

**Zakład Kompatybilności Elektromagnetycznej we Wrocławiu (Z-21)**

**Nowe techniki bezprzewodowe zwiększające  
efektywność wykorzystywania widma  
radiowego**

*Raport Z21/21300015/107/2015*

WROCŁAW, grudzień 2015



## Metryka dokumentu

Nr pracy	:	Z-21 213000015		
Nazwa pracy	:	Nowe techniki bezprzewodowe zwiększające efektywność wykorzystywania widma radiowego		
Zlecniodawca	:	Praca Statutowa		
Data rozpoczęcia	:	Styczeń 2015 r.		
Data zakończenia	:	Grudzień 2015 r.		
Słowa kluczowe	:	spectrum engineering, spectrum management, electromagnetic compatibility, 5G networks, Cognitive Radio, TV White Spaces		
Kierownik pracy	:	dr inż. Dariusz Więcek		
Kierownik Zadania		dr inż.	Maciej Grzybkowski	Z-21
Wykonawca pracy		mgr inż.	Rafał Michniewicz	Z-21
Kierownik Zadania		mgr inż.	Daniel Niewiadomski	
Wykonawca pracy		mgr inż.	Krzysztof Rzeźniczak	Z-21
Wykonawca pracy		dr inż.	Jacek Wroński	Z-21
Wykonawca pracy		mgr inż.	Dariusz Wypiór	Z-21
Kierownik Zