzętowi dla zastosowań radia kognitywnego dotyczą:

1. Wysokiej częstotliwości próbkowania (high sampling rate)
2. Wysokiej rozdzielczości przetworników analogowo-cyfrowych o dużym zakresie dynamiki (high resolution ADC converters with large dynamic range)
3. Procesorów o dużej szybkości przetwarzania (high speed signal processors)
4. Terminale użytkowników radia kognitywnego winny przetwarzać sygnały w zakresie częstotliwości znacznie szerszym, niż pojedynczy kanał, co implikuje dodatkowe wymagania stawiane antenom oraz wzmacniaczom mocy. Estymacja w tym zakresie winna umożliwiać ocenę:
 - wariancji szumu (noise variance)
 - kontrolę mocy sygnału (power control)

Badanie widma sygnału może być realizowane w różnych architekturach:

- w wariantcie z pojedynczym radioodbiornikiem
Sensing w tym wariantcie jest realizowany tylko w określonych szczelinach czasowych. Ogranicza to dokładność oraz obniża przepustowość kanału, lecz jednocześnie upraszcza konstrukcję i obniża koszty odbiornika
- w wariantcie z podwójnym radioodbiornikiem
W tym wariantcie jedna część terminala realizuje transmisję, a inna – badanie widma.

Wadą takiego rozwiązania są zwiększone koszty hardware'u i poboru energii.

3.1.3 Problemy

3.1.3.1 Ukryty użytkownik licencjonowany (hidden primary user).

Problem ukrytego pierwotnego użytkownika jest analogiczny do zagadnienia ukrytego węzła w systemie wielodostępu CSMA (Carrier Sensing Multiple Accessing). Gdy obszary pokrycia użytkownika pierwotnego oraz urządzeń radia kognitywnego są tylko częściowo wspólne, tak, że sygnał użytkownika pierwotnego nie może być w pełni odbierany – użytkownik kognitywny może rozpocząć nadawanie, które spowoduje interferencje w transmisji użytkownika licencjonowanego/ pierwotnego. Metodą proponowaną dla rozwiązania tego problemu jest wspólne badanie widma (cooperative sensing).

3.1.3.2 Czas trwania oraz częstość badania widma w wersji z pojedynczymi odbiornikami

Optimalny czas badania widma wyznaczony jest przez kompromis między utrzymaniem wysokiej przeciętnej przepustowości użytkownika wtórnego oraz ochroną pierwotnego użytkownika przed interferencją. W systemach OFDM przedział ochronny między symbolami jest zastąpiony przez przedziały ciszy wykorzystywane dla badania zajętości spektrum. Czas badania może być zmniejszony jeśli badaniu poddamy jedynie zmienne części spektrum zamiast całego pasma poprzez przemiatanie parametrów adaptowanych do modelu zajętości kanału.

By nie przerywać transmisji danych dla badania spectrum zaproponowano metodę dynamicznych skoków częstotliwości (DFH - dynamic frequency hopping) [32]. Metoda opiera się na założeniu, że do dyspozycji jest więcej niż jeden kanał. Podczas pracy w jednym kanale zajętość drugiego jest kontrolowana. Zwolnienie drugiego kanału powoduje przełączenie kanałów. Punkt dostępowy decyduje o planie przełączeń i informuje o tym powiązane stacje.

3.2 Koncepcja wspólnego rozpoznawania widma

Wspólne badanie widma przez różnych użytkowników wymaga dzielenia się informacjami i wyciągania wniosków z zbioru uzyskanych pomiarów. Optymalną fuzję dla wspólnego wnioskowania na podstawie zebranych informacji oferuje zasada Chair-Varshneya (*the Chair-Varshney rule*), która bazuje na rozkładzie logarytmiczno-normalnym.

Wspólne badanie widma ma na celu:

- wykrywanie sygnału ukrytych pierwotnych użytkowników widma
- zwiększenie prawdopodobieństwa wykrycia sygnałów z zanikami, czy przesłanianiem (fading, shadowing).

W przypadku sygnałów ultra-szeroko-pasmowych (UWB) wspólne badanie umożliwia znaczne rozszerzenie zakresu badanego widma w porównaniu z tylko lokalnymi pomiarami. Problemy związane z wspólnym badaniem to organizacja efektywnej wspólnej komunikacji w warunkach zwiększonej złożoności systemu, do czego można wykorzystać kanał dedykowany lub nielicencjonowane pasmo łączności.

3.3 Podstawy detekcji sygnału w obecności szumu

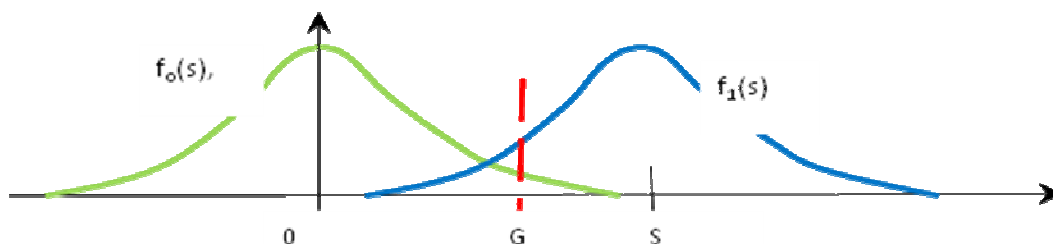
Zadaniem detekcji jest jedynie stwierdzenie, czy odbierany sygnał zawiera sygnał użytkownika licencjonowanego. Decyzja winna być podjęta z wysokim prawdopodobieństwem na zadanym odpowiednio niskim poziomie potencjalnego sygnału do szumu.

Proces detekcji sygnału jest więc testem jednej z dwóch hipotez:

H_0 : sygnał wejściowy jest szumem o zerowej wartości średniej i określonej gęstości spektralnej w zadanym paśmie częstotliwości

H_1 : wejściowy sygnał to sygnał plus szum o wartości średniej równej wielkości sygnału

Jeśli rozkład prawdopodobieństwa w pierwszym przypadku oznaczmy przez $f_0(s)$, a w drugim $f_1(s)$, mamy sytuację przykładowo przedstawioną na Rys. 4:



Rys. 4 Położenie progu detekcji (G) na wykresie PDF szumu oraz sygnału z szumem

Występują tu prawdopodobieństwa:

- Prawdopodobieństwo detekcji szumu, gdy sygnałem wejściowym jest szum ($P_o|H_o$)
- Prawdopodobieństwo detekcji sygnału, gdy sygnałem wejściowym jest szum. Jest to ***prawdopodobieństwo fałszywego alarmu*** ($P_F|H_o$)
- Prawdopodobieństwo detekcji szumu, gdy sygnałem wejściowym jest deterministyczny sygnał oraz szum. Jest to ***prawdopodobieństwo błędnej detekcji*** ($P_N|H_1$)
- Prawdopodobieństwo detekcji sygnału, gdy sygnałem wejściowym jest deterministyczny sygnał oraz szum. Jest to ***prawdopodobieństwo detekcji*** ($P_D|H_1$)

Ponieważ mamy $P_o + P_F = 1$, oraz $P_N + P_D = 1$, więc P_F i P_D wystarczają do określenia pozostałych wielkości. Prawdopodobieństwa P_F oraz P_D też nie są niezależne. Relacje między prawdopodobieństwami P_F oraz P_D wyznacza wielkość G zwana ***progiem detekcji*** lub ***progiem fałszywego alarmu***. Przesuwanie progu G poza obszar występowania szumu zmniejsza prawdopodobieństwo fałszywego alarmu, ale równocześnie ogranicza prawdopodobieństwo detekcji sygnału. I vice versa: obniżenie progu detekcji zwiększa prawdopodobieństwo wskazania sygnału, ale równocześnie zwiększa prawdopodobieństwo fałszywego alarmu.

Wyznaczenie progu decyduje więc o jakości detekcji sygnału.

Przykładowo w przypadku sygnału szumu o rozkładzie gaussowskim $f_o(s)$ z średnią zerową i jednostkową wariancją, oraz sygnałem o rozkładzie Rice'a $f_1(s)$, z średnią równą jedności (wielkość sygnału), dla sygnału powyżej progu detekcji G mamy:

prawdopodobieństwo fałszywego alarmu:

prawdopodobieństwo wykrycia sygnału

Wynika stąd zależność:

$$P_D = Q(Q^{-1}(P_F) - 1)$$

W ogólnym przypadku zależność $P_D(P_F)$ nosi nazwę charakterystyki miernika (ROC - receiver operating characteristic).

Ustalenie optymalnego progu detekcji wynika z kryterium Neyman'a-Pearson'a mówiące o *maksymalizacji prawdopodobieństwa detekcji P_D pod warunkiem nie przekroczenia prawdopodobieństwa fałszywego alarmu P_F powyżej zadanej wartości up, tj.:*

$$\max\{P_D\}, \text{ pod warunkiem } P_F \leq \alpha$$

Dla zadanych gęstości prawdopodobieństw odbioru tylko szumu $f_0(s)$, oraz szumu z sygnałem użytkownika licencjonowanego $f_1(s)$ rozwiązaniem tak sformułowanego zadania optymalizacyjnego jest *test stosunku wiarygodności* (LTR - likelihood ratio test):

$$\Lambda(s) = \frac{f_1(s)}{f_0(s)} \underset{?}{>} G'$$

gdzie spełnienie nierówności ' $>$ ' wyznacza obecność sygnału pierwotnego, a ' $<$ ' jego brak.

Wartość progu G' jest wyznaczona przez równanie:

$$P_F \equiv \int_G f_0(s) ds = \alpha$$

Twierdzenie to nosi nazwę lematu Neyman'a-Pearsona. Operator $\Lambda(s)$ to *wskaźnik prawdopodobieństwa*.

Test stosunku wiarygodności można obustronnie modyfikować poprzez transformacje o monotonicznym przebiegu, co - nie zmieniając reguły decyzyjnej - może ograniczyć liczbę stopni swobody, dla których prawdopodobieństwa są znane. Naturalnym typem transformacji jest logarytmowanie. Przykładowo, w przypadku N wymiarowych rozkładów Gaussa:

$$f_0 = \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{1}), \quad f_1 = \mathcal{CN}(\mu \mathbf{1}, \sigma^2 \mathbf{1})$$

wskaźnik prawdopodobieństwa $\Lambda(s)$ ma postać:

$$\Lambda(s) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \prod_{n=1}^N e^{-\frac{(x_n - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \prod_{n=1}^N e^{-\frac{x_n^2}{2\sigma^2}}} = e^{\frac{1}{\sigma^2} \left(-\frac{N\mu^2}{2} + \mu \sum_{n=1}^N x_n \right)}$$

a test stosunku wiarygodności $\Lambda(s) \underset{?}{>} G'$, po obustronnym zlogarytmowaniu przybiera postać:

$$t \equiv \sum_{n=1}^N x_n \stackrel{<?>}{=} \frac{\sigma^2}{\mu} \ln(G) + \frac{N\mu}{2} \equiv G$$

Stąd (suma gaussowskich zmiennych losowych jest gaussowska zmienną losową) w przypadku hipotezy H_0 mamy $t \sim N(0, N\sigma^2)$, więc:

$$P_F = Q\left(\frac{G}{\sqrt{N}\sigma}\right), \quad \text{stąd prog } G = \sqrt{N}\sigma Q^{-1}(\alpha)$$

Analogicznie, w przypadku H_1 przyjmujemy $t \sim N(N\mu, N\sigma^2)$, więc prawdopodobieństwo detekcji jest równe

$$P_D = Q\left(\frac{G - N\mu}{\sqrt{N}\sigma}\right)$$

3.4 Miernik energii (radiometr)

Wejściowymi danymi miernika energii jest seria próbek sygnału. Po wstępnej filtracji i wyliczeniu kwadratów amplitud wyliczana jest średnia z ich sumowania. Podstawę statystycznej detekcji sygnału stanowi średnia po podzieleniu przez znaną a priori gęstość mocy szumu.

W zależności od liczby próbek, gęstość prawdopodobieństwa przetworzonych próbek będzie podlegać albo rozkładowi chi-kwadrat, albo rozkładowi Gaussa. Przyjmuje się, że graniczna liczba próbek dla tych rozkładów jest nie mniejsza niż 250 [6].

3.4.1 Ograniczona liczba próbek

Badanie widma wykorzystujące detektory energii promieniowania (radiometry, periodogramy) nie wymaga wiedzy na temat sygnału pierwotnego użytkownika. Występowanie sygnału jest rozpoznawane poprzez porównanie wyjściowej mocy detektora z wartością progową zależną od poziomu szumu. Problemy związane z tą metodą to:

- ustalenie wartości progu
- brak możliwości rozróżnienia zakłóceń interferencyjnych od sygnału pierwotnego użytkownika
- niska efektywność, gdy relacja sygnału do szumu spada
- trudności z wykrywaniem sygnałów o szerokim paśmie

Detektor mocy sygnału o stosunku SNR poniżej -3.3 dB przestaje wiarygodnie pracować ze względu na losowy charakter szumu.

Zasada działania

Dane wejściowe podlegające przetwarzaniu to skończony ciąg K próbek sygnału. Zakładając, że każda z próbek podlega statystyce Gaussa, dla sumy K kwadratów modułów próbek otrzymujemy przybliżenie energii V sygnału. Podlega ona chi-kwadratowemu rozkładowi z K stopniami swobody. W przypadku szumu jest to chi-rozkład centralny, a w przypadku występowania sygnału użytecznego w szumie mamy chi-rozkład niecentralny z parametrem λ równym stosunkowi mocy sygnału do szumu

Proces detekcji jest testem jednej z dwóch hipotez:

1. H_0 : sygnał wejściowy jest szumem o zerowej wartości średniej i określonej gęstości spektralnej w zadanym paśmie częstotliwości
2. H_1 : wejściowy sygnał to próbki sygnału plus szum o wartości średniej równej wielkości sygnału

W kanale B [Hz] w czasie T można zmierzyć $2TB$ próbek a_i ($i < 2TB$) sygnału $y(t)$. Związek próbek z przebiegiem sygnału określa twierdzenie Shannona (ściśle dla $i \in (-\infty, \infty)$, tutaj w przybliżeniu zależnym od liczby próbek):

$$y(t) = \sum_{k=1}^{2TB} (a_k + \alpha_k) \text{sinc}(2Bt - k)$$

gdzie $a_k = s(k/2B)$, $\alpha_k = n\left(\frac{k}{2B}\right)$, $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$.

Podnosząc obustronnie do kwadratu w wskazanym przybliżeniu na podstawie tw. Parsevala dla przedziału jak wyżej zachodzi:

$$\int y^2(t) dt = (1/2B) \sum a_i^2$$

Dzieląc obie strony równości przez gęstość spektralną szumu N_0 otrzymujemy:

$$(1/N_0) \int y^2(t) dt = (1/\sigma^2) \sum a_i^2 = \sum (a_i/\sqrt{\sigma^2})^2 \quad (*)$$

Detekcja w czasie T jest testem jednej z dwóch hipotez:

- H_0 : odbieramy tylko sygnał szumu. $y(t) = n(t)$ o zerowej wartości średniej.
Prawa strona równości (*) jest w tym przypadku sumą kwadratów gaussowskich zmiennych losowych o zerowej wartości średniej i wariancji równej jeden.
Jest to więc zmienna losowa o rozkładzie **chi-kwadrat** z $2TB$ stopniami swobody
- H_1 : sygnał jest sumą przebiegu deterministycznego oraz szumu $y(t) = s(t) + n(t)$ o wartości średniej równej wielkości sygnału. Odpowiednio próbki wynoszą $a_i = s_i + n_i$.
W tym przypadku prawa strona (*) reprezentuje **niecentralny rozkład chi-kwadrat** z $2TB$

stopniami swobody oraz parametrem niecentralności $\lambda = \sum (s_i/\sqrt{\sigma^2})^2 = \sum (a_i/\sqrt{\sigma^2})^2$, czyli stosunkowi energii sygnału do spektralnej gęstości szumu E_s/N_0 .

Podstawą analiz wynikającą z tw. Neymana-Pearsona są dwie wielkości:

- Prawdopodobieństwo fałszywego alarmu P_F dla zadanego progu G' określone jako prawdopodobieństwo przekroczenia progu (wskazuje na występowanie sygnału użytecznego) mimo, że sygnałem wejściowym jest jedynie szum:

$$P_F = \text{prob}\{V > G' | H_0\} = \text{prob}\{\chi_K^2 > G'\},$$

gdzie, χ_K^2 oznacza *centralny rozkład chi-kwadrat z K stopniami swobody* (próbkami).

Próg G' określony jest przez zadaną wielkość prawdopodobieństwa P_F oraz liczbę stopni swobody rozkładu chi-kwadrat

- Prawdopodobieństwo detekcji sygnału użytecznego dla takiego samego progu określa formuła:

$$P_D = \text{prob}\{V > V_T' | H_1\} = \text{prob}\{\chi_K^2(\lambda) > V_T'\},$$

gdzie $\chi_K^2(\lambda)$ jest *niecentralnym rozkładem chi-kwadrat z K stopniami swobody oraz parametrem niecentralności λ* . Parametr niecentralności określamy z porównania statystyki próbek sygnału wejściowego z przebiegiem funkcji rozkładu prawdopodobieństwa funkcji $\chi_K^2(\lambda)$ dla różnych parametrów niecentralności λ .

Parametr niecentralności równy jest relacji energii sygnału do spektralnej gęstości szumu E_s/N_n . W praktyce zamiast obliczeń wykorzystuje się wykresy nomogramów [6] dla uzyskania wymaganych danych.

3.4.2 Statystyki Gaussa

W przypadku znacznej liczby próbek, przewyższającej 250, w miejsce funkcji chi-kwadrat można stosować rozkład Gaussa jako rozkład gęstości prawdopodobieństwa dla testowania obecności sygnału w szumie. Wyliczając średnią oraz wariancję dla sumy kwadratów modułów próbek traktowanych jako zmienne losowe otrzymujemy odpowiednie rozkłady normalne. Mając rozkłady prawdopodobieństwa dla obu hipotez H_0 oraz H_1 dostajemy stąd prawdopodobieństwo fałszywego alarmu w funkcji progu detekcji, i odwrotnie: próg detekcji w funkcji prawdopodobieństwa fałszywego alarmu, oraz kolejno prawdopodobieństwo detekcji.

W przypadku braku sygnału pierwotnego (hipoteza H_0) energia sygnału E_n jest w przybliżeniu równa sumie kwadratów $2TB$ statystycznie niezależnych próbek. Dzieląc próbki przez spektralną gęstość szumu, z założenia znaną a priori, otrzymujemy po takiej normalizacji gaussowskie próbki o wariancji równej jeden. Średnia wartość kwadratów jest więc równa jeden, a łącznie dla serii próbek mamy $2TB$.

Z kolei dla wariancji serii kwadratów

$$\text{var } y_i^2 = y_i^4 - \overline{(y_i^2)^2} = 2$$

Przyjmując za testowaną statystykę relację energii do gęstości spektralnej szumu, otrzymujemy prawdopodobieństwo fałszywego alarmu

$$P_F =$$

w przypadku obecności sygnału (H_1)

3.5 Algorytmy rozpoznawania zajętości widma

Dane wejściowe każdej z metod algorytmicznych stanowi seria próbek sygnału. W zależności od przyjętej metody dalsze przetwarzanie danych przyjmuje różną postać.

3.5.1 Okno przesuwne (Sliding Window)

Jest to zgrubna metoda dla detekcji sygnału TV. Można ją traktować jako szczególny przypadek metody przemiatania widma. Okno przesuwne ma kształt [18]:

$$\cos^4(\pi f_w t) \cdot \exp(j2\pi f_c t), \text{ w przedziale } |t| < 1/(2f_w)$$

gdzie sterowana częstotliwość f_w określa szerokość okna, a częstotliwość modulująca f_c wyznacza jego pozycję na skali częstotliwości.

Działanie okna stosowane jest równolegle w kanałach składowych synfazowej oraz kwadraturowej badanego sygnału. Przed konwersją ADC dla dalszego przetwarzania składowe sygnały mogą być wzmacnione w wzmacniaczu logarytmicznym, by odseparować sygnał od szumu.

Okno o mniejszej częstotliwości f_w (szersze okno) i małych krokach przesuwu pozwala estymować sygnały w analizowanym paśmie z większą dokładnością, niż z wąskim oknem i dużym krokiem przemiatania.

Jakość stosowania metody okna przesuwnego (SW) w porównaniu z innymi metodami sensingu ukazują wyniki symulacji na wykresach z Rys. 10.

3.5.2 Rozkład spektralny macierzy autokorelacji sygnału

Rozkład spektralny macierzy autokorelacji sygnału to zgrubny algorytm w przypadku sygnału TV. W przypadku bezprzewodowych mikrofonów algorytm prowadzi do analizy szczegółowej. Próbkowany sygnał wejściowy przechodzi kolejne operacje:

- a) Filtrację cyfrową serii N kolejnych próbek
- b) Procedurę wygładzania
- c) Prostokątna macierz opisująca procedury a) oraz b) po pomnożeniu przez hermitowsko sprzężoną daje macierz kwadratową, rozkładaną następnie na iloczyn dwóch macierzy kwadratowych

- d) Macierz kowariancji wejściowego sygnału poddana jest filtracji i wygładzaniu
- e) Rozkład spektralny wygładzonej macierzy kowariancji $R(k,l) = \{y(k) \cdot y(l)^*\}$
- f) uszeregowanie wartości własnych: $\lambda_{\max}, \dots, \lambda_{\min}$
(dodatknie ze względu na unitarność macierzy kowariancji)
- g) Analiza relacji $\lambda_{\max} / \lambda_{\min} <?> G$
- h) Prawdopodobieństwo fałszywego alarmu $P_{fa} = P(\lambda_{\max} > G \cdot \lambda_{\min})$

Dla założonego prawdopodobieństwa fałszywego alarmu i określonej liczby próbek wyliczamy próg alarmu. W wersji A: z relacji wartości własnych: maksymalnej do minimalnej określamy stan kanału:

- gdy relacja większa od progu – sygnał istnieje
- gdy mniejsza – brak sygnału pierwotnego użytkownika

W wersji B w miejsce maksymalnej wartości własnej wylicza się energię odbieranego sygnału

3.5.3 Korelacje czasowe cyklicznego prefiksu CP

Korelacja cyklicznych prefiksów (CP) symboli OFDM, których pola w każdym symbolu się powtarzają, stwarza możliwość detekcji sygnału o a priori znanych parametrach.

Przedrostek cykliczny CP (cyclic prefix) w symbolach sygnału OFDM służy wypełnieniu przedziałów ochronnych między polami użytecznymi symboli gwarantując ciągłość sygnału w zakresie przetwarzania DFT podczas demodulacji. Prefiks CP przenoszony jest z końca pola użytecznego o długości U i umieszczany w przedziale ochronnym, tak więc te części w każdym z symboli OFDM są identyczne, choć w różnych symbolach – różne. W przypadku radia kognitywnego, bez możliwości synchronizacji odbieranego sygnału i braku rozpoznania początku symboli, detekcja cyklicznego przedrostka poprzez funkcję autokorelacji o długości T próbek odpowiadającą jednemu symbolowi rozpoczyna się z dowolną próbką r :

$$R_{CP}(1) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{r+T} y_i^* y_{i+U}$$

A. Po zsumowaniu funkcji autokorelacji dla N symboli otrzymujemy:

$$R_{CP}(K) = \frac{1}{K \cdot T} \sum_{k=1}^K \sum_{i=r}^{r+T} y_{i+kT}^* y_{i+U+kT}$$

gdzie K jest liczbą uwzględnionych symboli, a $y(n)$ to odbierany sygnał. Wielkość ta zawiera wariancję szumu, której znajomość jest konieczna do testowania sygnału. Ocenie poddawana jest maksymalna wartość funkcji korelacji dla początkowej próbki z zakresu od 1 do T :

$$\max R_{CP}(n) \leq G$$

W przypadku braku sygnału pierwotnego wartość funkcji korelacji dla rosnącej liczby symboli K zbliża się do rozkładu symetrycznej zespolonej funkcji Gaussa o zerowej wartości średniej i wariancji $\sigma^2/K \cdot T$, tj. $CN(0, \sigma^2/K \cdot T)$.

Gdy sygnał pierwotnego użytkownika występuje w każdej próbce z prawdopodobieństwem p_+ , czyli prawdopodobieństwem błędu $(1-p_+)$, wówczas po serii $K \cdot T$ próbek - zakładając niezależność kolejnych próbek - prawdopodobieństwo fałszywego alarmu wyniesie (P_{FA} – probability of false alarm) $P_{FA} = (1-p_+)^{KT}$, lub $p_- = (1-p_+) = P_{FA}^{1/(KT)}$. Dla gaussowskiego rozkładu wartości funkcji korelacji $R_{CP}(n)$ w różnych punktach startu prawdopodobieństwo błędu wynosi

$$p_- = \exp(-[\gamma/\epsilon]^2 / \sigma^2/K \cdot CP)$$

Porównując oba wyrażenia otrzymujemy wartość progową prawdopodobieństwa fałszywego alarmu

B. Wariant niezależny od wariancji szumu

W tym wariancie zaproponowano jako test stosunku wiarygodności wielkość:

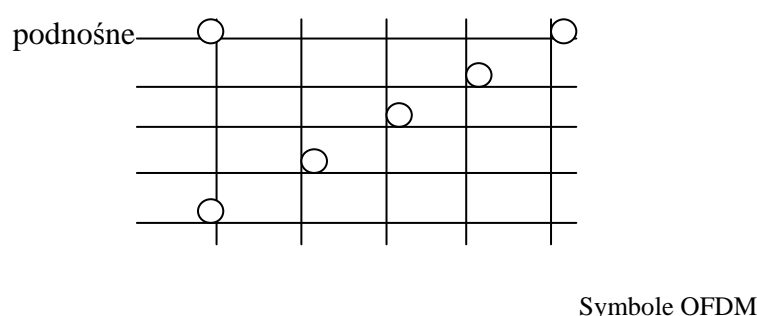
$$LCP = \frac{\frac{1}{CP} \sum_{i=0}^{CP-1} \text{Re}(y_i^* y_{i+U})}{\frac{1}{T} \sum_{i=0}^{T-1} [|y_i|^2]}$$

Wielkość autokorelacji jest normalizowana przez moc odbieranego sygnału.

Jakość testów z pkt A oraz B porównywana była poprzez symulacje komputerowe, których wyniki dla różnych kanałów i parametrów przedstawiają wykresy z Rys. 6, 7 i 10.

3.5.4 Korelacja podnośnych pilotowych w sygnale DTV

Średnia w czasie kross-korelacji dwóch symboli OFDM będzie różna od zera, jeśli posiadają one pilotowe podnośne o stałym rozkładzie na skali częstotliwości. Podstawowym celem rozmieszczenia pilotów jest synchronizacja czasowa i częstotliwościowa oraz estymacja kanału. W pracy [10] zaproponowano wykorzystanie pilotów również do badania zajętości widma sygnału DTV. Każdy symbol OFDM zawiera dwa rodzaje pilotów: ciągłe oraz rozproszone. Rozproszone podnośne pilotowe są rozłożone co 12 podnośnych i przesuwane co 3 podnośne w kolejnych symbolach OFDM tworząc siatkę powtarzalną co 4 symbole:



Rys. 5 Położenie podnośnych pilotowych w sygnale cyfrowej TV

W proponowanym algorytmie można wyróżnić cztery etapy:

a) *Wyliczenie korelacji skośnej dwóch symboli OFDM oddzielonych w czasie*

Próbki czasowe odbieranych symboli OFDM mają postać:

$$y_l[n] = e^{j(\frac{2\pi\Delta \cdot n}{N} + \theta)} \cdot \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) \cdot X_l(k) e^{\frac{j2\pi kn}{N}} + w_l[n] \quad /a1/$$

gdzie odpowiedź kanału określają parametry ścieżek:

$$H(k) = \sum_{i=1}^d A_i e^{-j2\pi k \frac{\tau_i}{T_U}} \quad /a2/$$

Wśród symboli modulujących $X_l(k)$ (k -ta podnośna, l -ty symbol) wyróżniamy symbole pilotowe $P(s)$ podnośnych pilotowych 's'. Korelacja skośna dwóch symboli 'p' i 'm'

$$R(k, m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y[n] \cdot y[n] \quad /a3/$$

proceedzi do sum wyrażeń, z których po uśrednieniu pozostaje tylko człon zawierający symbole pilotowe:

$$E\{R(k, m)\} = \varphi(k - m) \cdot \frac{1}{N^2} \sum_{p \in P} (|H(p)|^2 \cdot |P(p)|^2) \quad /a4/$$

gdzie P wyznacza zbiór podnośnych pilotowych, a funkcja $\varphi(k - m)$ różnicę faz między symbolami wynikającą z offsetu częstotliwości nośnej. Wariancja korelacji skośnej:

$$Var\{R(k, m)\} = E\{R_{k,m} - E\{R_{k,m}\}\}^2 \quad /a5/$$

dla małych wartości S/N, wskazuje, że uzasadnione jest przyjęcie dla $R(k, m)$ przybliżenia:

$$R(k, m) \approx \varphi(k - m) \cdot \frac{1}{N^2} \sum_{p \in P} (|H(p)|^2 \cdot |P(p)|^2) + \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_k[n] \cdot y_m[n] \quad /a6/$$

b) *Kumulacja funkcji $R(k, m)$*

Zachowując stałą różnicę $|k - m| \equiv r$ między symbolami można skumulować wynik korelacji $R_{k,m}$ dla kolejnych M par symboli o ustalonym czasowym rozdziale

$$C(r) = \frac{1}{M_r} \sum_{m-k=r} R(k, m) \quad /b1/$$

Biorąc pod uwagę (a6) otrzymujemy:

$$C(r) = \frac{\varphi(r)1}{N^2} \sum_{p \in P} (|H(p)|^2 \cdot |P(p)|^2) + \frac{1}{N \cdot M_r} \sum_{m-k=r} \sum_{n=0}^{N-1} x_k[n] \cdot x_m^*[n] \quad /b2/$$

Lub w skrócie:

$$C(r) = \varphi(r)A(P) + \xi(r) \quad /b3/$$

Wnioski:

- Średnia wartość $C(r)$ jest niezależna od liczby akumulowanych składników $R(k, m)$

- Wariancja członu zależnego od szumu w (b2) jest odwrotnie proporcjonalna do M_r (wpływ szumu jest redukowany z wzrostem M_r)
- Sumowanie $C(r)$ dla różnych wielkości r nie jest możliwe w przypadku offsetu nośnej ze względu na fazowy człon $\varphi(r)$ w (b2)

Aby uwolnić się od ostatniej zależności proponowany jest w [10] kolejny krok.

c) Wprowadzenie liniowej kombinacji iloczynów z pkt (b) dla skumulowanych sum o dwóch różnych rozdziałach czasowych

$$Q(r, r+d) = C(r) \cdot C^*(r+d) \quad /c1/$$

Na podstawie (b3) mamy:

$$Q(r, r+d) = \varphi(-d)A^2(P) + A^2(P)[\xi(r) + \xi^*(r+d) + \xi(r)\xi^*(r+d)] \quad /c2/$$

$$E\{Q(r, r+d)\} = \varphi(-d) \cdot A^2(P) \quad /c3/$$

$$\text{Var}\{Q(r, r+d)\} = A^2(P) \cdot \left\{ \frac{\sigma_W^4}{M_r N^2} + \frac{\sigma_W^4}{M_{r+d} N^2} \right\} + \frac{\sigma_W^2}{M_r M_{r+d} N^2}$$

/c4/

d) Liniowa kombinacja skumulowanych sum Q

Oznaczmy:

$$\Gamma = \sum_r a_r Q(r, r+d) \quad /c5/$$

Współczynniki tej kombinacji są wybierane w taki sposób, by uzyskać najwyższą czułość metody dla ustalonego prawdopodobieństwa fałszywego alarmu. W tym celu przyjmuje się maksymalizację różnicy rozkładów prawdopodobieństw występowania szumu

oraz sygnału. Za miarę różnicy dwóch rozkładów prawdopodobieństwa wybrano miarę Kullback-Leibler'a.

Podstawą decyzji jest maksymalna wartość liniowej kombinacji z pkt.(c) dla różnych punktów początkowych próbkowania w czasie, w obszarze symbolu OFDM.

Symbole OFDM w sygnale DTV mogą zawierać jeden z czterech rozkładów pilotowych podnośnych. Wspólną ich cechą jest między-pilotowy odstęp równy czterem podnośnym. Dlatego przyjmujemy w pkt (a) odstęp równy cztery.

Efekty symulacji komputerowych działania wskazanej metody analizy korelacji sygnału OFDM przedstawiają wykresy z Rys. 7 i 8.

3.5.5 Korelacja obwiedni częstotliwościowej sygnałów (SFD)

A. Przejście od testu próbek czasowych do testu próbek spectrum

Zakładając, że sygnał pierwotny jest kowariantnie stacjonarnym procesem losowym z funkcją autokorelacji:

$$r_{xx}(m) = E\{y(n)y^*(n-m)\}$$

można test hipotez odnośnie obecności lub nieobecności sygnału pierwotnego użytkownika w odbieranym ciągu czasowych próbek sygnału przenieść na test czasowych autokorelacji odbieranego sygnału:

$$H_0: r_{yy}(m) = \sigma_w \cdot \delta(m)$$

$$H_1: r_{yy}(m) = r_{xx}(m) + \sigma_w \cdot \delta(m) \quad /a1/$$

σ_w jest wariancją szumu.

Biorąc obustronnie dyskretną transformatę Fouriera można stąd przejść do próbek gęstości spektrum mocy w funkcji częstotliwości:

$$H_0: S_Y(w) = \sigma_w$$

$$H_1: S_Y(w) = S_X(w) + \sigma_w \quad /a2/$$

gdzie $w = 2\pi f \ll 2\pi B$, $S_Y(w) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} r_{yy}(n)e^{-jmnw}$, $S_X(w) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} r_{xx}(n)e^{-jmnw}$.

Celem detekcji jest rozróżnienie między obu hipotezami.

Jeśli spektrum gęstości mocy pierwotnego użytkownika jest znane a priori w odbiorniku - w pracy [10] zaproponowano detekcję obecności pierwotnego sygnału w sygnale odbieranym jako test korelacji:

$$T = \int_0^{2\pi} S_Y(w) S_X(w) dw \quad /a3/$$

$$H_0 : T < t$$

$$H_1 : T \geq t \quad /a4/$$

z progiem decyzyjnym t do ustalenia.

W praktyce w miejsce pełnej spektralnej funkcji gęstości mocy wykorzystywany jest periodogram wyliczany dla wartości $w_k = 2\pi k/n$, gdzie n jest liczbą wybranych punktów charakterystycznych spektrum mocy $S(k)$, dla $k = 1, 2, \dots, n$:

$$S_Y^{(n)}(k) = \sum_{m=0}^{n-1} x_{YY}(m) e^{-\frac{j2\pi mk}{n}} \quad /a5/$$

Po wstawieniu periodogramu w miejsce funkcji gęstości spektralnej hipotezy testu (a4) przyjmują postać:

$$\begin{aligned} H_0 : T_n &< t_n \\ H_1 : T_n &\geq t_n \end{aligned} \quad /a6/$$

gdzie t_n reprezentuje próg decyzyjny, a testowana jest wielkość detektora T_n :

$$T_n = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} S_Y(k) S_X(k) \quad /a7/$$

W pracy [10] udowodniono asymptotyczną zbieżność testu (a6) dla bardzo małych wielkości S/N i rosnącej liczby próbek do detektora LTR (likelihood ratio test - test stosunku wiarygodności) do optymalnego w sensie Neyman'a-Pearson'a. Szkic dowodu poniżej.

B. Test relacji prawdopodobieństw

W przypadku sygnału telewizyjnego, który można modelować jako gaussowski proces stochastyczny o zerowej średniej oraz wariancji z n próbek:

$$\sigma_y^2 = E\{yy^*\} = E\{xx^*\} + \sigma_w^2 \cdot \mathbf{1}_n$$

Gdy sygnałem jest tylko szum – wariancja jest równa σ_w^2 . Problem testowania hipotez H_0 czy H_1 po serii próbek $\{y_k, k=1, 2, \dots, n\}$ jest więc równoważny testowaniu hipotez:

$$H_0: y \sim CN(0, \sigma_w^2 \cdot \mathbf{1}_n)$$

$$H_1: Y \sim CN(0, E\{xx^*\} + \sigma_w^2 \cdot \mathbf{1}_n)$$

/b2/

Detektor log LRT przyjmuje postać:

$$\frac{\log CN(0, E\{xx^*\} + \sigma_w^2 \cdot \mathbf{1}_n)}{CN(0, \sigma_w^2 \cdot \mathbf{1}_n)}$$

/b3/

Po rozwinięciu i przeniesieniu stałych członów do wielkości progu mamy stąd logarytmiczny test stosunku wiarygodności LRT:

$$H_0: T_{LRT} = y^*[\sigma_w^{-2} \cdot \mathbf{1}_n - (\sigma_w^{-2} \cdot \mathbf{1}_n + E\{xx^*\})^{-1}]y < t_{LRT}$$

$$H_1: T_{LRT} = y^*[\sigma_w^{-2} \cdot \mathbf{1}_n - (\sigma_w^{-2} \cdot \mathbf{1}_n + E\{xx^*\})^{-1}]y \geq t_{LRT}$$

Dla $S/N \ll 1$ lewa strona testu może być sprowadzona do postaci [10]:

$$T_{LRT} = y^* [\sigma_w^{-2} \cdot \mathbf{1}_n - (\sigma_w^{-2} \cdot \mathbf{1}_n + E\{xx^*\})^{-1}] y \cong \sigma_w^{-4} \cdot y^* E\{xx^*\} y$$

Tak więc dla niskich wartości S/N detekcja testu (b4) dla n próbek przybiera formę:

$$H_0: T_{LRT,n} = \frac{1}{n} y^* [E\{xx^*\}] y < t_{LRT,n}$$

$$H_1: T_{LRT,n} = \frac{1}{n} y^* [E\{xx^*\}] y \geq t_{LRT,n}$$

Tutaj $t_{LRT,n} = \sigma_w^{-4} \frac{t_{LRT}}{n}$, gdzie t_{LRT} jest progiem detektora optymalnego Neyman'a-Pearson'a.

Jak pokazano w [10], szereg detektorów optymalnych $T_{LRT,n}$ oraz detektorów korelacji spektralnych T_n dla wzrastającej liczby próbek n, są zbieżne (w sensie normy Hilberta-Schmidt'a).

Oznacza to, że detektor spektralny jest asymptotycznie optymalny w sensie Neyman'a-Pearson'a.

C. Kryteria wyboru punktów charakterystycznych spektrum

Wiedząc, że detektor korelacji spektrum jest zbliżony do optymalnego dla bardzo małych wielkości S/N można ocenić, dla jakich funkcji spektrum jego wskazania będą najbardziej wiarygodne, a dla jakich – mało skuteczne.

Z definicji T_n w (a7) wynika w przypadku hipotez H_0 oraz

H_1 ,

$$T_{n,0} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} S_Y(k) S_X^*(k) = \sigma_w^2 P_X$$

$$T_{n,1} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} S_Y(k) S_X^*(k) = \sigma_w^2 P_X + \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} S_X^2(k)$$

Maksymalizacja różnicy $|T_{n,1} - T_{n,0}|$ determinuje jakość detekcji. Gęstość mocy spektrum $\{S_X(k)\}$ wypełnia ten warunek jeśli dla :

, gdzie $S_X(k) \geq 0$,

osiągniemy: maksimum

Warunek ten jest spełniony, gdy w spektrum pierwotnego sygnału jedna próbka gęstości mocy zawiera całą moc sygnału ($S = Np$), a pozostałe są równe zero.

Z kolei najgorszy przypadek (minimum różnicy estymatorów) zachodzi w przypadku, gdy wszystkie próbki są równe, czyli spektrum płaskie, jak w przypadku szumu. Estymator spektralny w tym przypadku jest nieskuteczny.

D. Estymacja optymalnego progu decyzji (detekcji)

Próg estymacji dla detektora korelacji spektrum (a7) określa założone prawdopodobieństwo fałszywego alarmu. Z kolei próg estymacji decyduje o prawdopodobieństwie detekcji. Wychodząc z wskazania, że próbki periodogramu $S_Y(k)$ podlegają centralnemu chi-rozkładowi z $2M$ stopniami swobody χ_{2M}^2 (dla składowej rzeczywistej i urojonej), gdzie M jest liczbą podziału próbek czasowych na podgrupy. Wartość średnią i wariancję próbek periodogramu określają wzory:

$$\mu_S = \sigma_w^2$$

$$\text{Var}\{S_Y(k)\} = \sigma_w^4/M$$

Rozkład prawdopodobieństwo dla detektora T_L proponowany jest poprzez utożsamienie z niecentralnym chi-rozkładem $\chi_{2M}^2(\lambda)$ (porównanie współczynników asymetrii oraz minimalizacja różnicy zróżnicowania amplitudy). Ponieważ gęstość prawdopodobieństwa podobnie oraz dystrybuanta dla funkcji $\chi_{2M}^2(\lambda)$ jest znana – można stąd określić prawdopodobieństwo fałszywego alarmu dla progu t :

$$\text{prob}(T_L > t) = \text{prob}(\chi_R^2(\lambda) > t \cdot \sigma_{\chi^2} + \mu_{\chi^2})$$

Wykorzystując rozkład gęstości prawdopodobieństwa funkcji $\chi_{2M}^2(\lambda)$ oraz jej dystrybuantę $F(x)$ mamy stąd prawdopodobieństwo fałszywego alarmu w postaci:

$$prob(T_L > t) = 1 - F(t \cdot \sigma_{X^2} + \mu_{X^2})$$

Odwrotnie, dla zadanego prawdopodobieństwa fałszywego alarmu można stąd określić próg estymacji. Próg estymacji pozwala z kolei wyliczyć prawdopodobieństwo detekcji sygnału licencjonowanego metodą korelacji spektrum częstotliwości w funkcji liczby próbek oraz parametru niecentralności.

Podstawowe kroki algorytmu:

1. Estymacja progu decyzji:

Dla założonego prawdopodobieństwa fałszywego alarmu z rozkładu centralnego chi-kwadrat wyliczamy numerycznie wielkość progu decyzji

2. Określenie parametrów rozkładu niecentralnego

Założenie: rozkład $\{S_Y(k)\} \approx$ rozkład niecentralny chi-kwadrat χ_{2M}^2

Dopasowanie parametrów przez porównanie współczynników asymetrii oraz zróżnicowania

3. Prawdopodobieństwo detekcji sygnału licencjonowanego::

Numeryczna całka w granicach $< G, \infty >$ z rozkładu prawdopodobieństwa niecentralnej funkcji chi-kwadrat χ_{2M}^2

3.6 Porównanie jakości proponowanych metod sensingu

Dopuszczenie w USA do współużytkowania pasma częstotliwości przyznanego pierwotnie telewizji dla systemu bezprzewodowego Internetu, czy ogólnie radia kognitywnego, przyczyniło się do aktywizacji metod sensingu. Podanie konkretnych poziomów sygnału

telewizyjnego, powyżej którego sygnał winien być wykrywany pozwoliło na analizy porównawcze różnych metod.

W związku z przechodzeniem z techniki analogowej na cyfrową również w Europie metody sensingu dla radia kognitywnego w paśmie telewizyjnym stały się tematem prac różnych ośrodków badawczych. Niżej pokazujemy wyniki badań porównawczych różnych metod sensingu.

Oznaczając:

- σ_w^2 - wariancja szumu
- T_U - pole użyteczne (ortogonalne) symbolu OFDM
- T_G - przedział ochronny symbolu OFDM
- $c_{p,l,k}$ - pozycje pilotowych podnośnych (k) w symbolach (l) OFDM
- P - moc sygnału pierwotnego

można zestawić wymagania stawiane apriorycznie poszczególnym rodzajom detektorów [8][13]:

Typ detektora	Parametry aprioryczne	Poj. obliczeniowa
Detektor energii	σ_w^2	$O(n^2)$
Przesuwne okno	σ_w^2, T_U, T_G	$O(n^2)$
Analiza spektralna	T_U, T_G	$O(n^2)$
Pilotowe podnośne	$\sigma_w^2, T_U, T_G, c_{p,l,k}, P$	$O(n^2)$
Korelacje 2-go rzędu	σ_w^2, T_U, T_G	$O(n^2)$
Korelacja spektrum	T_U	$O(n \log_2 n)$

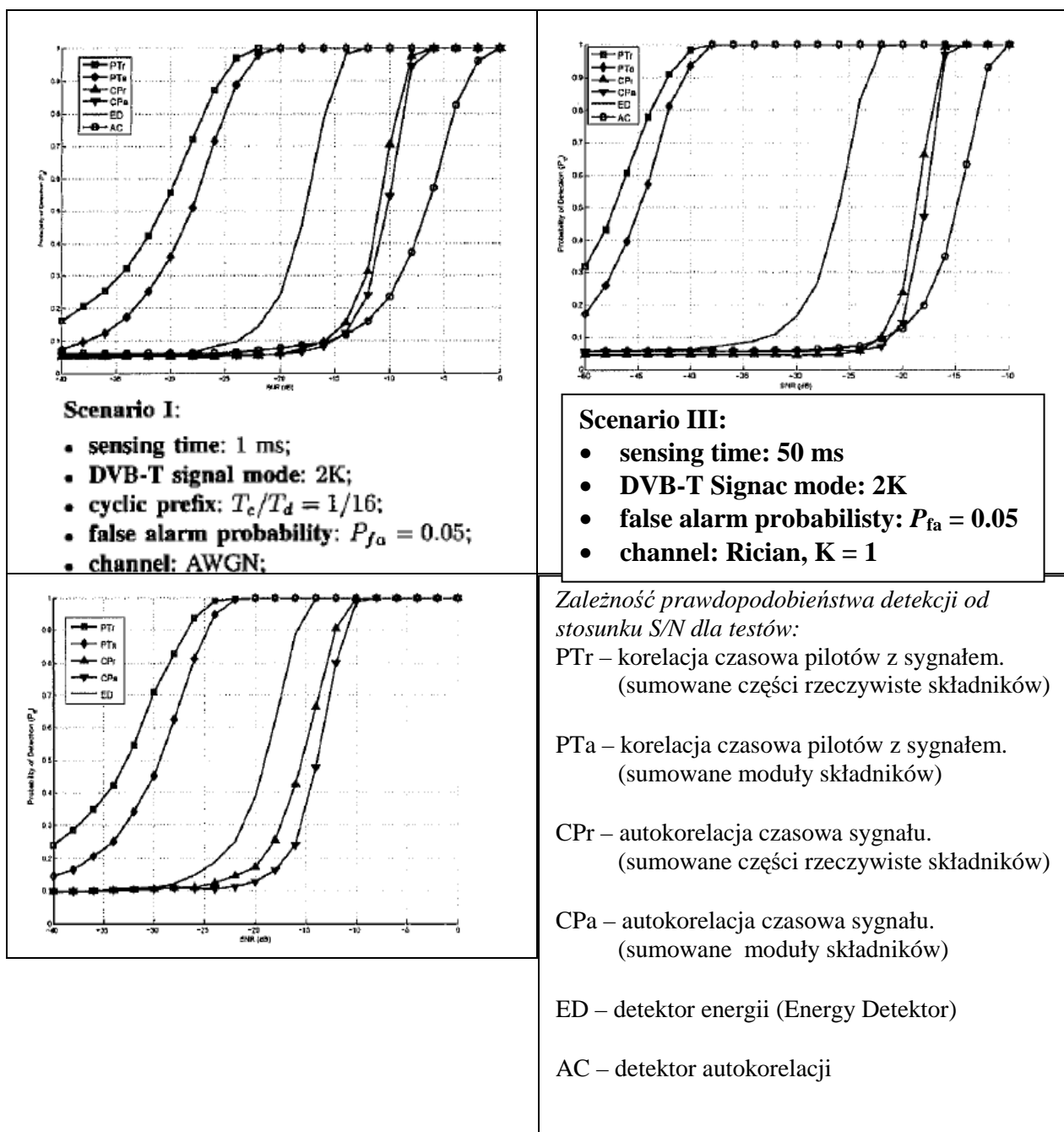
Gdy znana jest wariancja szumu detektorem optymalnym w sensie Lehman'a-Pearson'a jest detektor energii, którego złożoność obliczeniowa wynosi $O(n^2)$. Na podstawie symulacji komputerowych [12] można ocenić prawdopodobieństwo błędnego odczytu tego detektora w stacjonarnym kanale AWGN na 10^{-4} dla $S/N > -18$ dB dla czasu próbkowania 48 ms.

A. W zastosowaniu do sygnału pierwotnego cyfrowej TV z modulacją OFDM porównanie działania metod sensingu:

- detekcji energii (ED – energy detector)
- autokorelacji (AC)

- przesuwne okna w celu wykrycia cyklicznego prefiksu (CPa- gdy badane maksimum modułu, CPr- gdy maksimum części rzeczywistej). Progi detekcji metody wyznaczone empirycznie
- IFFT pilotów (PTa, PTr , oznaczenia jak wyżej)

poprzez symulacje komputerowe przeprowadzono w pracy [9]. Sygnałem odbieranym był sygnał DVB-T w paśmie 8 MHz, modulacja 16-QAM, symulowano kanały AWGN, Rayleigh'a, Rician. Rozpatrywano trzy scenariusze z różnymi parametrami. Wyniki przedstawiają wykresy z Rys. 6:

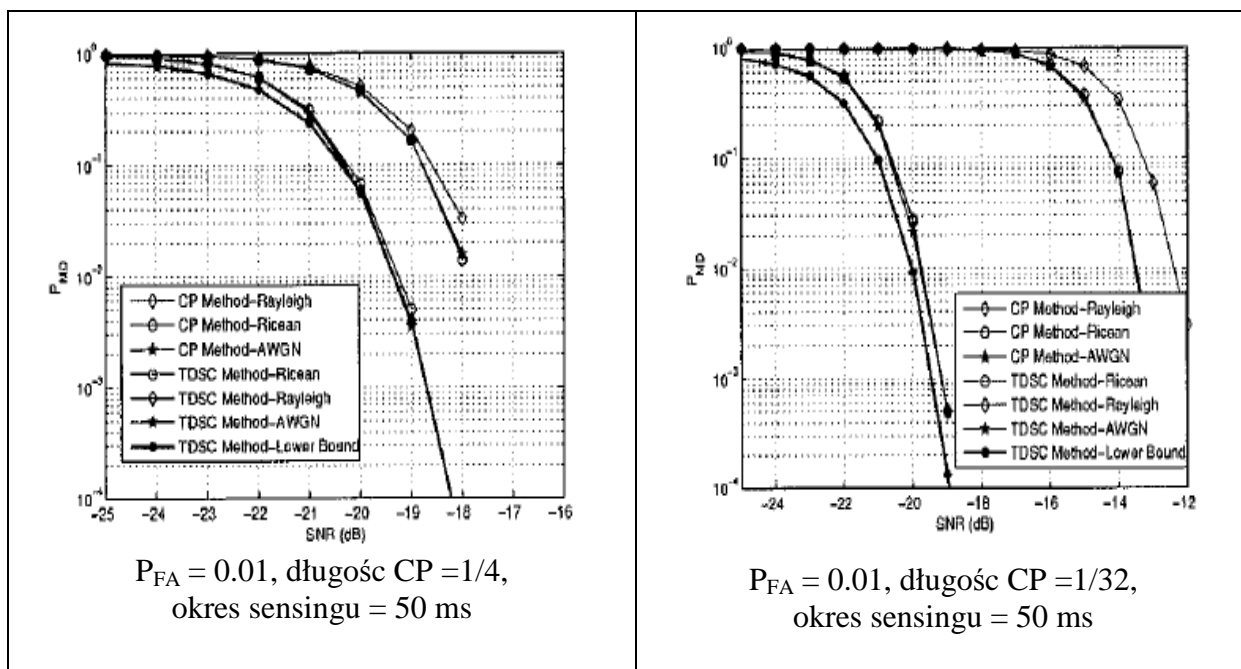


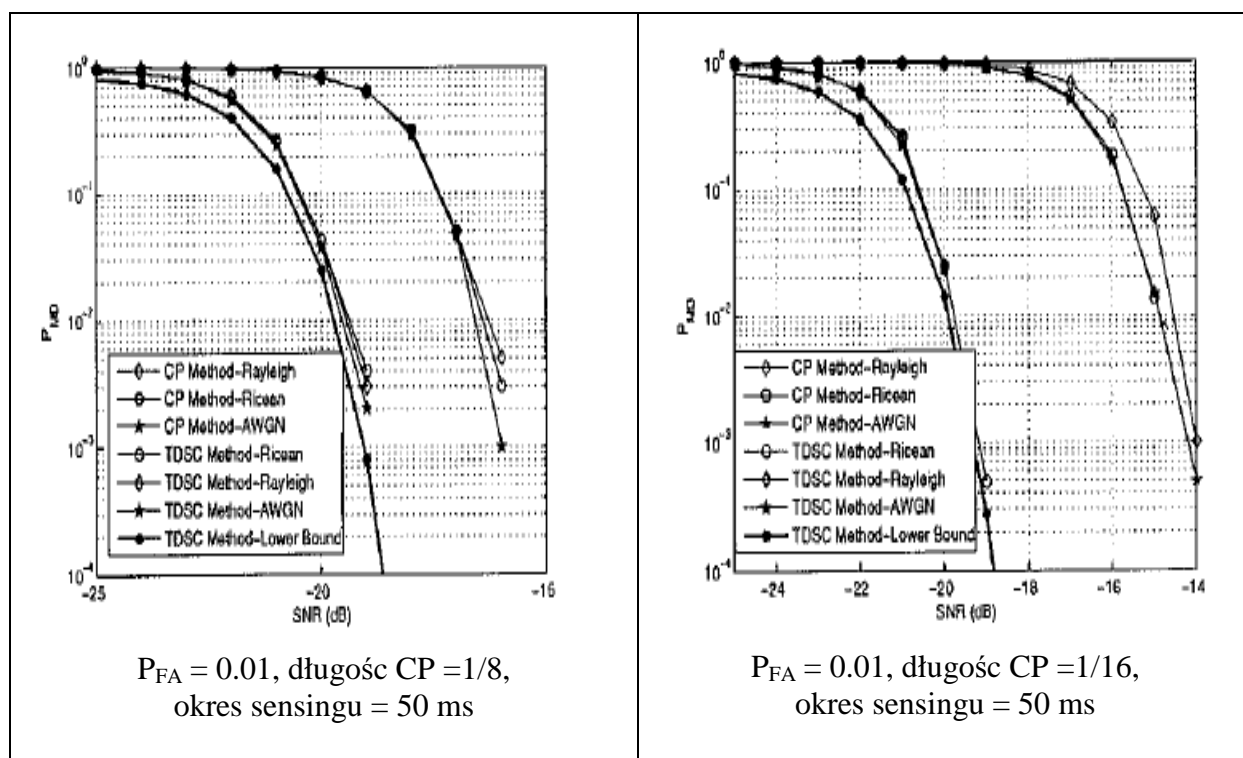
Scenario III: <ul style="list-style-type: none"> • sensing time: 1 ms; • DVB-T signal mode: 8K; • cyclic prefix: $T_c/T_d = 1/4$; • false alarm probability: $P_{fa} = 0.1$; • channel: Rayleigh; 	
---	--

Rys. 6 Porównanie wyników symulacji różnych detektorów dla kanałów AWGN, Rici'ego, oraz Rayleigh'a z wskazanymi parametrami [9]

Przedstawione wyniki wskazują, że algorytmy wykrywania cyklicznego prefiksu oraz autokorelacji działają praktycznie z podobnym rezultatem. Najlepiej działają algorytmy korelacji pilotów, choć kosztem zwiększonej złożoności obliczeniowej. Okazuje się, że analizowanie części rzeczywistej korelacji daje nieco lepsze wyniki, niż badanie różnicy modułów. Najlepsze rezultaty daje estymacja energii, należy jednak brać pod uwagę, że jej wyniki silnie zależą od znajomości wariancji szumu.

B. Analiza działania metody korelacji cyklicznego przedrostka (CP) oraz korelacji czasowej pilotowych podnośnych symboli OFDM w sygnale TV (TDSC- time domain symbol cross-correlation) przeprowadzona została w pracy [10]. Wyniki ilustruje Rys. 7:



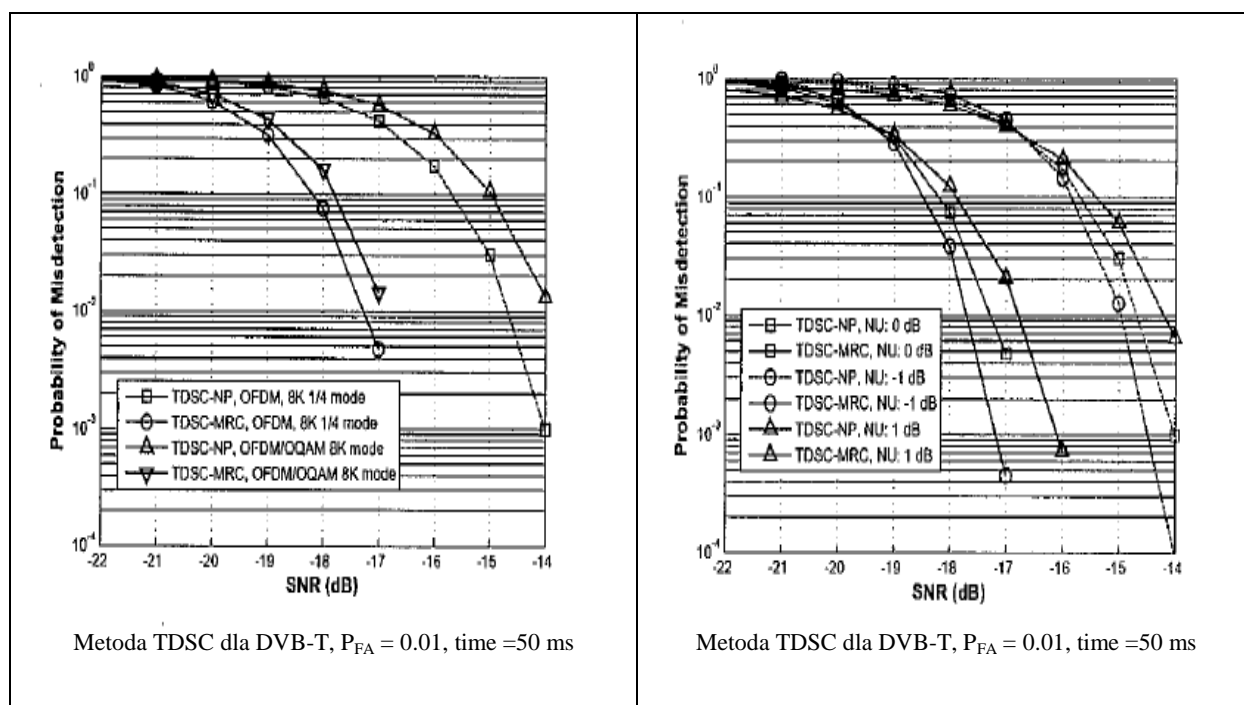


CP = Cyclic Prefix, TDSC – Time-Domain Symbol Cross-correlation

Rys. 7 Porównanie prawdopodobieństwa błędnej detekcji P_{MD} dla detektora korelacji cyklicznego przedrostka (CP) oraz kross-korelacji czasowej symboli (korelacja pilotowych podnośnych) dla kanałów AWGN, Rayleigh'a oraz Rice'a [10].

Prawdopodobieństwo detekcji $P_D = 1 - P_{MD}$, gdzie P_{MD} – prawdopodobieństwo błędnej detekcji (ang. miss-detection). Wyniki symulacji wskazują, że stosując metodę TDSC można osiągnąć prawdopodobieństwo błędnej detekcji 0.1 dla $SNR = -20.5$ dB dla każdej z wskazanych długości przedrostka cyklicznego. Generalnie metoda TDSC przewyższa skutecznością metodę korelacji przedrostka CP. w każdym z wskazanych przypadków: o 2 dB, gdy długość CP wynosi $\frac{1}{4}$ długości pola użytecznego, oraz o 6 dB, gdy CP ma długość $\frac{1}{32}$ tego pola. Metoda TDSC nie zależy od długości pola CP tak wyraźnie, jak metoda korelacji CP.

Metoda sensingu TDSC jako obiecujące praktyczne rozwiązanie była niezależnie badana poprzez symulacje komputerowe w Instytucie Komunikacji Uniwersytetu Hanowerskiego w współpracy z autorami algorytmu z USA [11]. Pierwszy z wykresów z Rys. 8 wskazuje zależność sensingu od metody modulacji, na drugim zwiążek wyników sensingu z niepewnością poziomu szumu (NU – Noise Uncertainty) wynikającego z zmian temperatury czy błędów kalibracji.



TDSC-NP : Time-Domain Symbol Cross-correlation (Neyman-Pearson test)
 TDSC-MRC : Time-Domain Symbol Cross-correlation (Maximal Ratio Combining test)

Rys. 8 Porównanie prawdopodobieństwa błędnej detekcji P_{MD} dla detektora kross-korelacji czasowej symboli (korelacja pilotowych podnośnych) dla stałego rozstawu symboli (NP), oraz różnych rozstawów (MRC) [11]. Prawdopodobieństwo detekcji $P_D = 1 - P_{MD}$

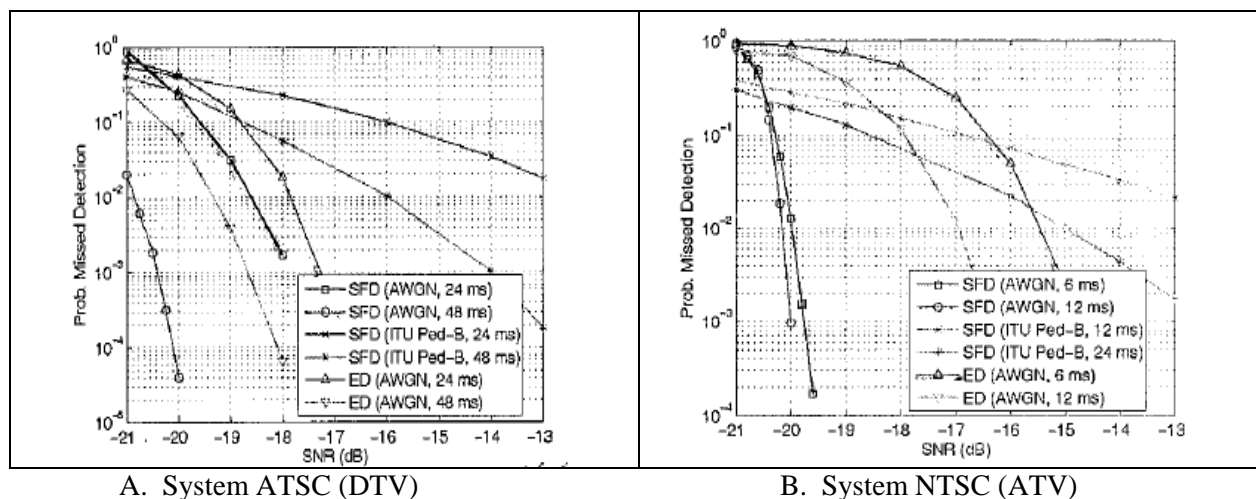
W pierwszym przypadku porównywano wyniki sensingu, gdy pierwotnym sygnałem był sygnał telewizyjny OFDM (CP-OFDM), oraz sygnał OFDM z modulacją OQAM (Offset Quadrature Modulation), który symulował sygnał FBMC (ang. Filter Bank Multiple Carrier). Rząd transformacji FFT oraz rozkład pilotowych podnośnych dla obu symulacji był taki sam.

Algorytm TDSC zawiera człony zależne od poziomu szumu. Ponieważ dokładne ustalenie poziomu szumu nie jest możliwe, więc rozpoznanie zależności metody od odchyłek szumu od wartości nominalnej ma istotne znaczenie. Wyniki symulacji dla odchyłek 1 i -1 dB od wartości średniej przedstawione są na wykresie z Rys. 8B. Jak stąd widać, odchyłki szumu nie mają wielkiego wpływu na wyniki działania sensingu metodą TDSC.

Działanie algorytmu SFD (ang. Spectral Feature Detection) przetestowano porównując jego działanie z działaniem miernika energii. w kanale AWGN, gdzie pierwotnym sygnałem był sygnał TV cyfrowej USA (Rys. 9A) oraz analogowej (Rys. 9B). Przeprowadzono również symulacje działania algorytmu SFD dla parametrów kanału wielodrogowego według modelu ITU Ped-B o profilu wielodrogowym PDP (ang. Power Delay Profile):

opóźnienie (ns)	0	200	800	1200	2300	3700
średnia moc (dB)	0	- 0.9	- 4.9	- 8.0	- 7.8	- 23.9

Przyjęto dwa warianty długości przedziałów ciszy: 24 ms oraz 48 ms. W przypadku pomiaru energii założono dokładną znajomość wariancji szumu.



Rys. 9 Porównanie efektywności (relacja błędnych detekcji do liczby prób) detektora energii (ED) oraz detektora korelacji spektrum (SFD) w stacjonarnym kanale AWGN, oraz kanale wielodrogowym (wg. Ped-B) [12]. Prawdopodobieństwo fałszywego alarmu $P_{FA} = 0.001$.

W ramach symulacji wyliczono:

- Próg detekcji dla przyjętego prawdopodobieństwa fałszywego alarmu $P_{FA} = 0.001$ dla detekcji sygnału telewizyjnego: cyfrowego oraz analogowego
- Dla ustalonych progów detekcji sygnałów telewizyjnych przeprowadzono realizację algorytmu SFD po 50 000 razy dla każdej wartości stosunku sygnału do szumu SNR. Prawdopodobieństwo błędnej detekcji jest przybliżane przez relację liczby błędnych detekcji do liczby realizacji

Jak wskazują wykresy z Rys. 9, przy pomocy algorytmu SFD można dokonać detekcji sygnału TV dla wartości SNR ≈ -20 dB w kanale AWGN. Dla sygnału cyfrowego wymaga to analizy w okresie 48 ms, a dla analogowego wystarczają 24 ms. Wynika to z różnicy w kształcie spektrum obu sygnałów: sygnał analogowy ma trzy podnośne o amplitudach ponad średni sygnał, gdy w sygnale cyfrowym występuje w kanale podstawowym tylko jedna taka podnośna.

Dla znanej wariancji szumu działanie algorytmu SFD jest bardziej skuteczne (wyższa czułość) niż działanie detektora energii.

Przyjmuje się (norma IEEE 802.22), że badanie zajętości kanału winno być przeprowadzane co 2 sekundy. Jeśli okres ciszy przeznaczony na badanie będzie wynosić 50 ms, to oznacza, że na transmisję kognitywnego radia można przeznaczyć $(1 - 50 \text{ ms} / 2 \text{ sek}) 100\% = 97,5 \%$ czasu, o ile nie pojawi się sygnał pierwotnego użytkownika.

Interesujące porównanie różnych metod detekcji sygnału przedstawili pracownicy Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Linkoping w Szwecji. M.in. w pracy [13] zestawiono prawdopodobieństwo detekcji telewizyjnego sygnału z modulacją OFDM uzyskane metodami:

- Czasowej korelacji podnośnych pilotowych sygnału
- Detektora energii
- Przesuwne okna (ang. SW – sliding window)
- Korelacja przedziałów ochronnych symboli OFDM
- Statystyk drugiego rzędu
- Autokorelacji AC

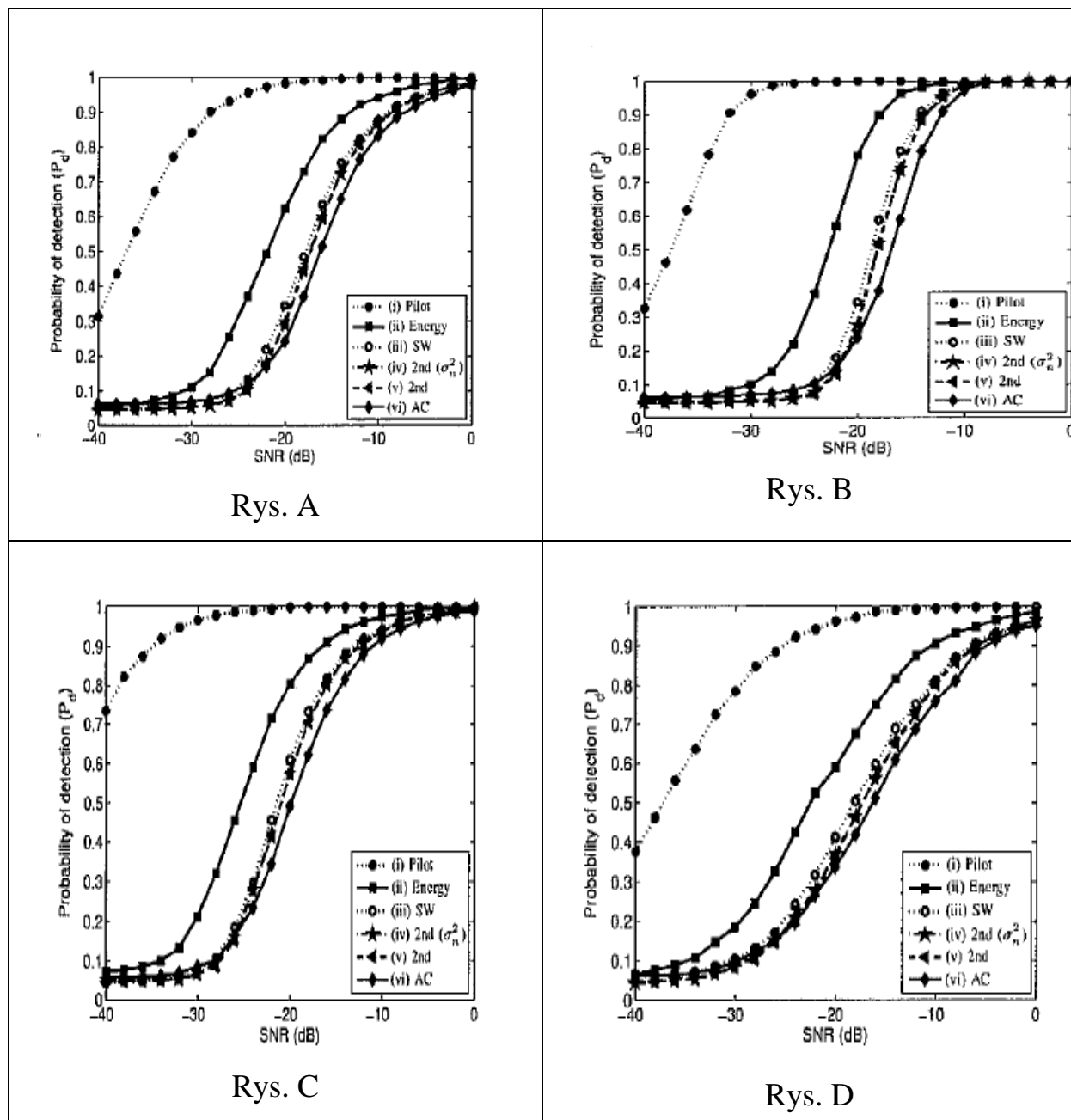
Wyniki symulacji przedstawione są na Rys. 10A, B, C, D. Rozpatrywano scenariusze z kanałami Rayleigh'a i Rice'a oraz okresami sensingu 10 i 50 ms. Założone prawdopodobieństwo fałszywego alarmu wynosi $P_{FA} = 0.05$

Sygnałem licencjonowanym był sygnał DVB-T, 2K, w kanale 8 MHz z modulacją 16-QAM. Relacja cyklicznego przedrostka T_g do długości pola użytecznego T_U w symbolach OFDM wynosi $T_g/T_U = 1/4$. Stosunek SNR był liczony jako relacja średniej mocy odbieranego sygnału do wariancji szumu.

Rezultaty symulacji wskazują, że znając parametry licencjonowanego sygnału DVB-T można uzyskać praktyczne rezultaty dla płaskiego kanału Rayleigh'a. Prowadzący do najlepszych rezultatów algorytm korelacji pilotów wymaga dobrej estymacji kanału.

Detektor energii wymaga jedynie dokładnej znajomości poziomu szumu. Nie potrafi też odróżnić sygnału pierwotnego od zewnętrznych interferencji, więc w przypadku występowania interferencji razem z interferencjami, np. od innych sieci kognitywnych, jego wskazania będą niewiarygodne. To rozróżnienie staje się możliwe przy stosowaniu algorytmów korzystających z znanych parametrów sygnału pierwotnego.

Metody korelacyjne prowadzą do wyników niewiele się różniących i słabo zależnych od poziomu szumu. Jeśli poziom szumu jest zupełnie nieznany stosować można algorytm autokorelacji.



Rys. 10 Porównanie wyników symulacji detektorów [12]:

- Korelacja pilotów
- Detektor energii
- Okno przesuwne (SW)
- Autokorelacja, gdy znana wariancja szumu
- Autokorelacja

dla kanałów Rayleigh'a oraz Rice'a i czasów pomiaru 10 lub 50 milisekund [13]

3.7 Propozycje metod sensingu w standardzie IEEE 802.22

3.7.1 Norma IEEE 802.22. Cognitive Radio Wireless Regional Area Networks Standard (WRAN)

Standard IEEE 802.22 to bezprzewodowy kognitywny system komunikacyjny [18].

Podstawowe założenia systemu:

- zakres działania 54 do 862 MHz
- stacja bazowa obejmuje teoretycznie pokryciem obszar o promieniu do 30 km (wyjątkowo do 100 km)
- przepustowość w dół 1.5 Gb/s dla maksimum 255 przenośnych urządzeń końcowych
- planowana przepustowość urządzeń końcowych w górę to 384 Mb/s.

System zarządzania spektrum stacji bazowej przystosowany jest do automatycznego wyboru wolnego kanału poprzez jeden z dwóch mechanizmów:

- geolokalizację z wykorzystaniem danych z bazy lokalizacji sąsiadujących licencjonowanych stacji telewizyjnych i parametrów transmisji
- badanie zajętości widma (spektrum sensing) polegającym na adaptacyjnej identyfikacji kanałów zajętych przez licencjonowane stacje oraz wyborze kanału najmniej narażonego na interferencje i szумы.

Badanie widma dotyczy transmisji telewizji analogowej, cyfrowej oraz licencjonowanych urządzeń pomocniczych, takich jak bezprzewodowe mikrofony. Procedury wykrywania widma dotyczą czterech parametrów:

- czułości odbiornika
- czasowego przedziału detekcji kanału: 2 sek
- prawdopodobieństwa detekcji: 0.9
- prawdopodobieństwa fałszywego alarmu: 0.1

W każdym z punktów odbioru badanie licencjonowanych transmisji jest obowiązkowe z pomocą anteny dookolnej na wysokości 10 m nad poziomem terenu o wzmacnieniu 0 dBi. Sygnał z tej anteny jest sygnałem odniesienia dla badania czułości odbiornika, które powinno wynosić:

- dla cyfrowej TV: -116 dBm
- dla analogowej TV: -94 dBm

Każdy telewizyjny kanał jest badany niezależnie, choć standard nie wyklucza wprowadzenia zespołowego badania wielu kanałów jednocześnie.

W pracy sieci radia kognitywnego wg. standardu 802.22 zaplanowano *okresy ciszy*, w których ustaje transmisja zarówno w dół jak i w górę. W warstwie dostępowej MAC przewidziano komunikację z sąsiednimi komórkami w celu synchronizacji okresów ciszy w eterze. Okresy ciszy służą badaniu spektrum w warunkach ograniczonych interferencji z strony innych bezprzewodowych sieci komunikacyjnych.

Komunikaty o stanie spektrum badanego w poszczególnych punktach odbioru przekazywane są do stacji bazowej w celu podjęcia decyzji o wolnym, optymalnym dla transmisji kanale TV. Priorytety w kolejności badanych kanałów przekazuje stacja bazowa w kanale rozsiewczym ramki MAC w komunikatach zarządzania (MAC management messages).

System IEEE 802.22 nie przewiduje wybranej metody badania widma sygnału. W granicach ustalonych parametrów metoda badania pozostaje sprawą wyboru producentów sprzętu. Kompatybilność różnych systemów badania widma gwarantuje standaryzacja komunikatów o wynikach badania, co umożliwia właściwe reakcje stacji bazowych w sieciach korzystających z sprzętu nadawczo-odbiorczego różnych producentów.

W ten sposób postęp w rozwoju metod badania widma i ich implementacja nie będą wymagały jednoczesnej wymiany całego oprzyrządowania w węzłach sieci radia kognitywnego.

W przypadku pracy różnych sieci użytkowników wtórnych w tym samym zakresie standard dopuszcza równoległą transmisję z kontrolowaną dystrybucją kanałów i przepustowości.

3.7.1.1 Standard IEEE 802.22.1

W celu opracowania wymagań i mechanizmów ochrony transmisji bezprzewodowych mikrofonów pracujących w zakresie pasma TV podjęto odpowiednią standaryzację w ramach grupy 802.22.1. W listopadzie 2010 roku opublikowano standard dla radiowego sygnału ostrzegawczego (Bacon) sygnalizującego działanie bezprzewodowego mikrofonu w analizowanym obszarze.

Sygnał bezprzewodowych mikrofonów winien być identyfikowany na poziomie - 107 dBm

3.7.1.2 Specyfikacja IEEE 802.19

Celem projektu (standard planowany na 2013 rok) jest opracowanie metod koegzystencji różnych czy niezależnie działających sieci kognitywnych w zakresie pasma TV.

Projekt opiera się na metodach niezależnych od technologii radiowych, w tym metodach opartych na bazach danych dla różnych lokalizacji, oraz adaptacyjnych możliwościach urządzeń kognitywnych.

3.7.1.3 Project IEEE 802.15 Wireless Personal Area Networks (WPAN)

Grupa Robocza w ramach IEEE 802.15 przyjęła za cel adaptację projektu IEEE 802.15.4 (Low Rate Wireless Personal Area Network – WPAN) do transmisji w zakresie pasma TV. Działalność Grupy zaczęła się w styczniu 2011 roku i obejmuje działalność nielicencjonowanych urządzeń:

- Inteligentnych sieci pomiarowych
- Sieci sensorowych
- Systemów telemetrycznych

Rezultatem pracy Grupy będzie aneks do standardu IEEE 802.15.4 obejmujący poprawki w warstwie fizycznej oraz dostępowej.

3.7.1.4 Standard 802.11 Wireless Local Area Networks (WLAN)

Celem projektu jest wprowadzenie modyfikacji do IEEE 802.11 (WiFi) w celu dostosowania warstwy fizycznej oraz dostępowej MAC tego systemu do wymagań stawianych wtórnym użytkownikom w paśmie telewizyjnym w związku z możliwością jego udostępnienia dla nielicencjonowanych użytkowników (systemów kognitywnych). Nowela spodziewana jest w roku 2013 i ma obejmować bazę geolokalizacji określającą gdzie, kiedy oraz jak sieci WiFi mogą działać w zakresie pasma TV.

3.7.2 Informacyjny przegląd algorytmów badania widma w normie IEEE 802.22

Aneks C normy IEEE Std 802.22 podaje nie wiążące propozycje badania widma w paśmie sygnału telewizyjnego. Proponowane algorytmy są sklasyfikowane jako

- niezależne od typu sygnału (blind sensing)
- wykorzystujące określone cechy sygnału OFDM (cyfrowy sygnał TV)

Dalszy podział algorytmów badania widma to:

- algorytmy zgrubnej analizy (coarse sensing)
- analiza szczegółowa, gdy badanie zgrubne daje wynik negatywny (brak sygnału)

Badanie zgrubne nie wymaga długiego czasu koniecznego dla szczegółowej analizy i w przypadku stwierdzenia sygnału pozwala zakończyć procedurę badania zajętości kanału przez użytkownika licencjonowanego.

Aneks podaje trzy algorytmy niezależne od typu sygnału oraz jednaście dla konkretnych sygnałów, głównie sygnałów telewizyjnych standardów USA (NTSC, ATSC), lecz również systemu UE opartego na modulacji OFDM.

3.7.2.1 Algorytmy niezależne od typu sygnału

- A. Detektor energii*
- B. Analiza wartości własnych macierzy kowariancji sygnału*
- C. Technika wielu rozdzielczości (multi-resolution sensing technique)*

3.7.2.2 Algorytmy badania zajętości kanału w paśmie TV

W celu badania zajętości kanałów w paśmie TV w Europie należy przyjąć, że cyfrowy standard telewizji oparty jest na modulacji OFDM i w związku z tym proponowane standardy wykorzystują właściwości sygnału OFDM z parametrami przyjętymi w specyfikacji cyfrowej TV. Niżej wskazujemy algorytmy normy IEEE 802.22. Pomijamy wyniki symulacji komputerowych przeprowadzone dla ich oceny, ponieważ opracowano je dla standardu telewizji USA, różnego od europejskiego.

- A. Korelacja sygnału (filtracja dopasowana)*
- B. Technika FFT*
- C. Statystyki wyższego rzędu*
- D. Zamknięta pętla częstotliwościowo-fazowa*
- E. Kowariancji sygnału mikrofonu*
- F. Kowariancja sygnału TV*
- G. Korelacja sygnału OFDM w dziedzinie częstotliwości (!)*

H. *Estymacja korelacji prefiksu OFDM*

I. *Korelacja sygnału OFDM w dziedzinie czasu (!)*

J. *Łączne badanie kształtu i energii sygnału*

3.7.2.3 Równoległe badanie zajętości kanałów w paśmie TV

W celu równoległego badania zajętości kanałów telewizyjnych w całym paśmie proponowane jest działanie:

- W kanale bazowym wyznaczenie charakterystycznych punktów w obwiedni spektrum sygnału (więcej punktów – dokładniejsza estymacja sygnału kosztem zwiększonej obliczeniowej czasochłonności).
- Adekwatny dobór odpowiednich punktów w każdym z kanałów w całym paśmie
- Estymacja zajętości metodą spektralnej korelacji

3.8 Radio kognitywne w zakresie WLAN. Propozycja organizacji sensingu

Nowsze wersje systemów WLAN oparte są na modulacji OFDM, stąd metody sensingu w indywidualnych terminalach należą do kategorii stosowanych w paśmie DTV. Różnica polega na zarządzaniu wynikami sensingu w ramach sieci kognitywnej współpracującej w tym przypadku z siecią WLAN systemu pierwotnego.

3.8.1 Prototyp kognitywnego radia w wersji NTT

W pracy [20] przedstawiono laboratoryjny prototyp sieci radia kognitywnego działającego w zakresie bezprzewodowych sieci komputerowych. Rolę pierwotnego użytkownika jak i aplikującego o dostęp systemu pełnią sieci WLAN: w przypadku pierwotnego użytkownika z jednym punktem dostępowym, w sieci wtórnego użytkownika z trzema punktami dostępowymi z udostępnionymi różnymi kanałami. Konfigurację systemu przedstawia szkic na rys. 11.

W odróżnieniu od koncepcji systemu IEEE 802.22, w której terminale końcowe stanowią stacjonarne układy nadawczo-odbiorcze, prototypowy system laboratorium NTT składa się z:

- Serwera mediów pełniącego rolę stacji bazowej systemu użytkownika wtórnego

W sieci pierwotnego użytkownika:

- Serwera transmitującego sygnały alarmowe
- Punktów dostępowych sieci WLAN połączonych z analizatorem spektrum
- Końcowych terminali zarówno dla sieci WLAN jak i sieci komórkowej

W sieci wtórnego użytkownika:

- Serwera kontroli procesu sensingu
- Punktów dostępowych sieci WLAN połączonych z analizatorami spektrum
- Bazy stacji telefonii komórkowej
- Końcowych terminali zarówno dla sieci WLAN jak i sieci komórkowej

Sygnałem użytecznym oraz wtórnym w eksperymencie była sygnał transmisji filmu.

Każda z stacji końcowych wtórnego użytkownika (laptop PC) wyposażona jest w kartę WLAN i telefon komórkowy oraz połączona z analizatorem spektrum informującym o wystąpieniu sygnału użytkownika pierwotnego. Odbiorniki połączone są bezprzewodowo z

punktami dostępowymi pracującymi na różnych kanałach. Zgodnie z proponowaną metodą wykrycie sygnału licencjonowanego przez jakikolwiek terminal powoduje sygnał poprzez bazę telefonicznej sieci komórkowej i transkoder (TAP – terminal adapter) sygnału telefonicznego (Ph) na sygnał sieci komputerowej (WLAN) do serwera sygnałów alarmu, który – po sprawdzeniu wiarygodności informacji – blokuje transmisję terminali zajętego kanału oraz wyłącza punkt dostępowy tego kanału. Wyłączone terminale zostają przełączone na kanał aktywnego punktu dostępowego.

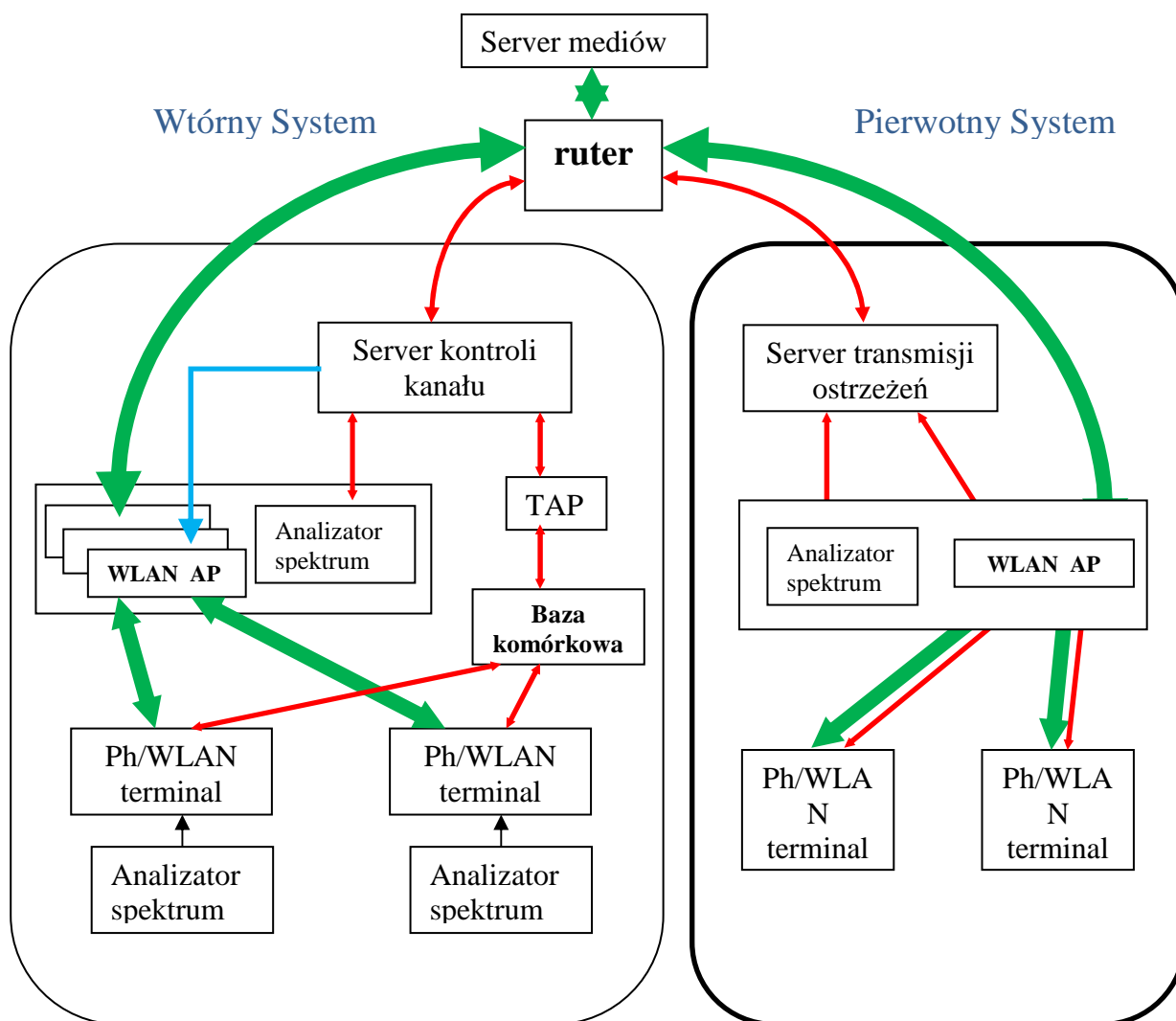
W procesie kontroli zajętości widma (sensingu), pełnionego przez analizatory widma, uczestniczą równolegle wszystkie stacje końcowe. Ocena zajętości widma podejmowana jest na podstawie wagowej sumy ocen poszczególnych terminali [20]:

$$S = w_1^a \cdot D_1^a + w_1^b \cdot D_1^b + \dots + w_N^m \cdot D_N^m + \dots + w_N^M \cdot D_N^M$$

gdzie D_n^m oznacza ocenę terminala 'n' według metody 'm'. Współczynniki wagowe w są funkcjami wzajemnych odległości między terminalami i parametrów analizatorów spektrum.

Decyzje co do zajętości spektrum podejmowane są na podstawie porównania sumarycznego wyniku S z ustaloną wartością progową w serwerze wtórnego użytkownika.



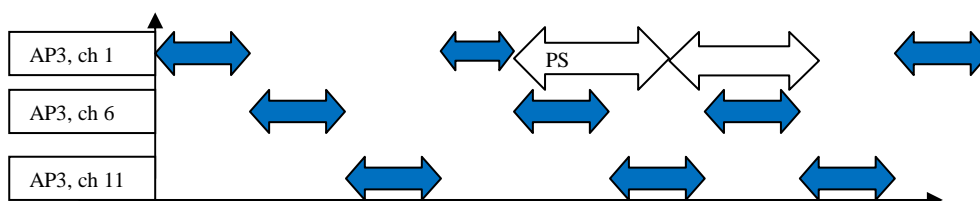


Rys. 11 Relacje podukładów w systemach pierwotnym i wtórnym radia kognitywnego w prototypowej sieci laboratorium NTT

Serwer kontroli kanału w sieci wtórnego użytkownika zarządza trzema podstawowymi funkcjami punktów dostępowych AP:

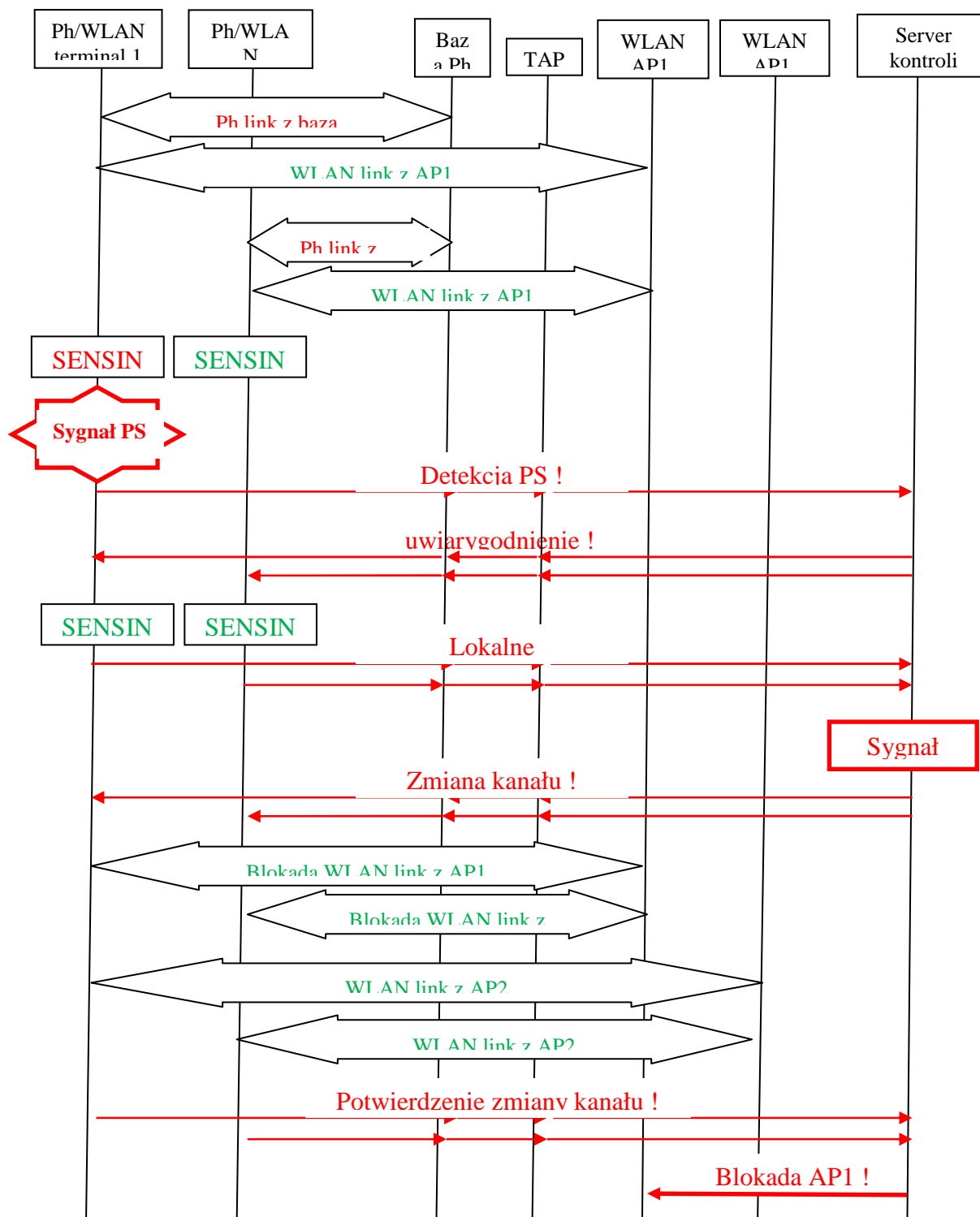
- Blokuje działanie AP z chwilą pojawienia się sygnału licencjonowanego w kanale
- Periodycznie kontroluje operacje sensingu w kanałach AP w celu nadzorowania wolnych kanałów pasma
- Steruje pracą terminali końcowych przełączając je do aktualnie wolnych punktów dostępowych

Realizację tych funkcji przedstawia Rys. 12.:



Rys. 12 Przykładowe zarządzanie operacjami punktu dostępowego

Sekwencję komunikowania i przełączania między układami radia ukazuje Rys. 13.

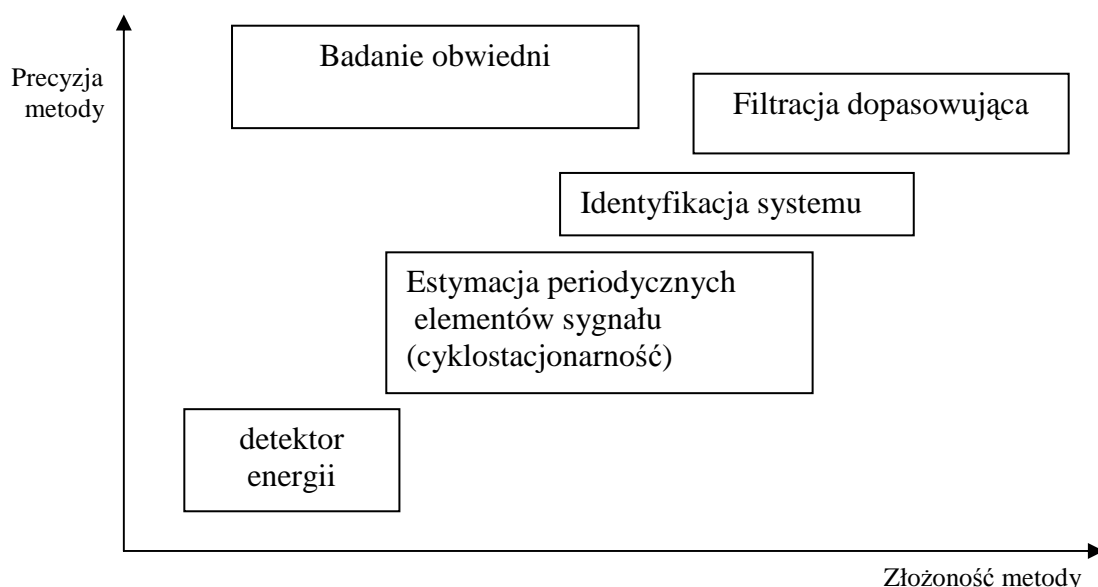


Rys. 13 Sekwencja działania systemu sieci radia kognitywnego.
Wersja NTT wg [20]

3.9 Wnioski

Badanie zajętości kanałów (sensing) jest podstawową funkcją radia kognitywnego warunkującą współużytkowanie wspólnego pasma częstotliwości przez licencjonowanego oraz wtórnego użytkownika przy zachowaniu gwarancji bezzakłóceńowej transmisji pierwotnego operatora. Funkcja ta jest przypisana wiążąco terminalom użytkownika aplikującego o przydział kanału.

Ilość publikacji dotyczących tematyki radia kognitywnego, a w tym przede wszystkim różnych metod i odmian algorytmów badania widma, jest liczona w tysiące. Pełny przegląd tych metod nie jest więc możliwy i żadna z znanych prac przeglądowych takiego zadania się nie podejmuje zwracając jedynie uwagę na podstawowe kategorie, w jakie można posegregować te metody. Relacje między tymi kategoriami przedstawia Rys. 14.



Rys. 14 Porównanie precyzji oraz złożoności obliczeniowej podstawowych kategorii sensingu

W prezentowanej pracy omówiono szczegółowo najczęściej spotykaną w praktycznych testach metodę detekcji energii promieniowania oraz algorytmy proponowane jako praktyczne rozwiązania dla systemu IEEE 802.22, prezentowane w ostatnich oryginalnych publikacjach

Proces kontroli zajętości poszczególnych kanałów oraz wyszukiwanie optymalnego kanału dla własnej transmisji zasadniczo nie wymaga komunikacji z operatorem pierwotnego sygnału. Jednak, jak pokazują wyniki prób z eksperymentalnymi układami (NTT w zakresie WLAN, pkt. 8.2) możliwość bezpośredniej interwencji i blokady transmisji użytkownika wtórnego

przez pierwotnego operatora w przypadku zakłócenia w aktywnym kanale istotnie zwiększa bezpieczeństwo transmisji licencjonowanej. Takie zabezpieczenie może być realizowane poprzez łącze niezależnego systemu (telefon komórkowy), lub w jednym z kanałów analizowanego pasma za pośrednictwem transkodera między systemami.

Osiągnięcie ostatecznego celu programu radia kognitywnego tj. wybór optymalnego pasma i kanału bez udziału użytkownika dla samoorganizującej się własnej sieci bezprzewodowej jest zadaniem rozpracowywanym w czołowych ośrodkach badawczych na świecie.

Publikacje [21], czy [22] ukazują aktualne trendy w tej dziedzinie. Połączenie funkcji radia kognitywnego oraz aplikacji adaptacyjnego przetwarzania sygnałów prowadzi do radia rekonfigurowanego, nie tylko badającego zajętość widma, ale rozpoznającego rodzaj sygnału i w oparciu o bibliotekę modulacji różnych typów sygnałów automatycznie konstruuje adekwatny demodulator oraz organizację wyższych warstw systemu w celu umożliwienia włączenia się do komunikacji.

3.10 Terminologia oraz akronimy

Primary user, incumband	users with higher priority or legacy rights on the usage of the of a specific part of the spectrum
Radio spectrum space	a theoretical hyperspace occupied by radio signals, which has dimensions of location, angle of arrival, frequency, time, and possibly others parameters of primary user signal
Secondary user	can exploit part of spectrum under condition of not causing interference to primary users
Spectrum opportunity	a band of frequencies that are not being used by the primary user at a particular time in a particular geographic area
Hyperspace = electrospace = transmission hyperspace = spectrum space	- indicated piece of spectrum with all its attributes
AC	- access point
BS	- base station
CBP	- coexistence beacon efficiency
CP	- cyclic prefix in OFDM symbol
CPE	- customer premises equipment
DSA	- dynamic spectrum access
DFH	- dynamic frequency hopping
DS	- downstream
FBMC	- filter bank multiple carrier
LMSC	- LAN/MAN Standard Committee
LTB	- listen-before-talk
LTR	- likelihood ratio test
MAC	- medium access control
MLME	- MAC layer management entities
NU	- Noise Uncertainty
PDP	- power delay profile

PFA	- probability of false alarm
ROC	- receiver operating characteristic
SAP	- service access point
SFD	- spectral feature detection
SME	- station management entity
SSF	- spectrum sensing function
SW	- sliding window
TAP	- terminal adapter
TDSC	- Time-Domain Symbol Cross-correlation
TVBD	- TV Band Device
TVWS	- TV White Space
UP	- upstream
UWB	- ultra-wideband system
WPAN	- Low Rate Wireless Personal Area Network
WRAN	- Wireless Regional Area Networks

3.11 Literatura do rozdziału 3

- [1] T. Yucek, H. Arslan, "A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications", IEEE Comm. Surveys 7 Tutorials, vol. 11, no. 1, 2009
- [2] J. Wang, M. Ghosh, K. Challapali, "Emerging Cognitive Radio Applications: A Survey", IEEE Communications Magazine, March 2011
- [3] S. J. Shellhammer, A. K. Sadek, W. Zhang, "Technical Challenges for Cognitive Radio in the TV White Space Spectrum", 2008
- [4] O. Grandalen, M. Lahteenoja, P. Gronlund, "Business case proposal for a Cognitive Radio Network based on Wireless Sensor Network", 2010
- [5] S. J. Shellhammer, "A Comparison of Geo-Location and Spectrum Sensing in Cognitive Radio", IEEE 2009
- [6] H. Urkowitz, "Energy Detection of Unknown Deterministic Signals", Proceedings of the IEEE, vol. 55., no. 4, April 1967
- [7] E. Axell, E. G. Larsson, "Optimal and Near-Optimal Spectrum Sensing of OFDM Signals in AWGN Channels", 2010 Int. Workshop on Cognitive Information Processing
- [8] V. Turunen, M. Kosunen, A. Huttunen, S. Kallioinen, P. Ikonen, A. Parssinen, J. Ryyanen, "Implementation of Cyclostationarity Feature Detector for Cognitive Radios", Proc. of the 4th Intern. Conf. on CROWNCOM 2009
- [9] D. Danev, "On Signal Detection Techniques for the DVB-T Standard", Proc. 4-th Intern. Symposium on Communications, Control and Signal Processing, ISCCSP 2010, IIMASSOL, Cyprus, 3 – 5 March 2010
- [10] H-S, Chen, W. Gao, D. G. Daut, "Spectrum Sensing for OFDM Systems Employing Pilot Tones and Application to DVB-T OFDM" Proc. ICC, 2008
- [11] H. Cao, S. Daoud, A. Wilzeck, T. Kaiser, "Practical Issues in Spectrum Sensing for Multi-Carrier Systems Employing Pilot Tones", Int. Signal Conf. 2010
- [12] Z. Quan, W. Zhang, S.J. Shallhammer, A. H. Sayed, "Optimal Spectral Feature Detection for Spectrum Sensing at Very Low SNR", IEEE Trans. on Comm., vol. 59, no. 1, Jan. 2011
- [13] D. Danev, E. Axell, E. G. Larsson, "Spectrum sensing methods for detection of DVB-T signals in AWGN and fading channels", IEEE 21st International Symposium On Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2010
- [14] Z. Chen, N. Guo, R. C. Qiu, "Demonstration of Real-time Spectrum Sensing for Cognitive Radio", The 2010 Military Communications Conference – Unclassified Program - Waveforms and Signal Processing Track, 2010

- [15] W. Zhang, A. K. Sadek, C. Shen, S. J. Shellhammer, "Adaptive Spectrum Sensing", 2009
- [16] C. R. Stevenson, G. Chouinard, Z. Lei, W. Hu, S. J. Shellhammer, W. Caldwell, "IEEE 802.22: The First Cognitive Radio Wireless Regional Area Network Standard", IEEE Comm. Mag. , Jan. 2009
- [17] S. J. Shellhammer, "Spectrum sensing in IEEE 802.22", Cognitive Info. Processing, June 2008
- [18] IEEE Standard 802.22-2011, "IEEE Standard for Wireless Regional Area Networks , Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications; Policies and procedures for operation in the TV Bands", Annex C (informative)
- [19] S. Ahmad, A. Shahid, R. Ahmad, A. Akram, M. Nasim, "Opportunistic Spectrum Access in OFDMA Systems", Second Int. Conf. on Computer and Network Technology, 2010
- [20] M. Matsui, K. Akabane, H. Shiba, K. Uehara, "Prototype of a Cognitive Radio System with Cooperative Sensing and Interference Alerting ", NTT Network Innovation Laboratories, 2008
- [21] A. Recio, J. A. Suris, P. Athanas, "Automatic Modulation Classification for Rapid Radio Deployment", IEEE 2010
- [22] A. Dejonghe, S. Pollin, L. Hollevoet, F. Naessens, E. Lopez, P. Raghavan, A. Bourdoux, P. Van Wesemael, J. Ryckaert, J. Craninckx, L. der Perre, "Versatile spectrum sensing on mobile devices ?", IEEE DySPAN, 2010

4. Wyznaczenie dostępnych kanałów radiowych w paśmie telewizyjnym w Polsce

Wprowadzenie

Zakres częstotliwości 470 – 790 MHz w przeważającej większości wykorzystywany jest przez telewizję naziemną jako służbę pierwszej ważności. W chwili obecnej przez telewizję analogową i cyfrową, a w najbliższej przyszłości wyłącznie przez naziemną telewizję cyfrową DVB-T. W wielu krajach europejskich naziemna telewizja analogowa została już wyłączona, w Polsce nastąpi to w połowie roku 2013.

W roku 2006 podczas Regionalnej Konferencji ITU-R RRC06 został zatwierdzony Plan cyfrowy GE06. Przy wykorzystaniu Planu GE06 możliwe jest opracowanie kryteriów ochrony krajowych sieci DVB-T, oraz ochrony emisji DVB-T w krajach sąsiednich przy granicach Polski. Następnie możliwe jest wykorzystanie dostępnych zasobów częstotliwości, białych przestrzeni (WS - white space) do wykorzystania w służbie drugiej ważności przez urządzenia WSD (white space device) pracujące z wykorzystaniem technik radia kognitywnego.

Plan GE06

Plan cyfrowy GE06 zawiera wpisy w postaci obszarów rezerwacji (allotments) i przydziałów częstotliwości (assignments). Obszary rezerwacji wskazują na obszar geograficzny i związany z nim kanał częstotliwości, który może być wykorzystywany na tym obszarze. Przydziały częstotliwości zawierają parametry konkretnej stacji, która może być uruchamiana o ile jest kompatybilna z siecią analogową (informacja o tym znajduje się w Planie GE06). Implementacja obszarów rezerwacji oznacza konieczność zaplanowania konkretnych sieci stacji w granicach obszaru rezerwacji i sprawdzenia czy dana rzeczywista sieć generuje mniejsze zakłócenia od tzw. sieci odniesienia (reference network) opisanych w materiałach Porozumienia GE06 wraz z podaniem ich szczegółowych parametrów. Sieci odniesienia są to sieci „wirtualne”, symulujące przyszłą sieć DVB-T, wykorzystywane do wykonywania analiz kompatybilności elektromagnetycznej obszarów rezerwacji, w sytuacji braku rzeczywistych, pracujących stacji telewizji cyfrowej. Procedura orientacji sieci odniesienia i metody wyznaczania zakłóceń interferencyjnych opisane są w materiałach GE06 [1]. Implementacja przydziału częstotliwości oznacza uruchomienie danej stacji z parametrami wpisanymi do Planu.

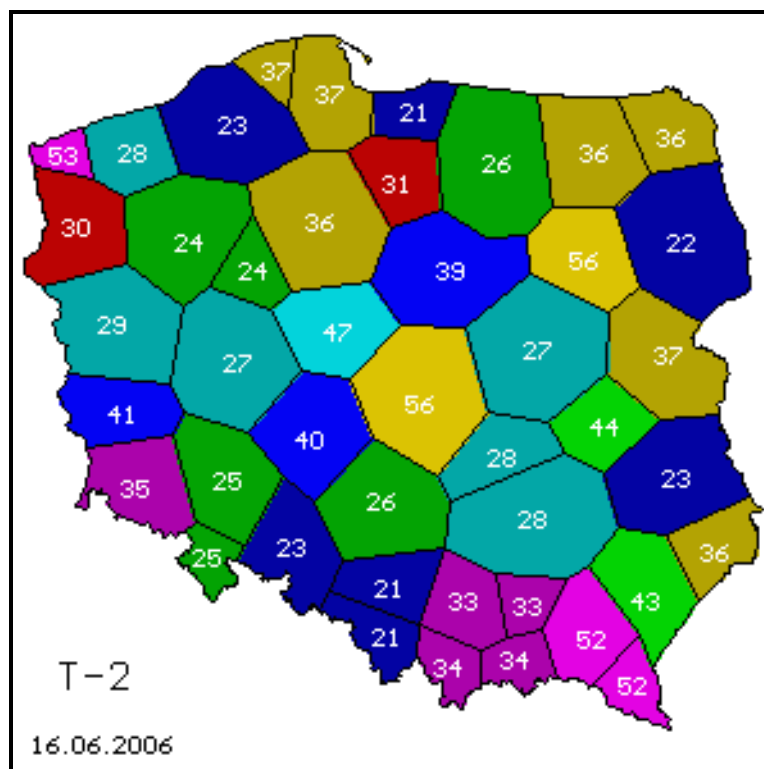
O zasięgu użytkowym stacji DVB-T decydują przede wszystkim wymagane minimalne poziomy natężenia pola sygnału użytkowego i współczynniki ochronne. Są one definiowane dla specyficznych warunków odbioru, co oznacza, iż każdy rodzaj odbioru charakteryzuje inny zasięg użytkowy. W przypadku telewizji cyfrowej DVB-T występują następujące poziomy natężenia pola sygnału użytecznego dla różnych tzw. planistycznych konfiguracji odniesienia RPC1, RPC2, RPC3, zdefiniowanych w materiałach GE06 [1]:

Tabela 1 Konfiguracje planistyczne dla DVB-T zgodnie z GE06

Typ RPC	RPC 1	RPC 2	RPC 3
Procent pokrycia lokalizacji	95%	95%	95%
C/N odniesienia (dB)	21	19	17
Referencyjne $(E_{med})_{ref}$ (dB(μ V/m)) dla $f_r = 200$ MHz	50	67	76
Referencyjne $(E_{med})_{ref}$ (dB(μ V/m)) dla $f_r = 650$ MHz	56	78	88
$(E_{med})_{ref}$: Wartość minimalnej mediany natężenia pola przy częstotliwości odniesienia służąca do planowania, dla innych częstotliwości korekta zgodnie z GE06 RPC 1: RPC dla odbioru stacjonarnego RPC 2: RPC dla odbioru przenośnego na zewnątrz budynków lub odbioru przenośnego wewnątrz budynków niskiej jakości lub dla odbioru ruchomego RPC 3: RPC dla odbioru przenośnego wewnątrz budynku wysokiej jakości			

Wartości te wykorzystano w analizach kompatybilności sieci podczas opracowywania Planu GE06. Są to wartości „wirtualne” (sztuczne), w tym sensie, iż nie zakładają one żadnej konkretnej realizacji sieci, ale stanowią pewne szacunkowe przybliżenie w sytuacji, gdy nie jest zdefiniowana struktura sieci i tryb pracy systemu DVB-T. Polska i kraje sąsiednie założyły wykorzystywanie konfiguracji planistycznej RPC2.

Zgodnie z Planem GE06 Polska uzyskała 7 warstw (pokryć) obszarów rezerwacji dla DVB-T w zakresie 470 – 862 MHz. Przy czym po przeznaczeniu zakresu 790 – 862 MHz dla systemów mobilnych (dywidenda cyfrowa), do wykorzystania przez naziemną telewizję cyfrową pozostało 6 warstw. Na rysunku 1 przedstawiono jedną z warstw Planu GE06 dla Polski.



Rys. 1 Jedna z warstw Planu GE06 dla Polski składająca się z obszarów rezerwacji (allotments)

4.1 Wyznaczenie dostępnych kanałów radiowych w Polsce

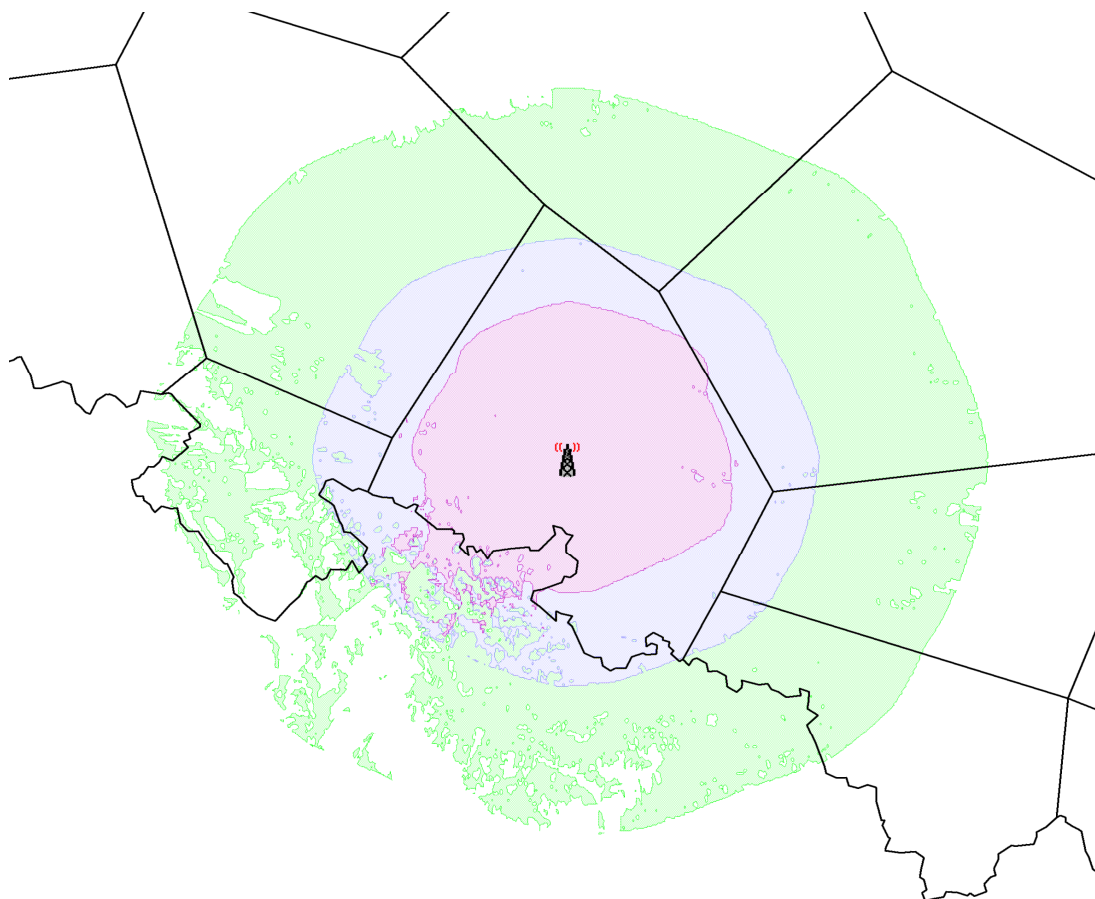
4.1.1 Ochrona rzeczywistych zasięgów DVB-T

Zasięg stacji (czy sieci jednoczęstotliwościowych) naziemnej telewizji cyfrowej DVB-T w Europie w większości przypadków jest ograniczony zasięgami interferencyjnymi, a nie poziomem szumów bazujących na minimalnym poziomie natężenia pola (E_{min}) wykorzystywanym do planowania naziemnej telewizji cyfrowej. Zasięgi stacji DVB-T są w dużym stopniu ograniczone przez interferencje pochodzące od innych stacji DVB-T, na które zgodzono się podczas tworzenia Planu GE06.

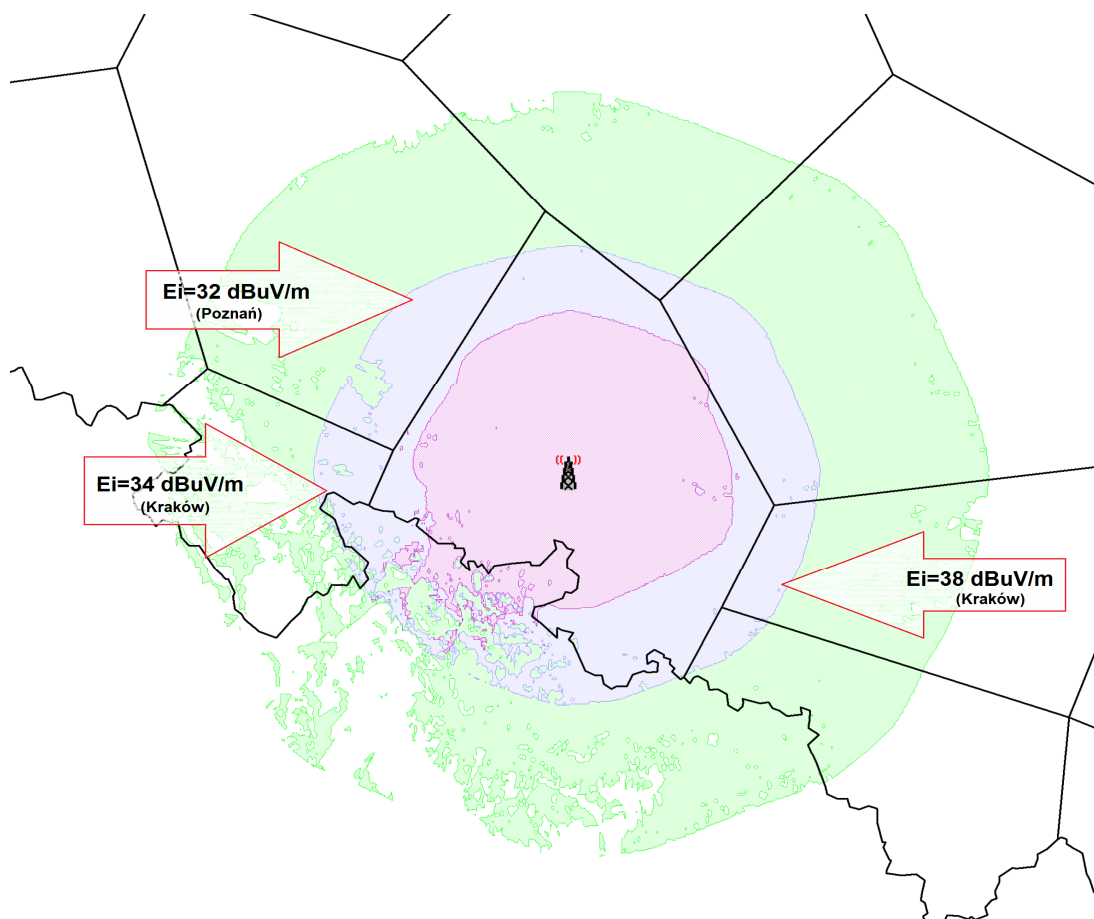
Na rysunku 1 przedstawiono zasięg stacji Opole, kanał 23, z Planu GE06. Kolorem niebieskim oznaczono zasięg bezinterferencyjny stacji ograniczony jedynie szumami, natomiast kolorem fioletowym przedstawiono realny zasięg interferencyjny, który został ograniczony zakłóceniami od innych stacji z Planu GE06. Kolor zielony, odpowiada natomiast wymaganemu poziomowi ochronnemu przedstawionemu w Raporcie ECC 159 dla urządzeń WSD ($h_{ant} = 30$ m, $ERP = 36$ dBm).

Rys. 2 wskazuje kilka wartości natężenia pola stacji zakłócających na skraju zasięgu, które ograniczają zasięg stacji Opole.

Wymagany poziom ochronny przedstawiony w Raporcie ECC 159 [2] jest bardzo restrykcyjny. Jest on znacznie wyższy niż poziom wynikający z zasięgu stacji DVB-T ograniczonej szumami, oraz oczywiście zasięgu ograniczonego interferencjami od innych stacji DVB-T.



Rys. 2 Rzeczywisty zasięg stacji DVB-T (Opole k.23) z uwzględnieniem zakłóceń od innych stacji DVB-T (kolor fioletowy - zasięg ograniczony zakłóceniami (~60-65 dB μ V/m), kolor niebieski - zasięg bezinterferencyjny (E_{\min} = ~56 dB μ V/m), kolor zielony - wymagany poziom ochronny wg ECC Raport 159 WSD (dla h_{ant} =30m, ERP=36dBm)



Rys. 3 Zasięg stacji DVB-T (Opole k.23), E_i - poziomy zakłóceń od stacji DVB-T GE06

4.1.2 Metoda wyznaczania białych przestrzeni widma

W podpunkcie przedstawiono metodologię wyznaczania białych przestrzeni widma zakresu 470 – 790 MHz dostępnego dla urządzeń WSD.

4.1.2.1 Metoda wyznaczania białych przestrzeni widma zapewniająca ochronę Planu GE06

Treść rozdziału dostępna jest w IŁ o/Wrocław ul. Swojczycka 38, 51-501 Wrocław

4.1.2.2 Metoda wyznaczania białych przestrzeni widma zapewniająca ochronę rzeczywistej sieci stacji DVB-T

Treść rozdziału dostępna jest w IŁ o/Wrocław ul. Swojczycka 38, 51-501 Wrocław

4.2 Wyniki analiz dostępności kanałów radiowych w Polsce

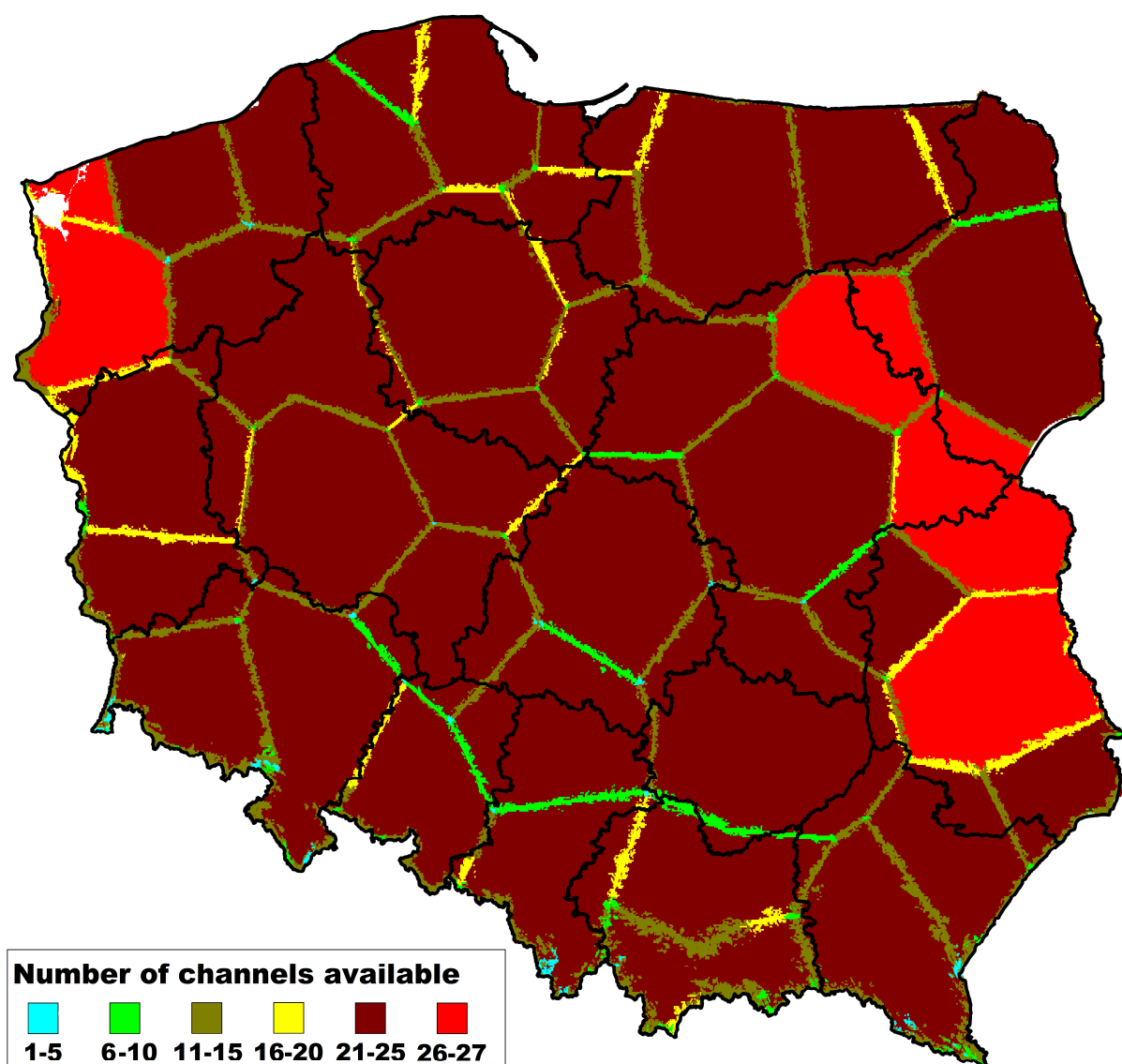
W kolejnych podpunktach przedstawiono wyniki analiz dostępności białych przestrzeni widma dla urządzeń WSD w Polsce. Analizy zostały wykonane dla trzech typów emisji urządzeń WSD:

- Stacja bazowa BS: wysokość zawieszenia anteny 30 m n.p.t, emisja z mocą ERP 36 dBm;
- Urządzenie konsumenckie CPE w odbiorze stacjonarnym: wysokość zawieszenia anteny 10 m n.p.t., emisja z mocą ERP 30 dBm;
- Urządzenie konsumenckie CPE w odbiorze przenośnym: wysokość zawieszenia anteny 1.5 m n.p.t., emisja z mocą ERP 20 dBm.

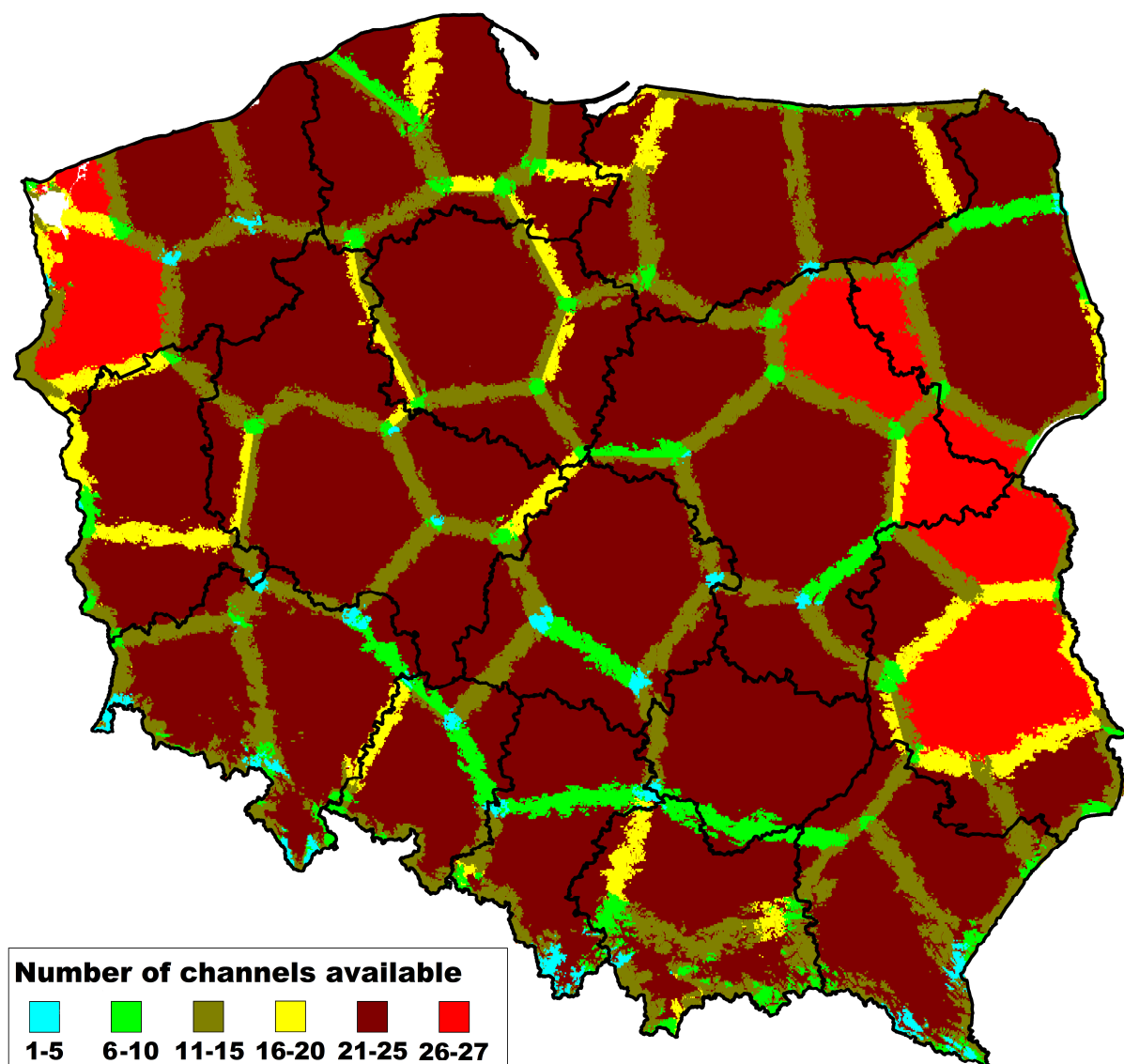
W analizach wyznaczano dostępność kanałów telewizyjnych z pasma 470 – 790 MHz, na obszarze całego kraju w siatce ok. 600000 punktów, rozmieszczonych w siatce 1 km x 1km.

4.2.1 Wyniki analiz dostępności kanałów radiowych dla ochrony obszarów rezerwacji GE06

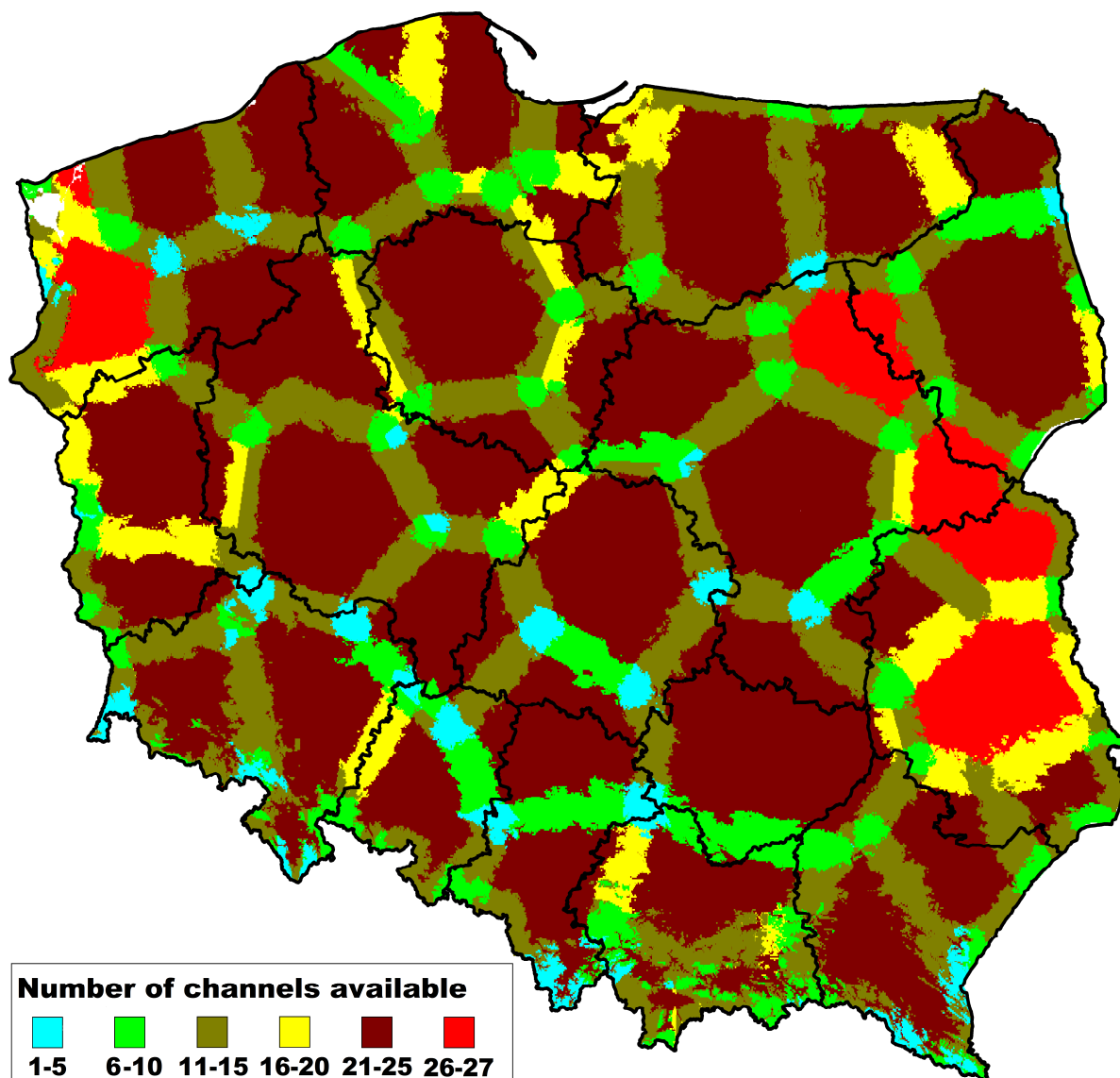
Rysunki przedstawiają wyniki analiz dostępności kanałów radiowych pasma telewizyjnego przy założeniu ochrony obszarów rezerwacji z Planu GE06. Na poszczególnych rysunkach kolorami oznaczono obszary białych przestrzeni widma pasma TV. Dany kolor obejmuje ilość dostępnych kanałów zgodnie z legendą przedstawioną na każdym z rysunków.



Rys. 4 Wyniki analiz dostępności białych przestrzeni widma, CPE typ przenośny, wys. zawieszenia anteny 1.5 m n.p.t., ERP 20 dBm



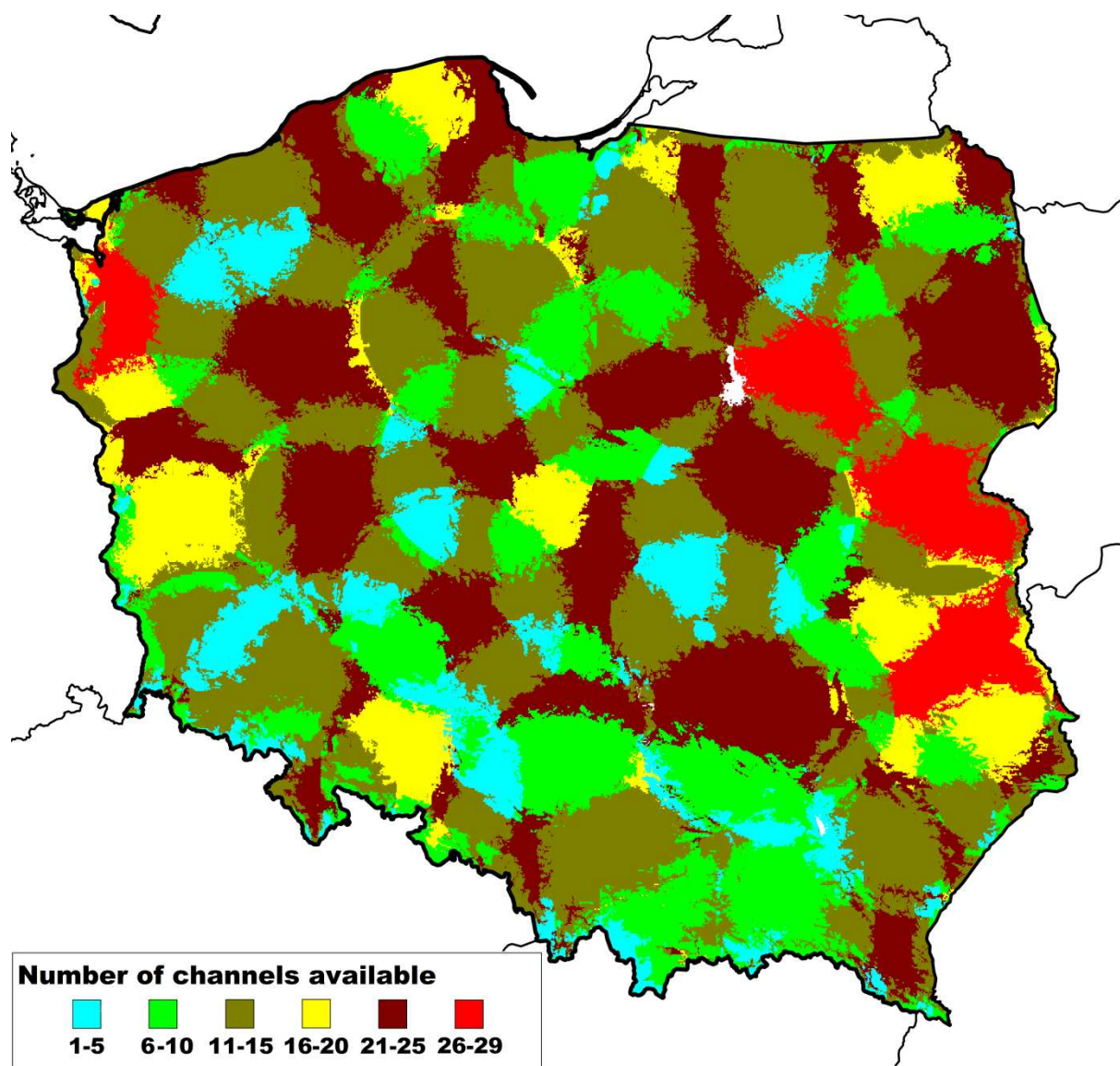
Rys. 5 Wyniki analiz dostępności białych przestrzeni widma, CPE typ stacjonarny, wys. zawieszenia anteny 10 m n.p.t., ERP 30 dBm



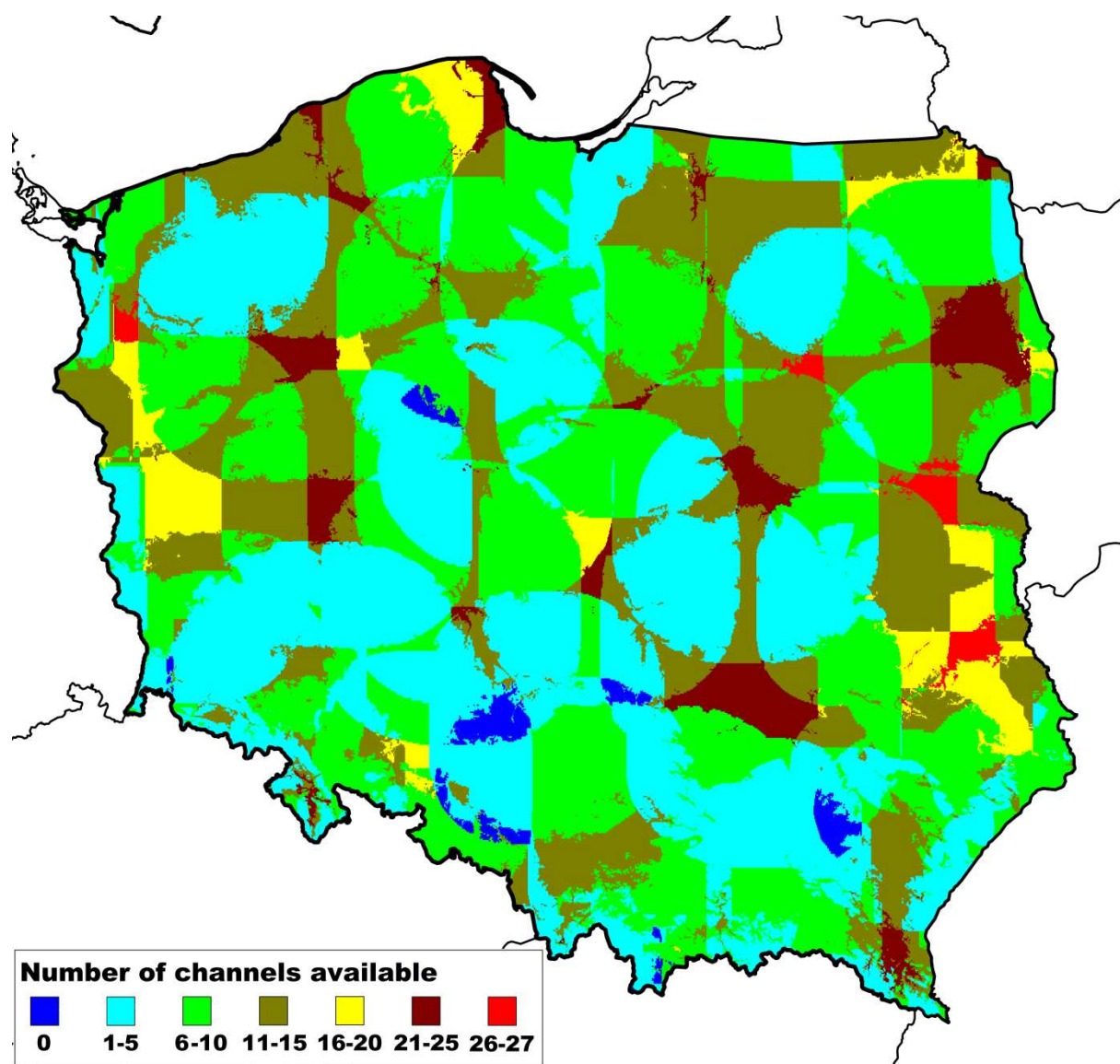
Rys. 6 Wyniki analiz dostępności białych przestrzeni widma, BS, wys. zawieszenia anteny 30 m n.p.t., ERP 36 dBm

4.2.2 Wyniki analiz dostępności kanałów radiowych z uwzględnieniem rzeczywistych zasięgów sieci DVB-T

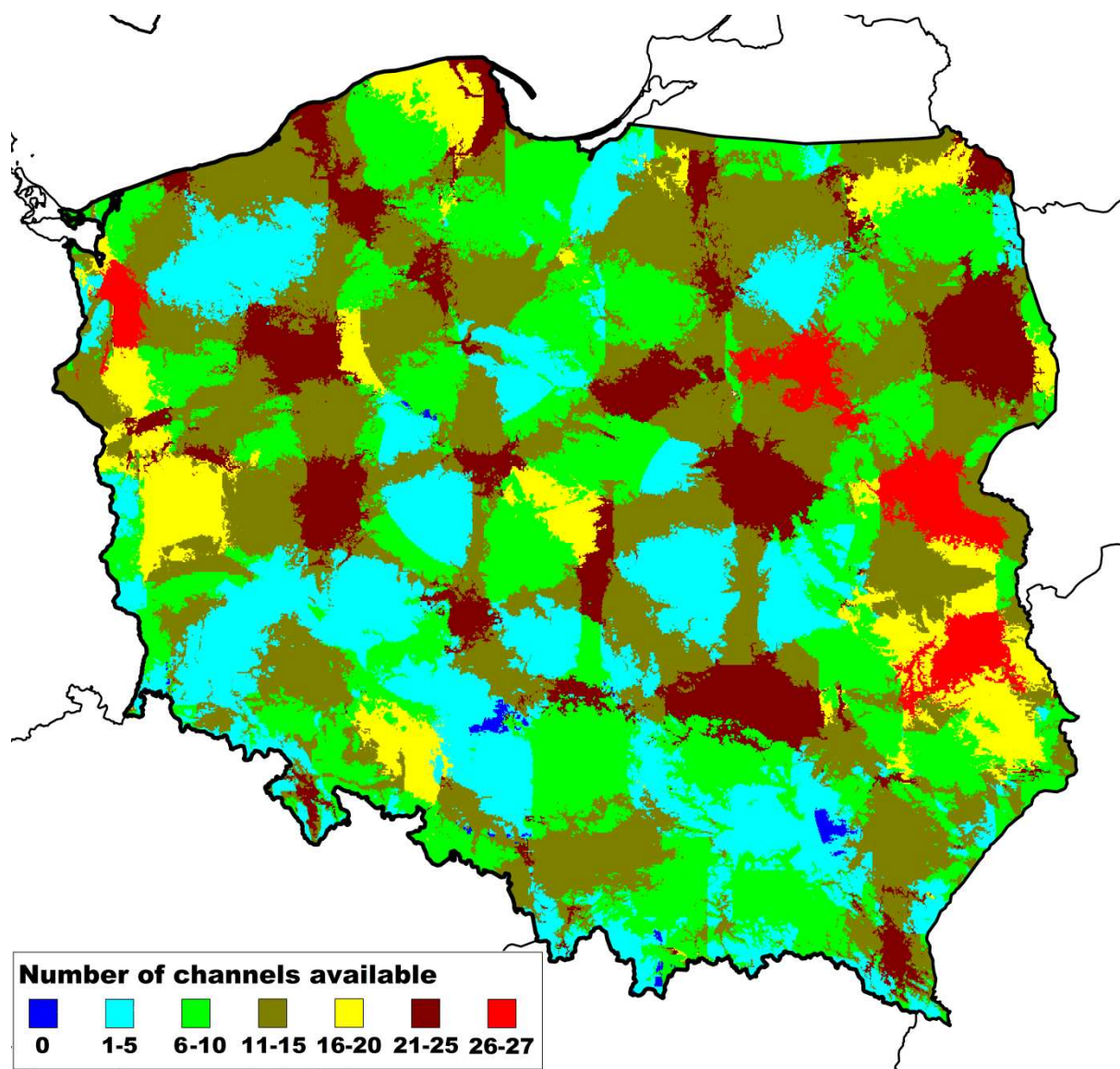
Rysunki przedstawiają wyniki analiz dostępności kanałów radiowych pasma telewizyjnego przy założeniu ochrony rzeczywistych zasięgów bezinterferencyjnych stacji DVB-T. Na poszczególnych rysunkach kolorami oznaczono obszary białych przestrzeni widma pasma TV. Dany kolor obejmuje ilość dostępnych kanałów zgodnie z legendą przedstawioną na każdym z rysunków.



Rys. 7 Wyniki analiz dostępności białych przestrzeni widma, CPE typ przenośny, wys. zawieszenia anteny 1.5 m n.p.t., ERP 20 dBm



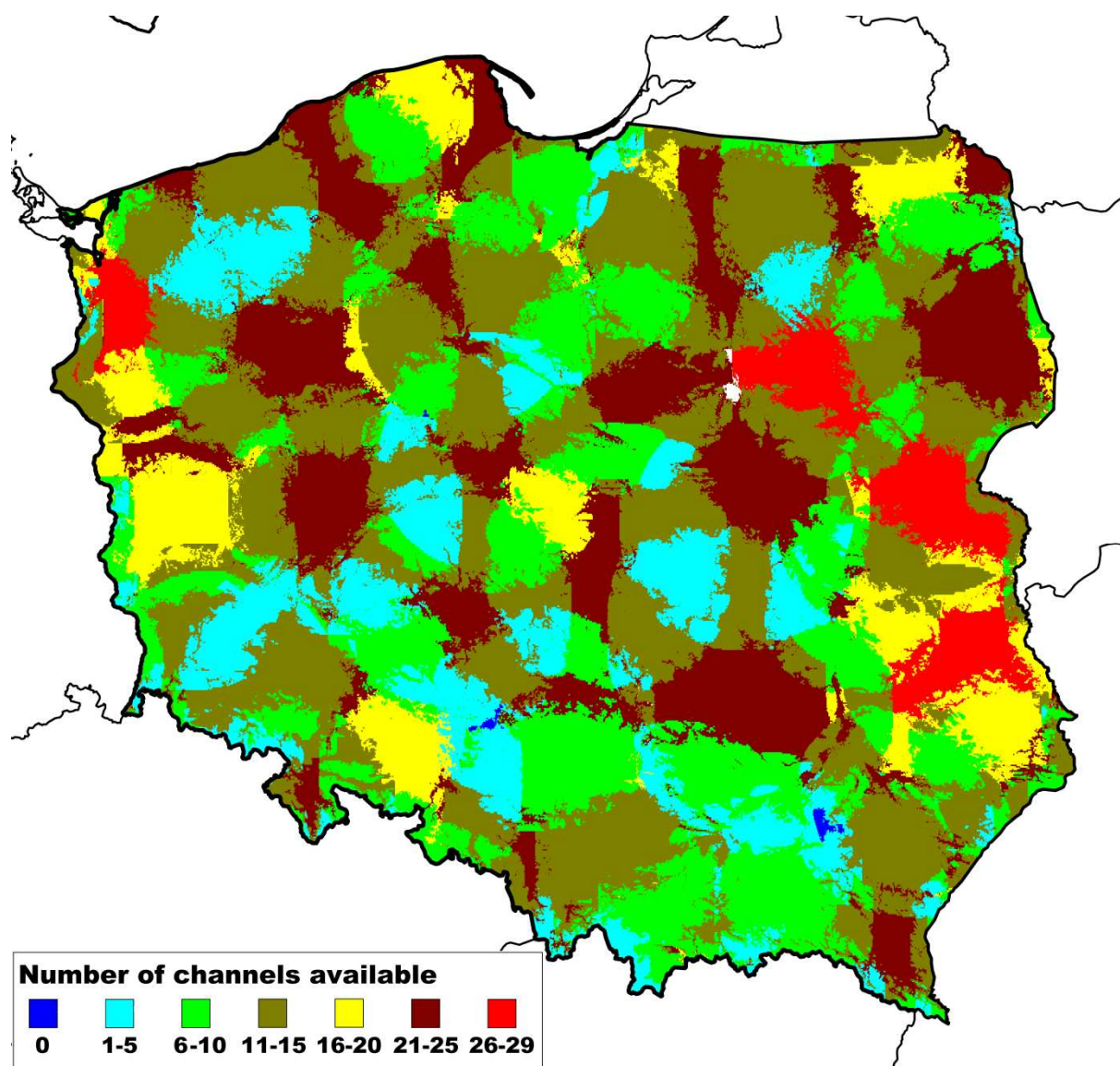
Rys. 8 Wyniki analiz dostępności białych przestrzeni widma, CPE typ stacjonarny, wys. zawieszenia anteny 10 m n.p.t., ERP 20 dBm



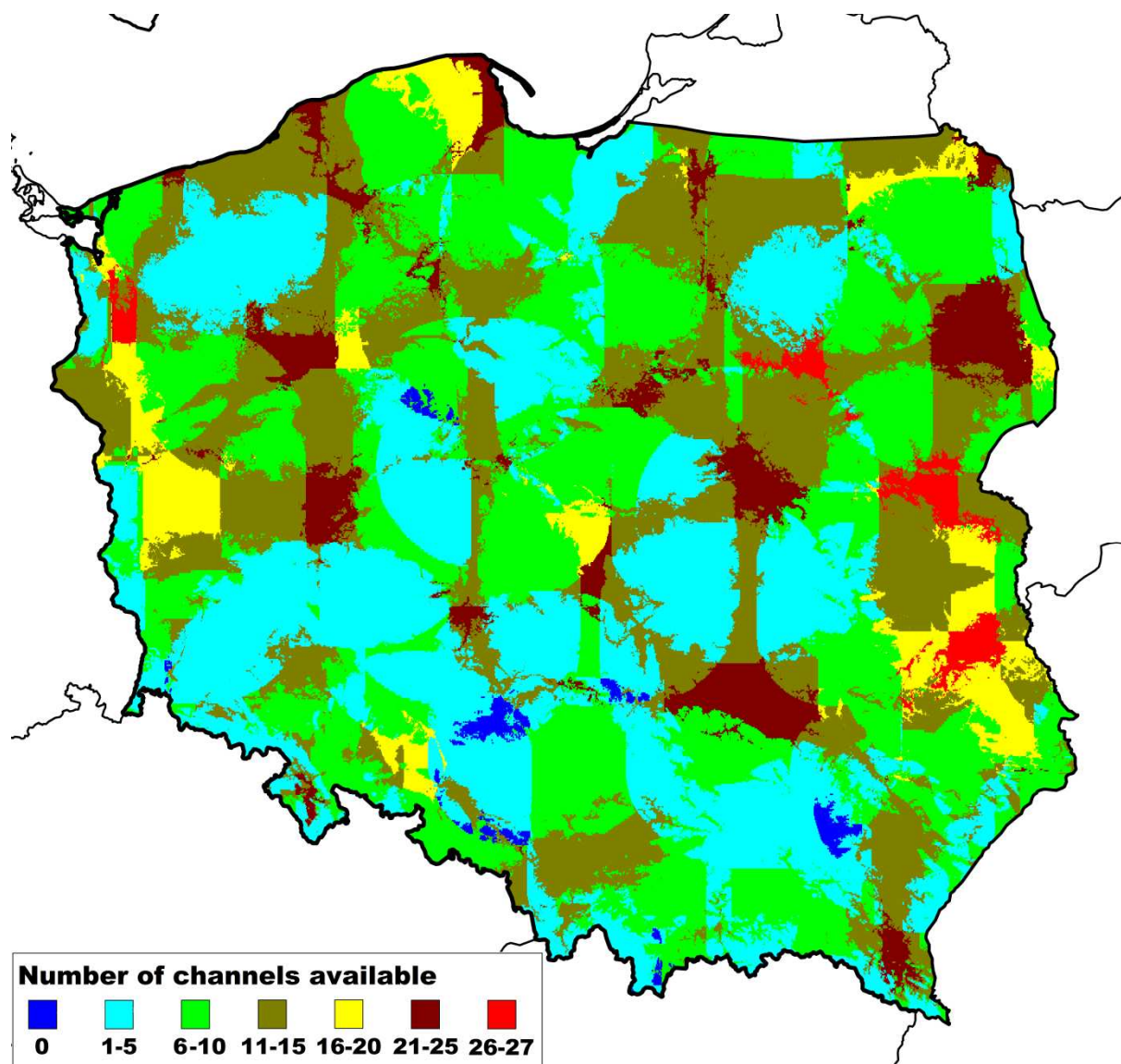
Rys. 9 Wyniki analiz dostępności białych przestrzeni widma, BS, wys. zawieszenia anteny 30 m n.p.t., ERP 36 dBm

4.2.3 Wyniki analiz dostępności kanałów radiowych z uwzględnieniem rzeczywistych zasięgów sieci DVB-T zgodnie z Raportem ECC 159.

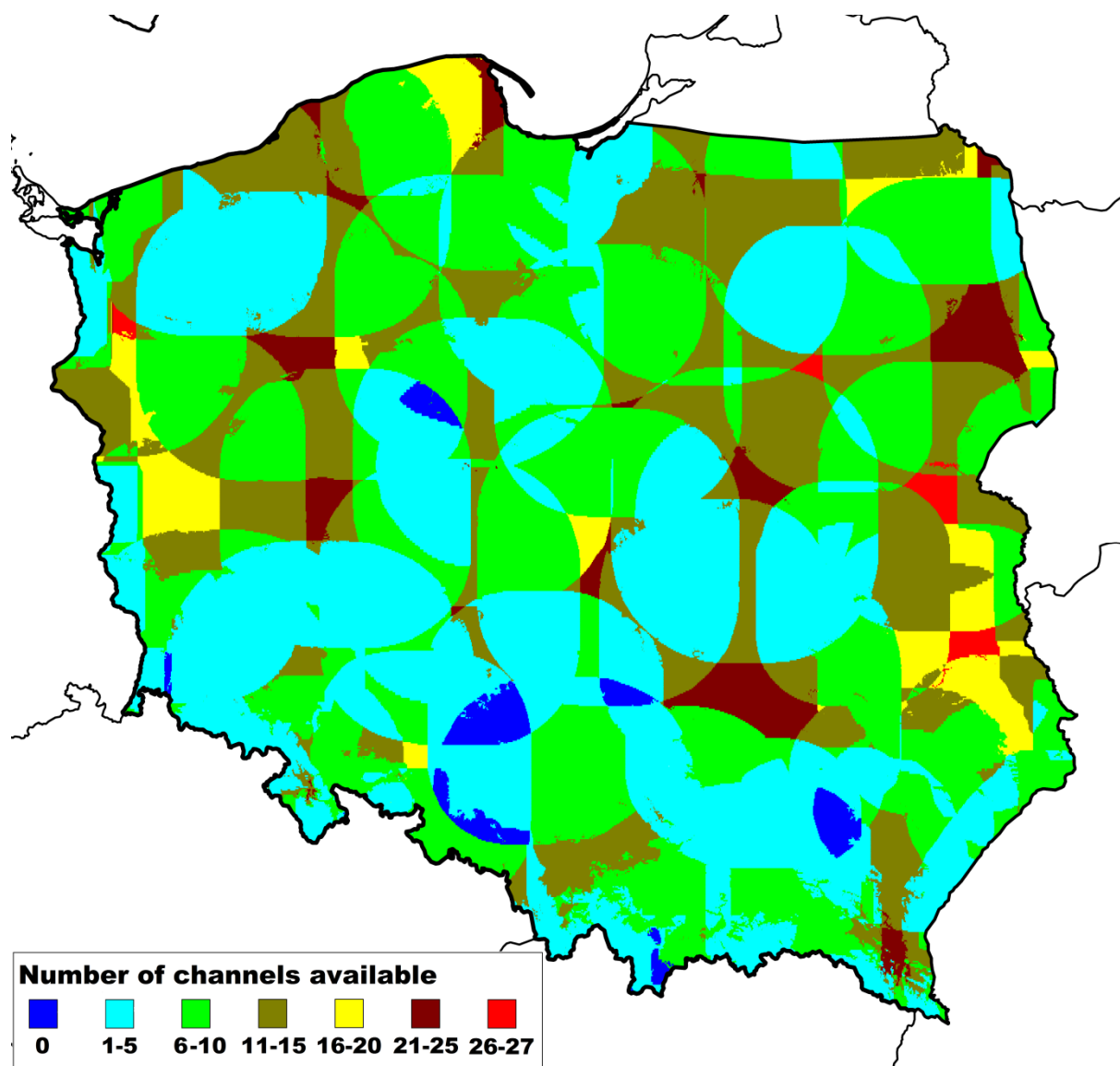
Rysunki przedstawiają wyniki analiz dostępności kanałów radiowych pasma telewizyjnego przy założeniu ochrony rzeczywistych zasięgów stacji DVB-T zgodnie z warunkami zawartymi w Raporcie ECC 159 [2]. Zgodnie z Raportem zakłócenia do stacji telewizyjnych DVB-T nie mogą być większe niż takie, które powodują ograniczenie zasięgu stacji DVB-T o 0.1% prawdopodobieństwa lokalizacji, tj. do 94,9% prawdopodobieństwa lokalizacji dla emisji DVB-T. Na poszczególnych rysunkach kolorami oznaczono obszary białych przestrzeni widma pasma TV. Dany kolor obejmuje ilość dostępnych kanałów zgodnie z legendą przedstawioną na każdym z rysunków.



Rys. 10 Wyniki analiz dostępności białych przestrzeni widma, CPE typ przenośny, wys. zawieszenia anteny 1.5 m n.p.t., ERP 20 dBm



Rys. 11 Wyniki analiz dostępności białych przestrzeni widma, CPE typ stacjonarny, wys. zawieszenia anteny 10 m n.p.t., ERP 20 dBm



Rys. 12 Wyniki analiz dostępności białych przestrzeni widma, BS, wys. zawieszenia anteny 30 m n.p.t., ERP 36 dBm

4.3 Podsumowanie

Pasmo telewizyjne zakresu 470 790 MHz jest obecnie jednym z głównych kandydujących pasm, w których wprowadzenie urządzeń wykorzystujących technikę radia kognitywnego jest analizowane i rokuje duże nadzieje na wdrożenie. Obecnie w Europie trwają intensywne prace, mające za zadanie określić warunki, na jakich pasmo telewizyjne będzie mogło być wykorzystywane przez urządzenia WSD, trwają też prace nad standaryzacją urządzeń w tym zakresie częstotliwości.

W niniejszej pracy przedstawiono opracowaną w IŁ metodologię oraz wyniki analiz białych przestrzeni widma w postaci map obszarów Polski z określoną ilością dostępnych kanałów telewizyjnych, zależnie od przyjętych wariantów ochrony emisji naziemnej telewizji DVB-T i parametrów urządzeń WSD. Szczegółowe wyniki opracowano dla każdego punktu kraju. Wyniki tych analiz mogą zostać wykorzystane przy tworzeniu np. baz geolokalizacyjnych stosowanych dla systemów radia kognitywnego na terenie Polski.

Otrzymane wyniki analiz dostępności białych przestrzeni widma dla warunków zdefiniowanych w aktualnym Raporcie 159 ECC wskazują, że są one rygorystyczne i zapewniają przesadną ochronę emisji stacji telewizyjnych (dopuszczalne poziomy zakłóceń są wielokrotnie mniejsze od istniejących w rzeczywistości zakłóceń pochodzących od innych stacji TV). Proponowane w niniejszej pracy podejście alternatywne uelastycznia metodologię analiz urealniając dopuszczalne poziomy zakłóceń. Możliwe jest także dodatkowo szczegółowe analizowanie zasięgów interferencyjnych (uwzględniających zakłócenia od innych stacji) – co również wpływa na ocenę możliwości widmowych pasm telewizyjnych i jest przedmiotem dalszych analiz. Wyniki wstępnych analiz są obiecujące i wskazują na duży potencjał systemów CR w Polsce w pasmach TV. W przyszłości planowane jest ich zweryfikowanie eksperymentalne.

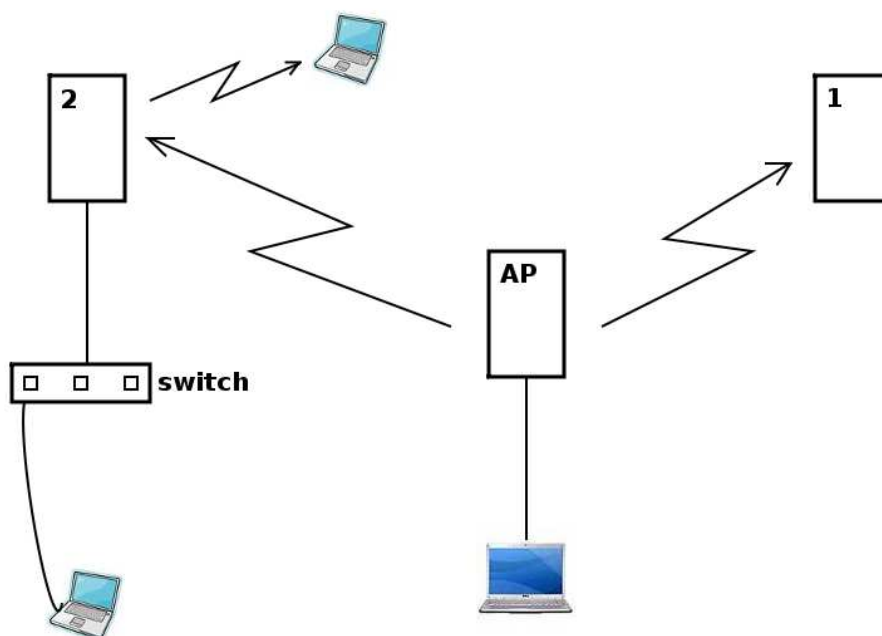
4.4 Literatura do rozdziału 4

- [1] *Final Acts of the Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174-230 MHz and 470-862 MHz (RRC-06)*, Genewa, June, 2006;
- [2] ECC REPORT 159, Technical and operational requirements for the possible operation of cognitive radio systems in the “White spaces” of the frequency band 470-790 MHz, Cardiff, January 2011;

5. Instalacja modelowa i pomiary sieci wykorzystujące elementy radia kognitywnego

5.1 Instalacja modelowa dla radia kognitywnego

W Laboratorium Badań EMC zbudowana została instalacja modelowa dla badań związanych z działaniem radia kognitywnego. Zgodnie z założeniami pracy do zbudowania modelu wytypowano elementy sieci testowej pracującej na bazie WiFi opracowane przez Communications Research Centre Canada (CRC) w ramach projektu CORAL. Część radiowa systemu jest oparta na standardzie 802.11 i może pracować w paśmie 2,4 lub 5 GHz, jednak ze względu na wbudowany analizator widma pracujący w zakresie 2,4 – 2,5 GHz cały zakres modelu ograniczony został do pasma 2,4 GHz i w tym paśmie testowana była kognitywność systemu – algorytmu przełączania i sterowania mocą. Schemat blokowy zbudowanej instalacji modelowej przedstawiono na rysunku poniżej, gdzie 1 i 2 to terminale klienckie, AP – access point, do którego przyłączony jest komputer zarządzający kognitywnością (z zainstalowanym oprogramowaniem zawierającym silnik kognitywny). Pozostałe dwa komputery widoczne na rysunku to odbiorcy przyłączeni do sieci kognitywnej.



Rys. 1 Schemat blokowy instalacji modelowej radia kognitywnego

5.2 Platforma testowa oprogramowania dla instalacji modelowej radia kognitywnego

Zestawiono platformę testową dla badań związanych z działaniem radia kognitywnego opartą na implementacji odpowiednio zmodyfikowanego oprogramowania elementów radiowych sieci (poprzez zastosowanie modyfikacji oprogramowania routerów za pomocą alternatywnego oprogramowania OpenWRT Linux kernel version 2.6.26) oraz poprzez wykorzystanie zastosowanego w zestawie CRC-CORAL przygotowanym przez CRC silnika kognitywnego – oprogramowania sieciowego zarządzającego kognitywnością, zainstalowanego na komputerze. Oprogramowanie sieciowe, dla którego można zadawać różne scenariusze realizacji kognitywności systemu odpowiednio steruje systemem i zmianami np. mocy lub częstotliwości pracy w zależności od zmieniających się warunków w paśmie pracy urządzeń, w zależności od wcześniej określonego scenariusza kognitywności.

Zbudowana platforma testowa ma następujące cechy i funkcje:

- Poszczególnym elementom części radiowej (access pointom i klientom) przypisywane są szczeliny czasowe, w których mogą pracować (co najmniej połowa szczelin czasowych jest przeznaczona dla access pointa). Przypisane szczeliny określone są w taki sposób aby elementy części radiowej wzajemnie nie zakłócały się. Sieć pracuje wtedy z protokołem CSMA i możliwe jest przypisanie 50 szczelin czasowych, w których określa się dla każdego urządzenia czy w tym określonym slocie czasowym urządzenie nadaje czy nasłuchuje. Przydział szczelin czasowych nie eliminuje wpływu zaburzeń pojawiających się w paśmie pracy systemu kognitywnego, zaburzenia te mogą wpłynąć na system.
- Przy pracy w trybie CSMA/SA, gdy prowadzona jest obserwacja widma poprzez analizator, jest możliwe aby terminal pracował, pomimo występujących zaburzeń, w ściśle określonych szczelinach czasowych. Wówczas można wyeliminować częstotliwości (zakresy częstotliwości), dla których w paśmie pracy nie będzie prowadzona transmisja.
- Dzięki dołączanym modułom GPS możliwe jest określenie położenia i czasu. Dokładny czas pozwala na zsynchronizowane zajmowanie szczelin czasowych, szczególnie w przypadku pracy systemu na dużym obszarze.
- Możliwa jest również synchronizacja niewykorzystująca GPS. Taka konfiguracja pozwala na wykorzystanie systemu wewnątrz budynków lub jego współpracę z

pewnymi rodzajami sieci bezprzewodowych (np. wykorzystując synchronizację stosowaną w danym systemie).

- Możliwe jest łączenie routerów w kognitywną sieć o architekturze typu relay, mesh i fanned-out.
- Każdy z routerów ma możliwość kształtowania wiązki charakterystyki antenowej. Może być to uprzednio ustalone i zsynchronizowane z przydziałem szczelin czasowych. Można ustalić kształtowanie wiązki w zależności od wykorzystywanej szczeliny czasowej lub w zależności od przesyłanych pakietów, jak również uwzględniające zastosowanie macierzy anten w AP lub klientach.
- Routery stosują protokół IP i mogą pełnić funkcję access pointa lub klienta – jest to ustalane bezpośrednio z poziomu oprogramowania sterującego systemem. Oprogramowanie kontroluje numer kanału, EIRP, kierunkowość anten, szybkość transmisji, planowanie nadawania i jego kierunek i pewne funkcje warstw MAC/PHY IEEE 802.11.
- Urządzenia są wyposażone w moduły analizatora widma z wąskim pasmem skanowania (2,4 – 2,5 GHz), z poziomem szumów własnych ok. - 100 dB/MHz. Skanowane są kanały, które mogą być potencjalnie wykorzystane przez system i wykrywany jest poziom sygnałów w na poszczególnych częstotliwościach, kierunek źródła i częstość występowania zaburzeń od innych sieci 802.11. Możliwe jest rozbudowanie monitoringu widma przez wykorzystanie specjalnych sensorów radiowych pozwalających na wykrycie sygnałów radarowych, telewizyjnych, od mikrofonów bezprzewodowych itp.
- Interfejs Ethernetu umożliwia sprawdzanie pakietów IP oraz implementację ograniczenia przesyłanych ilości danych, koordynację interfejsu radiowego przy pomocy sygnałów identyfikacji (Beacon), przesył serii danych.

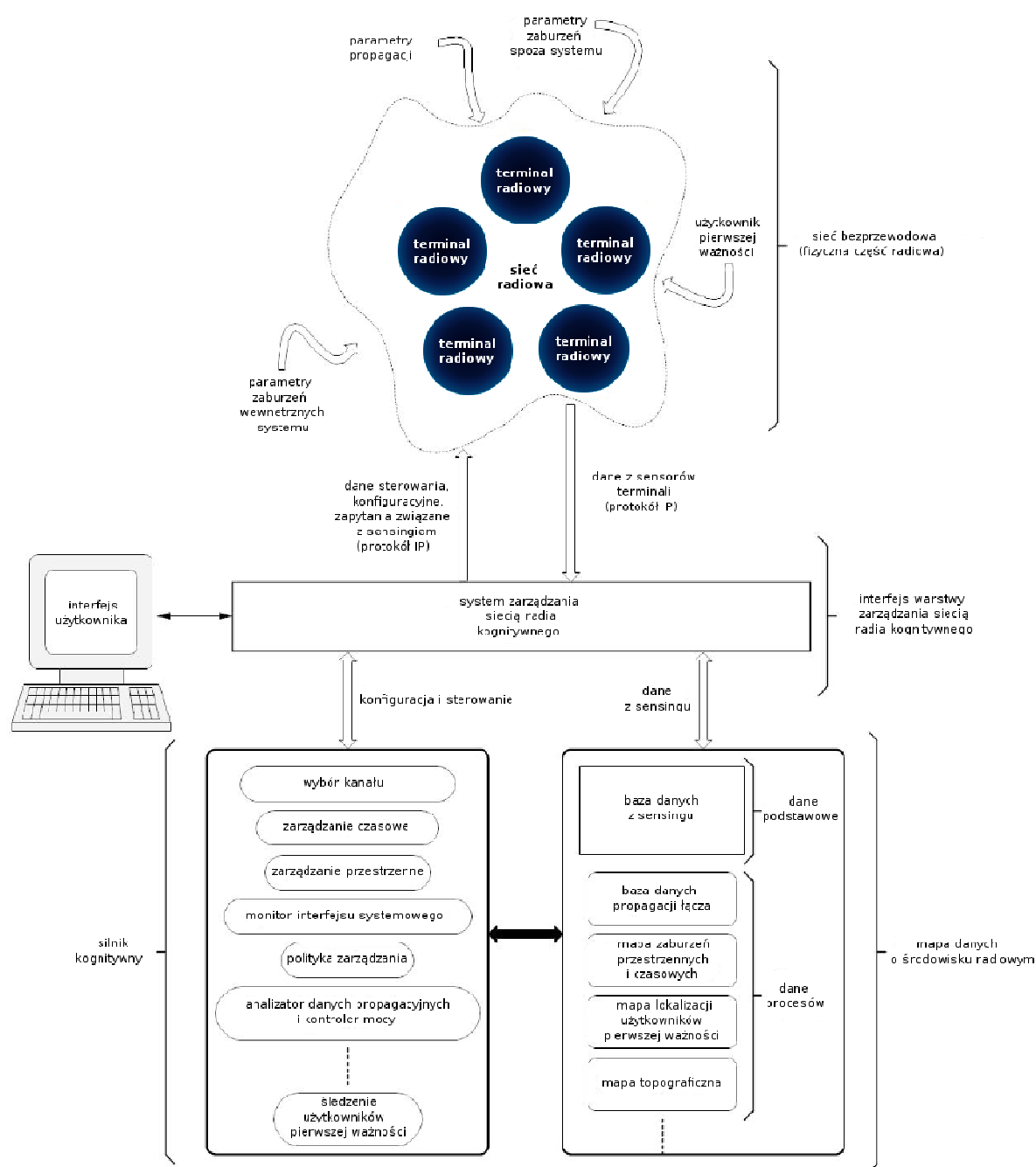
Podstawowy zestaw wykorzystany w naszej platformie testowej radia kognitywnego składa się z jednego access pointa, dwóch terminali klienta i oprogramowania pracującego pod systemem Linux (Fedora core 16). Taki zestaw pozwala zbudować bezprzewodową sieć kognitywną kontrolowaną z poziomu dołączonego komputera. Sieć dysponuje danymi o niej samej oraz o innych sieciach WiFi pracujących w pobliżu i innych sygnałach zaburzeń. Sieć może być skonfigurowana w taki sposób, aby zmieniała automatycznie wykorzystywany kanał tak, aby unikać zaburzeń i może mieć tak dobrane ustawienia, aby każdy terminal miał przyznaną własną szczelinę czasową do transmisji danych. System może być rozbudowany o anteny

kierunkowe co umożliwia z jednej strony lepsze określenie kierunków z których nadchodzą zaburzenia, a z drugiej strony pozwala na uzyskanie większej odporności na te zaburzenia. Możliwe jest tworzenie macierzy antenowych o czym będzie wspomniane w dalszej części podczas omawiania interfejsu CNRMS.

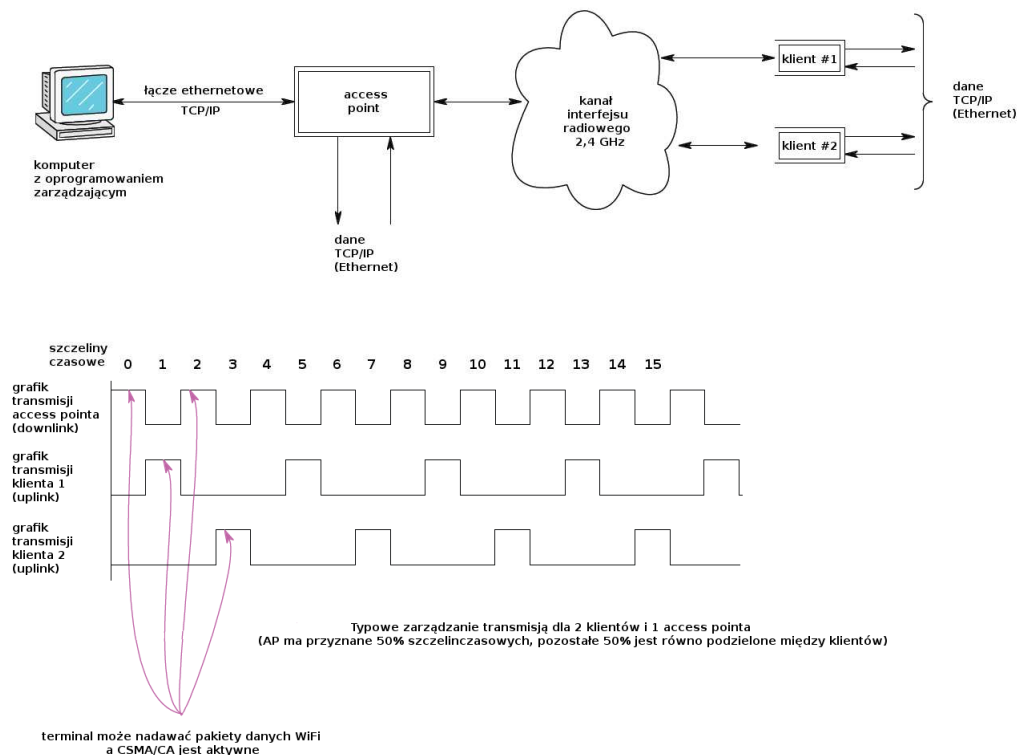
W skład platformy testowej wchodzi:

- Terminal radiowy (na bazie zmodyfikowanego standardowego routera IEEE 802.11 Mikrotik RB433) pracujący w jednym z dwóch trybów (jako access point lub jako klient), konfigurowalny zdalnie, stosujący łączność radiową (wg standardu 802.11) dla transmisji danych między access pointem i klientami. Terminal radiowy jest również wyposażony w urządzenie do sensingu widma radiowego (analizator widma) oraz podsystemy (software) niezbędne do realizacji kognitywności. Dzięki modułowi GPS terminal ma możliwość określania lokalizacji i czasu. Istnieje możliwość programowego ustalania szczelin czasowych TDM, wyboru anten dla transmisji poszczególnych pakietów, zestawienia łącza do synchronizacji z podrzędnymi terminalami (Access point z klientami).
- Oprogramowanie umożliwiające zarządzanie działaniem terminali radiowych bezpośrednio przez operatora lub za pośrednictwem algorytmów kognitywności. Po wysłaniu zapytań do terminali oprogramowanie uzyskuje od nich dane z sensingu. Oprogramowanie ustawia domyślne parametry sieci, dostarcza użytkownikowi informacje o stanie wszystkich kontrolowanych przez to oprogramowanie terminali radiowych, pozwala na sterowanie i zmianę funkcji kognitywnych. Oprogramowanie działa na komputerze z systemem operacyjnym Linux (Fedora).
- Skrypt sterowania i sensingu zarządzający transferem tych danych między komputerem z oprogramowaniem a terminalami radiowymi. Transmisja danych jest oparta na protokole IP.
- Silnik kognitywny zarządzający wykorzystaniem widma radiowego przez zbudowaną na bazie platformy testowej sieć, nadający sieci jej adaptacyjny charakter i sterujący jej zachowaniem. Silnik kognitywny stanowi część oprogramowania platformy testowej i zarządza czasowym, przestrzennym i widmowym obciążeniem systemu. Działanie silnika kognitywnego zależy od zadanego przez użytkownika algorytmu kognitywności.
- Baza danych REAM (Radio Environment Memory Map) gromadząca dane pochodzące z sensingu zajętości widma realizowanego przez wszystkie terminale radiowe. Sposób

gromadzenia danych z sensingu jest uzależniony od przyjętego algorytmu kognitywności.



Rys. 2 Schemat blokowy działania platformy testowej radia kognitywnego



Rys. 3 Zasady przydzielania szczelin czasowych

Terminal radiowy składa się z następujących elementów:

- Jednostka główna zawierająca:
 - Płyta routera zawierająca dwie płyty radiowe 802.11g
 - Płyta EBB (Ethernet Buffer Board) z obwodem analizatora widma
 - Kable połączeniowe
 - Obudowa aluminiowa
- Dwie anteny: jedna dla celów podstawowej transmisji, druga do odbioru informacji dla potrzeb sensingu
- Adapter Power-Over-Ethernet zapewniające zasilanie i połączenie ethernetowe
- Antena GPS



Rys. 4 Widok terminala radiowego



Rys. 5 Widok terminala radiowego

5.2.1 Analizator widma

Analizator widma pracuje w zakresie częstotliwości od 2400 do 2500 MHz. Przesyła on do EBB 101 paczek danych o mocy zmierzonej w tym zakresie częstotliwości – paczki danych odpowiadają kolejnym częstotliwościom pomiarowym ze skokiem 1 MHz. Analizator bada pasmo częstotliwości w którym pracuje wykorzystując drugą antenę w chwili, gdy terminal nie nadaje.

Dane o widmie przychodzące z analizatora są skanowane w trakcie trwania 32 kolejnych ramek 101 paczek, ustalane są poziomy maksymalny, minimalny i średni, które są następnie zapisywane w buforze. Przez kolejne 32 ramki taka sama operacja jest wykonywana z tą różnicą, że dane są zapisywane do drugiego bufora. Jeśli nadejdzie prośba o odczyt danych, są one odczytywane z tego bufora gdzie jest w danej chwili najświeższa pełna informacja.

5.2.2 Baza danych REAM

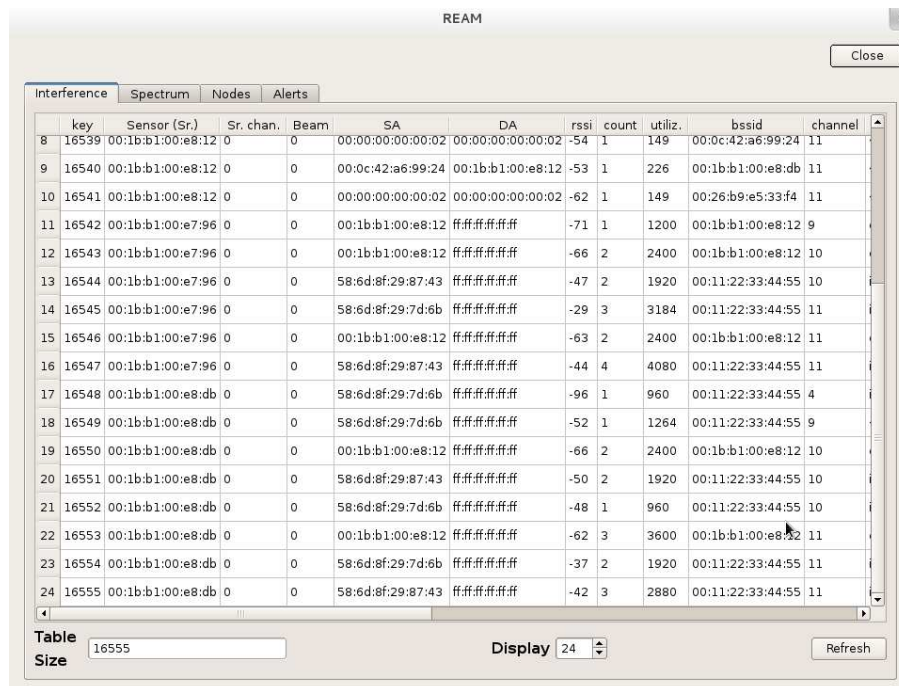
Baza danych REAM dostarcza szczegółowych informacji o stanie radiowej sieci kognitywnej. Jest aplikacją bazy danych PostgreSQL, zapytania w formacie SQL mogą być wykorzystane do odczytania zebranych danych o środowisku w którym pracuje sieć kognitywna, te dane zaś mogą być wykorzystane przez silnik kognitywny do optymalizacji działania sieci. Zastosowany interfejs graficznemu ułatwia poznanie struktury i zawartości bazy.

Baza danych składa się z 4 tablic:

- Tablica węzłów zawierająca informacje o wszystkich węzłach sieci kognitywnej kontrolowanych przez oprogramowanie zarządzające. Każdy wiersz tablicy zawiera podstawowe dane o jednym węźle sieci.
- Tablica zaburzeń zawierająca informacje o ruchu WiFi (środowisku) widzianym przez węzły bezprzewodowe wchodzące w skład sieci kognitywnej. Jeden wiersz tablicy opisuje zestaw podobnych pakietów przesłanych między konkretnym węzłem źródłowym i konkretnym węzłem odbiorczym widzianych przez węzeł w konkretnym przedziale czasowym.
- Tablica widma zawierająca informacje zebrane przez układy analizatorów widma terminali radiowych. Każdy wiersz tablicy zawiera informację o widmie radiowym zebrane przez jeden konkretny terminal.

- Tablica alarmów zawierająca informacje o alarmach o obecności użytkownika pierwszej ważności generowanych przez poszczególne węzły sieci kognitywnej. Każdy wiersz odpowiada jednemu alarmowi.

Interfejs użytkownika wyświetla cztery zakładki z tabelami odpowiadającymi tablicom bazy REAM i umożliwia operatorowi wgląd we wszystkie dane zawarte w bazie.



	key	Sensor (Sr.)	Sr. chan.	Beam	SA	DA	rss	count	utiliz.	bssid	channel
8	16539	00:1b:b1:00:e8:12	0	0	00:00:00:00:00:02	00:00:00:00:00:02	-54	1	149	00:0c:42:a6:99:24	11
9	16540	00:1b:b1:00:e8:12	0	0	00:0c:42:a6:99:24	00:1b:b1:00:e8:12	-53	1	226	00:1b:b1:00:e8:db	11
10	16541	00:1b:b1:00:e8:12	0	0	00:00:00:00:00:02	00:00:00:00:00:02	-62	1	149	00:26:b9:e5:33:f4	11
11	16542	00:1b:b1:00:e7:96	0	0	00:1b:b1:00:e8:12	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-71	1	1200	00:1b:b1:00:e8:12	9
12	16543	00:1b:b1:00:e7:96	0	0	00:1b:b1:00:e8:12	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-66	2	2400	00:1b:b1:00:e8:12	10
13	16544	00:1b:b1:00:e7:96	0	0	58:6d:8f:29:7d:6b	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-47	2	1920	00:11:22:33:44:55	10
14	16545	00:1b:b1:00:e7:96	0	0	58:6d:8f:29:7d:6b	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-29	3	3184	00:11:22:33:44:55	11
15	16546	00:1b:b1:00:e7:96	0	0	00:1b:b1:00:e8:12	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-63	2	2400	00:1b:b1:00:e8:12	11
16	16547	00:1b:b1:00:e7:96	0	0	58:6d:8f:29:7d:6b	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-44	4	4080	00:11:22:33:44:55	11
17	16548	00:1b:b1:00:e8:db	0	0	58:6d:8f:29:7d:6b	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-96	1	960	00:11:22:33:44:55	4
18	16549	00:1b:b1:00:e8:db	0	0	58:6d:8f:29:7d:6b	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-52	1	1264	00:11:22:33:44:55	9
19	16550	00:1b:b1:00:e8:db	0	0	00:1b:b1:00:e8:12	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-66	2	2400	00:1b:b1:00:e8:12	10
20	16551	00:1b:b1:00:e8:db	0	0	58:6d:8f:29:7d:6b	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-50	2	1920	00:11:22:33:44:55	10
21	16552	00:1b:b1:00:e8:db	0	0	58:6d:8f:29:7d:6b	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-48	1	960	00:11:22:33:44:55	10
22	16553	00:1b:b1:00:e8:db	0	0	00:1b:b1:00:e8:12	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-62	3	3600	00:1b:b1:00:e8:12	11
23	16554	00:1b:b1:00:e8:db	0	0	58:6d:8f:29:7d:6b	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-37	2	1920	00:11:22:33:44:55	11
24	16555	00:1b:b1:00:e8:db	0	0	58:6d:8f:29:7d:6b	ff:ff:ff:ff:ff:ff	-42	3	2880	00:11:22:33:44:55	11

Rys. 6 Interfejs użytkownika bazy REAM

REAM

Close

InterferenceSpectrumNodesAlerts

	channel	ssid	type	subtype	time	gps	rate	seconds	useconds	
8	99:24	11	<unknown>	1	13	2011-12-09 12:58:28.666756	(-75.7025,45.4199,138.681)	6	661	166776
9	a8:db	11	<unknown>	2	8	2011-12-09 12:58:28.666756	(-75.7025,45.4199,138.681)	6	661	167067
10	33:f4	11	<unknown>	1	13	2011-12-09 12:58:28.666756	(-75.7025,45.4199,138.681)	6	661	167164
11	a8:12	9	coral	0	8	2011-12-09 12:58:29.514800	(-75.7026,45.4191,77.4422)	1	1484	71259
12	a8:12	10	coral	0	8	2011-12-09 12:58:29.514800	(-75.7026,45.4191,77.4422)	1	1484	685564
13	44:55	10	itl	0	8	2011-12-09 12:58:29.514800	(-75.7026,45.4191,77.4422)	1	1484	752692
14	44:55	11	itl	2	0	2011-12-09 12:58:29.514800	(-75.7026,45.4191,77.4422)	1	1485	41130
15	a8:12	11	coral	0	8	2011-12-09 12:58:29.514800	(-75.7026,45.4191,77.4422)	1	1485	95199
16	44:55	11	itl	2	0	2011-12-09 12:58:29.514800	(-75.7026,45.4191,77.4422)	1	1485	145291
17	44:55	4	itl	0	8	2011-12-09 12:58:30.297775	(-75.7022,45.4198,225.952)	1	1482	497712
18	44:55	9	<unknown>	2	0	2011-12-09 12:58:30.297775	(-75.7022,45.4198,225.952)	1	1485	141277
19	a8:12	10	coral	0	8	2011-12-09 12:58:30.297775	(-75.7022,45.4198,225.952)	1	1485	400173
20	44:55	10	itl	0	8	2011-12-09 12:58:30.297775	(-75.7022,45.4198,225.952)	1	1485	467314
21	44:55	10	itl	0	8	2011-12-09 12:58:30.297775	(-75.7022,45.4198,225.952)	1	1485	672054
22	a8:12	11	coral	0	8	2011-12-09 12:58:30.297775	(-75.7022,45.4198,225.952)	1	1485	809752
23	44:55	11	itl	0	8	2011-12-09 12:58:30.297775	(-75.7022,45.4198,225.952)	1	1485	876856
24	44:55	11	itl	0	8	2011-12-09 12:58:30.297775	(-75.7022,45.4198,225.952)	1	1485	979243

Table Size16555

Display24

Refresh

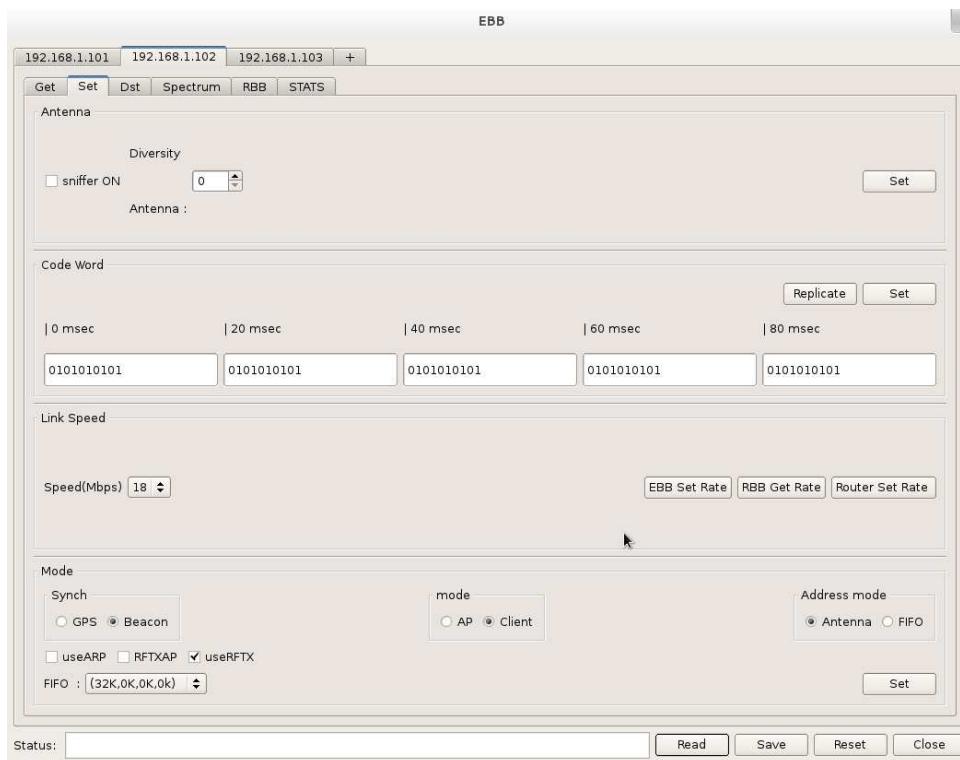
Rys. 7 Interfejs użytkownika bazy REAM

Interfejs użytkownika do sterowania płytą EBB zapewnia możliwość łatwego dostępu do danych pobieranych z poszczególnych węzłów sieci kognitywnej oraz umożliwia zmianę różnych parametrów tych węzłów. Na Rysunkach 8 do 14 pokazano rzeczywiste nastawy systemu podczas prowadzonych eksperymentów oraz opisano najważniejsze dane jakie zawarte są na przedstawionych rysunkach.

The screenshot shows the 'Get' tab of the EBB user interface. At the top, there are IP address tabs: 192.168.1.101, 192.168.1.102, 192.168.1.103, and a '+' button. Below these are tabs for 'Get', 'Set', 'Dst', 'Spectrum', 'RBB', and 'STATS'. The main area is divided into three sections: GPS, Version, and Status. The GPS section contains fields for Temperature (C) (56.7), Latitude (deg) (45.420), Longitude (deg) (-75.702), Altitude (M) (138.7), and GPS Time (gmt) (INVALID). There are 'Get Coord' and 'Get Time' buttons. The Version section contains fields for EBB (18), SA (2), and RBB (105), with a 'Get' button. The Status section contains fields for txRate (0), rxRate (86), and various packet counts (fifo0, fifo1, fifo2, fifo3, TxPkt, RfPkt, PktRTXRatio, inPkt). There are also checkboxes for gpsOK, gpsMsg, Master, and PktDrop. At the bottom, there is a 'Status:' field and buttons for 'Read', 'Save', 'Reset', and 'Close'.

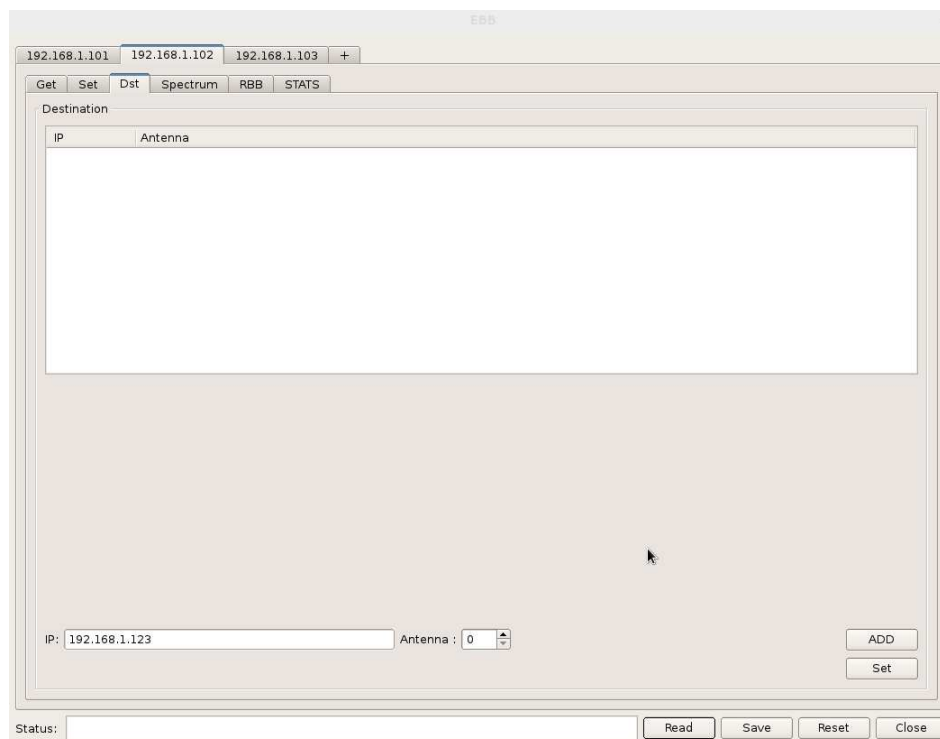
Rys. 8 Interfejs użytkownika do sterowania płytą EBB – zakładka Get

W zakładce Get interfejsu użytkownika możliwe jest pobranie aktualnych danych z terminala radiowego, sprawdzenie statusu jego zajętości i obciążenia jak również danych z modułu GPS (tu nie był on podłączony).



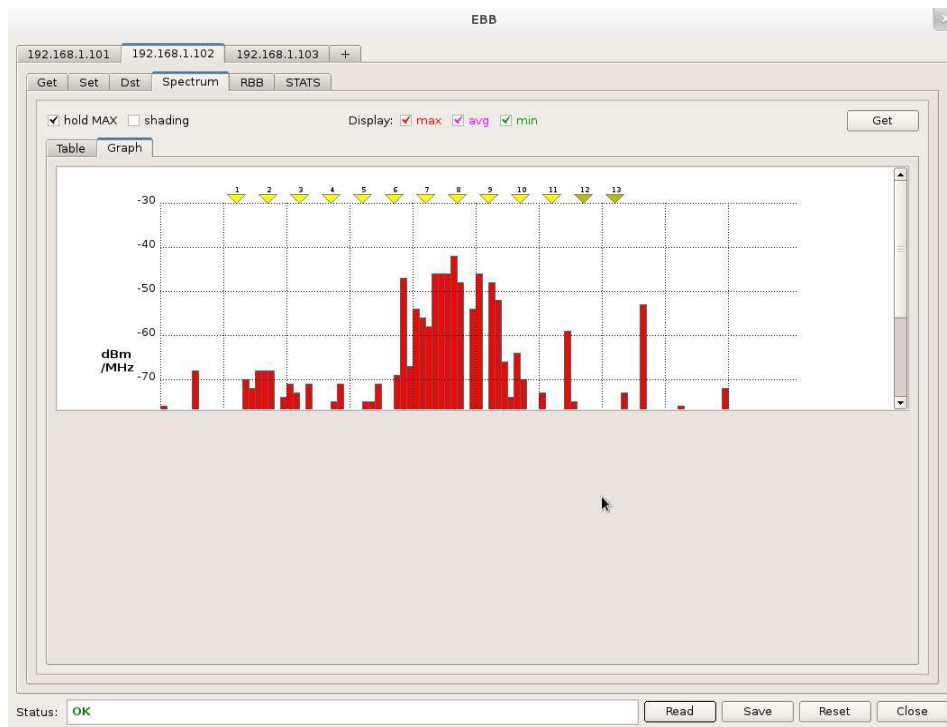
Rys. 9 Interfejs użytkownika do sterowania płytą EBB – zakładka Set

W zakładce Set interfejsu użytkownika możliwe jest ustawienie parametrów transmisyjnych dla danego terminala radiowego m.in. ustawienie kierunkowości anteny, przydzielenie szczelin czasowych w jakich będzie on pracował, określenie przepustowości łącza jak również określenie trybu pracy i sposobu synchronizacji terminali.



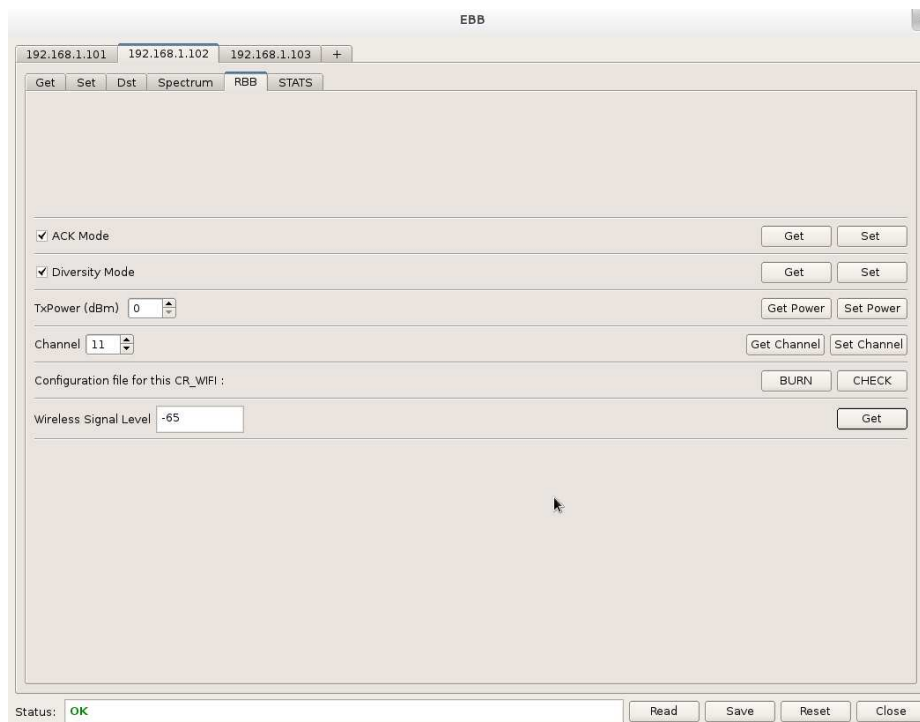
Rys. 10 Interfejs użytkownika do sterowania płytą EBB – zakładka Dst

W zakładce Dst możliwe jest przydzielenie dedykowanej anteny do komunikacji z danym terminalem, możliwość ustawiania wykorzystywana jest wówczas gdy mamy do czynienia z przyłączoną macierzą anten lub z uwagi na oddalenie jednego z terminali chcemy do niego przypisać antenę tylko do transmisji pomiędzy danym terminalem klienckim a access pointem.

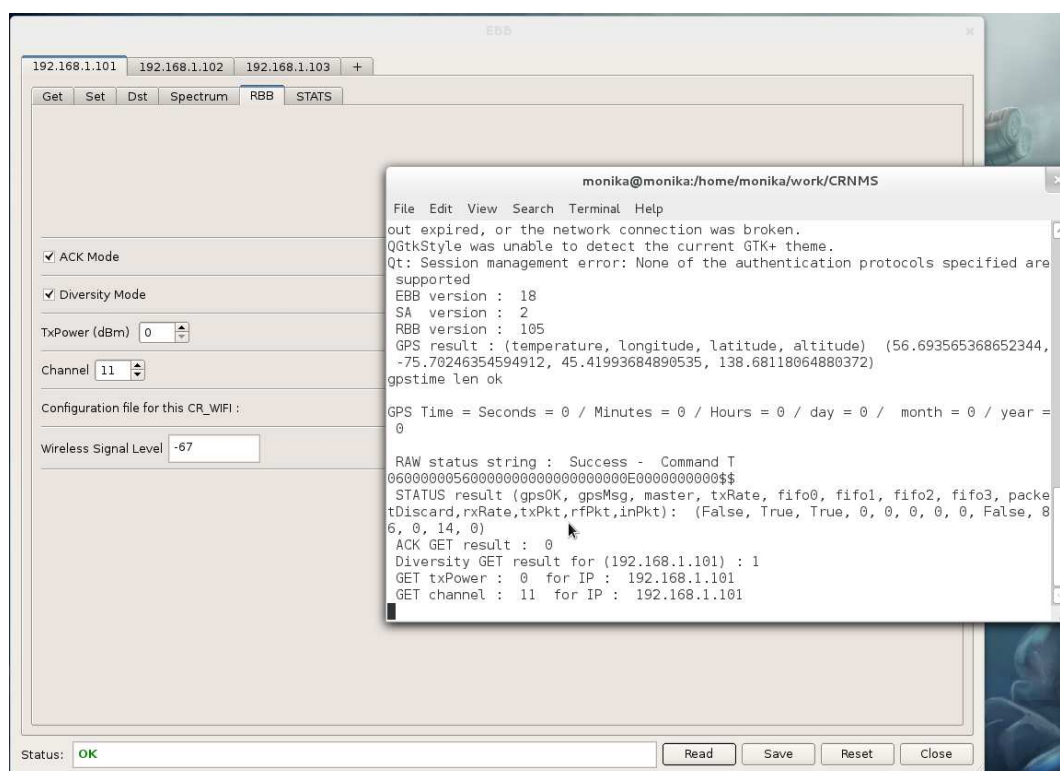


Rys. 11 Interfejs użytkownika do sterowania płytą EBB – zakładka Spectrum

Za pomocą zakładki Spectrum istnieje możliwość wizualnego i tabelarycznego przedstawienia zaburzeń widzianych przez dany terminal. Dane te przekazywane są do bazy REAM.

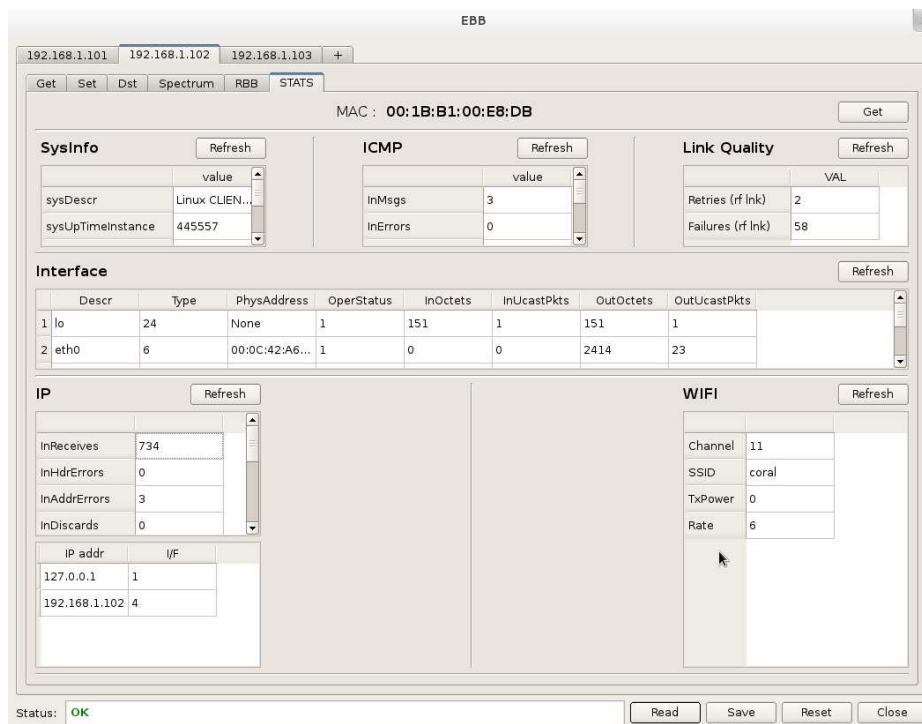


Rys. 12 Interfejs użytkownika do sterowania płytą EBB – zakładka RBB



Rys. 13 Interfejs użytkownika do sterowania płytą EBB – zakładka RBB i linia komend

W zakładce RBB możliwe jest pobranie i ustawienie parametrów fizycznych transmisji. Jak również sprawdzenie aktualnego poziomu mocy z jakim pracuje terminal. Wszelkie ustawienia, zmiany, pobieranie danych realizowane jest poprzez linię komend, zaś interfejs użytkownika stosowany jest tylko do wizualizacji wprowadzanych zmian (Rys. 12)



Rys. 14 Interfejs użytkownika do sterowania płytą EBB – zakładka STATS

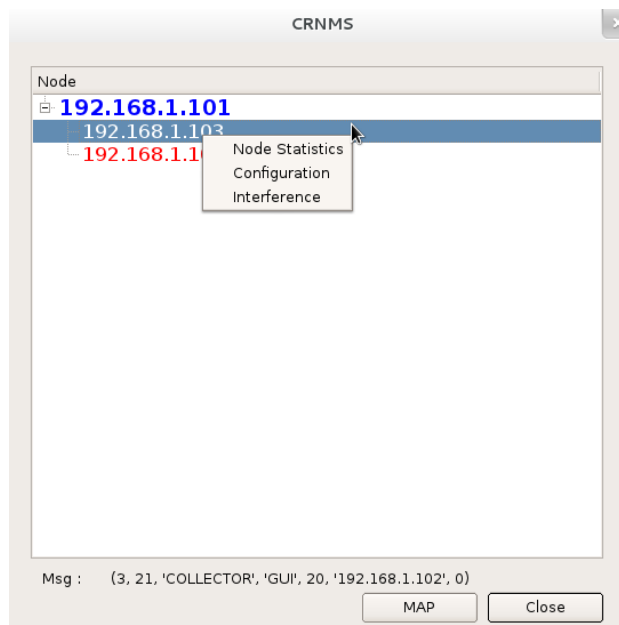
W zakładce STATS zawarte są wszystkie podstawowe informacje o danym terminalu umożliwia ona szybki podgląd stanu nastaw, a po przełączeniu do wcześniej omówionych zakładek ich modyfikację.

Oprogramowanie zarządzające siecią kognitywną umożliwia sterowanie logiką sieci ręcznie przez użytkownika lub automatycznie za pośrednictwem silnika kognitywnego z wykorzystaniem interfejsu programistycznego. Oprogramowanie zarządzające składa się z 4 podstawowych modułów, którymi są:

- Procesy odpytujące okresowo węzły sieci kognitywnej w celu uzyskania informacji o interfejsie WiFi i rozkładach widma radiowego (środowisku) widzianych przez analizatory widma w poszczególnych węzłach. Procesy te próbują również okresowo poszczególne access pointy pracujące w sieci w celu ustalenia które terminale klienckie są w danym momencie przypisane do danego access pointa. Zebrane dane są zapisywane w bazie danych REAM i mogą być później wykorzystane przez silnik kognitywny do zarządzania siecią.
- Interfejs programistyczny umożliwiający zapewnienie silnikowi kognitywnemu możliwości sprawdzanie różnych parametrów sieci i odpowiednie zarządzanie siecią.

- Interfejs użytkownika daje osobie zarządzającej siecią wgląd we wszystkie parametry sieci i kontrolę nad nimi. Możliwości wglądu w dane i kontroli nad nimi są równoważne w znacznej części możliwościom jakie daje interfejs użytkownika płyty EBB.
- Warstwy oprogramowania realizujące poszczególne elementy powyższych funkcji.

W dalszej części, przy opisie eksperymentów, na rysunkach przedstawiono zrzuty ekranowe wykonane podczas symulacji prowadzonych na systemie radia kognitywnego w Zakładzie Kompatybilności Elektromagnetycznej.



Rys. 15 Interfejs graficzny CRNMS

Interfejs CRNMS wyświetla informacje o dostępnych w sieci access pointach i stowarzyszonych z nimi klientach. Z poziomu interfejsu jest możliwe wyświetlenie statystyk dla poszczególnych terminali (takich samych jak te dostępne w zakładce STATS interfejsu EBB). Możliwe jest również odczytanie i zmiana konfiguracji poszczególnych terminali, jak również sprawdzenie zaburzeń widzianych przez nie.

Statistics for AP : 192.168.1.101

Host : **192.168.1.101** MAC : **00:1B:B1:00:E8:12**
 SSID : **coral** Close

sysInfo Refresh

	value
sysDescr	Linux AP 2.6...
sysUpTimeInstance	701127
sysName	AP
sysLocation	Unknown

ICMP Refresh

	value
InMsgs	3
InErrors	0
InDestUnreachs	1
InEchos	2
InEchoReps	0
OutMsgs	6
OutErrors	0

interfaces Refresh

	Descr	Type	PhysAddress	OperStatus	InOctets
1	lo	24	None	1	151
2	eth0	6	00:0C:42:AF...	1	178393

IP Refresh

InReceives	828
InHdrErrors	0
InAddrErrors	0
InDiscards	0

IP addr	I/F
127.0.0.1	1
192.168.1.101	2

WIFI Refresh

Channel	11
SSID	coral
TxPower	0
Rate	6

Rys. 16 Interfejs graficzny CRNMS – karta Node statistics

Configuration for AP : 192.168.1.101

Host : **192.168.1.101** MAC : **00:1B:B1:00:E8:12**
 SSID : **coral** ACK ☒ enable

Tx Power

Channel

Mode

CSMA ☐

ARP ☒

Link speed (Mbps)

Country

Master ☐

Adressing ☒ Antenna ☐ FIFO

Synchro. ☐ Beacon ☐ GPS

Code Word Edit

Best channel : **None** 2nd Best channel : **None** SET

Reset Configure Close

Destination Table : 192.168.1.101

FIFO Config :

Destination

IP	192.168.1.123
----	---------------

IP: ADD

Antenna : Reset Configure Close

Rys. 17 Interfejs graficzny CRNMS – karta Configuration

Interference for AP : 192.168.1.101

Host: **192.168.1.101** MAC : **00:1B:B1:00:E8:12**

SSID : **coral**

Channel Beam Delay(s.) ☐ Spectrum

WIFI Interference (seen in last 5 mins by this sensor)

Channel	Pkt Count
1	17
2	9
3	0
4	2
5	18
6	25

Spectrum Analyzer (avg, seen by this sensor) Time:

Rys. 18 Interfejs graficzny CRNMS – karta Interference

5.2.3 Synchronizacja terminali

Terminale do koordynacji okresów nadawania i odbioru wykorzystują powtarzający się zestaw synchronizowanych, numerowanych szczelin czasowych. Szczeliny czasowe trwają 2 lub 4 ms w zależności od wykorzystywanej prędkości transmisji. Oprogramowanie zarządzające może ustawić 50 szczelin czasowych, które powtarzają się w czasie do momentu resetu przez sygnał identyfikacji (Beacon) lub sygnał PPS z modułu GPS. Szczeliny czasowe w ramach całej sieci mogą być synchronizowane na 4 sposoby:

- Synchronizacja beacon: timery terminali radiowych (access pointów i klientów) są resetowane po odebraniu lub nadaniu sygnału identyfikacji. Jeśli sygnał identyfikacji nie jest odebrany przez klienta timery są resetowane z częstotnością z jaką sygnał identyfikacji był nadawany wcześniej, ale transmisja jest zablokowana do momentu odebrania sygnału identyfikacji.
- Synchronizacja GPS: timery terminali radiowych (access pointów i klientów) są resetowane sygnałem PPS z modułu GPS. Pierwsza szczelina czasowa jest synchronizowana sygnałem z GPS, ale dokładność synchronizacji kolejnych szczelin czasowych jest zależna od dokładności wewnętrznego zegara na płycie terminala.
- Synchronizacja ARP: jako referencyjny timer widoczny dla wszystkich terminali wykorzystuje beacon WiFi. Każdy access point lub klient zapisuje wartość wewnętrznego timera w momencie wykrycia beacona. Access point rozsyła swoją wersję tego czasu i każdy klient dostosowuje odpowiednio swój wewnętrzny timer. Mechanizm ten nie koryguje opóźnień wynikających z propagacji sygnału wysyłanego przez access pointa.
- Synchronizacja slave: jest stosowana aby umożliwić synchronizację słów kodowych wielu sieci, umożliwiając większemu zbiorowi terminali zorganizowaną/zsynchronizowaną transmisję/odbior.

Code Word for : 192.168.1.101

Name :

Code Word

Slot 0

☒ RX
☐ TX

0

Slot 1

☒ RX
☐ TX

0

Slot 2

☒ RX
☐ TX

0

Slot 3

☒ RX
☐ TX

0

Slot 4

☒ RX
☐ TX

0

Slot 5

☒ RX
☐ TX

0

Slot 6

☒ RX
☐ TX

0

Slot 7

☒ RX
☐ TX

0

Reset

Save

Close

Code Word for : 192.168.1.101

Name :

Code Word

☒ RX
☐ TX

0

Slot 43

☒ RX
☐ TX

0

Slot 44

☒ RX
☐ TX

0

Slot 45

☒ RX
☐ TX

0

Slot 46

☒ RX
☐ TX

0

Slot 47

☒ RX
☐ TX

0

Slot 48

☒ RX
☐ TX

0

Slot 49

☒ RX
☐ TX

0

Reset

Save

Close

Rys. 19 Karta Configuration – przydział szczelin czasowych

5.3 **Badania laboratoryjne instalacji modelowej systemu radia kognitywnego**

Treść rozdziału dostępna jest w IŁ o/Wrocław ul. Swojczycka 38, 51-501 Wrocław

5.4 Testy działania algorytmu kognitywności systemu - analiza przełączeń

Treść rozdziału dostępna jest w IŁ o/Wrocław ul. Swojczycka 38, 51-501 Wrocław

5.5 Podsumowanie

W ramach realizacji pracy zaprojektowano i zestawiono w warunkach laboratoryjnych hardwarowo-sofwarową platformę testową radia kognitywnego, działającą w paśmie WiFi. Platforma testowa została uruchomiona w konfiguracji zawierającej 3 terminale radiowe (1 access point i 2 klientów) pracujące w standardzie IEEE 802.11 g oraz komputer z uruchomionym oprogramowaniem zarządzającym kognitywnością systemu.

W trakcie zrealizowanych dla tak zestawionego systemu badań monitorowano pracę systemu i jego podstawowe parametry.

W głównej części testów monitorowano pracę systemu działającego w otoczeniu innych sieci. Wprowadzono do otoczenia badanego systemu kontrolowanego użytkownika pierwszej ważności (zestawioną w laboratorium sieć mesh).

Przy takiej konfiguracji układu badawczego rejestrowano zmiany szybkości transmisji związane z obniżeniem mocy systemu pracującego w obecności użytkownika pierwszej ważności i przeprowadzono testy działania silnika kognitywnego. W wyniku których, na podstawie analizy przełączeń w systemie, potwierdzono poprawność działania zaimplementowanego algorytmu kognitywności.

Możliwość przyszłych prac z wykorzystaniem zestawionego i uruchomionego systemu

System jest przygotowany do zaprojektowania innych algorytmów kognitywności, w tym również przewidzianych dla telewizji cyfrowej (np. wykorzystujących tabele dostępnych kanałów). Algorytmy te można zaimplementować w opracowanym systemie. Będzie wtedy możliwe przeprowadzenie weryfikacji działania algorytmów dedykowanych dla telewizji cyfrowej – warunki panujące w paśmie telewizyjnym można by odtworzyć w paśmie WiFi. Można również w ramach przyszłych prac z wykorzystaniem opracowanej platformy testowej sprawdzić oddziaływanie systemu kognitywnego na system pierwszej ważności w momencie tuż przed przełączeniem, poprzez implementację istniejących algorytmów kognitywności lub w miarę potrzeb, poprzez opracowanie nowych algorytmów.

6. Podsumowanie pracy statutowej

Prace naukowo-badawcze w dziedzinie radia kognitywnego absorbują dziś na świecie większość najważniejszych instytucji badawczych i przemysłowych zajmujących się systemami bezprzewodowymi. Toczy się aktualnie w tym temacie wiele projektów badawczych (np. FP7, COST), trwają prace standaryzacyjne różnych grup (ETSI, IEEE), podejmowane są przygotowawcze działania regulacyjne (USA FCC, UK OFCOM, CEPT, ITU). Opracowanie i wdrożenie standardów radia kognitywnego nastąpi w ciągu najbliższych lat rewolucjonizując metody regulacji, sposoby dostępu do pasma radiowego i współużytkowanie widma różnych systemów bezprzewodowych. Ze względu na dzisiejsze znaczenie systemów bezprzewodowych, ich rosnące udziały w rynku telekomunikacyjnym i powszechność technik radiowych w każdej niemal dziedzinie transmisji, można oczekiwać, że systemy kognitywne po ich zestandaryzowaniu i uruchomieniu szerokiej produkcji staną się w niedługim czasie powszechne w użyciu. Konieczne jest podejmowanie w kraju działań zmierzających do wdrożenia tego typu systemów, które mogą pomóc w rozwiązaniu aktualnego problemu rosnącego ruchu w sieciach bezprzewodowych i rosnących zastosowań systemów radiowych oraz braku dostępnych wolnych zasobów częstotliwości radiowych. Zastosowania przyszłych systemów CR na pewno będą bardzo szerokie: od systemów komórkowych (np. LTE, LTE-Advanced) poprzez dostęp do Internetu (sieci CR BWA), systemy bezpieczeństwa publicznego i ratunkowe oraz pozostałe systemy bezprzewodowe (sieci sensorowe, domowe, dostępne i inne). Podejmowane obecnie w Instytucie Łączności prace są pionierskie na skalę europejską, wyniki prac są publikowane na bieżąco w COST i CEPT gdzie są dyskutowane i analizowane. Przedstawiciele IŁ biorą też udział i mają swój wkład w prace standaryzacyjne (IEEE P. 1900.7). Planowane są wspólne projekty europejskie z partnerami zagranicznymi. Wstępne wyniki prowadzonych w IŁ prac są obiecujące, wskazują na możliwość znacznego rozwinięcia systemów kognitywnych w Polsce w białych przestrzeniach widma radiowego pasm telewizyjnych. Tworzone aktualnie standardy na świecie (np. IEEE 802.22, IEEE P.1900.7) mogą zostać w przyszłości z powodzeniem wdrożone w tych pasmach. Przedstawiona analiza innych pasm radiowych wskazuje na duży potencjał systemów kognitywnych także w innych zakresach częstotliwości, co stanowić będzie niewątpliwie kolejny etap rozwoju systemów CR. Prace laboratoryjne zapoczątkowane w niniejszej pracy prowadzą do stworzenia w IŁ jednego z pierwszych, nielicznych w Polsce

laboratoriów naukowo-badawczych zajmujących się systemami radia kognitywnego, które może podejmować prace weryfikujące np. różnego typu algorytmy sensingu widma analizowane w pracy i rzutować może na prowadzone na świecie prace badawcze i standaryzacyjne. Efekty pracy i kolejnych działań w tej dziedzinie będą publikowane na forum krajowym i międzynarodowym.

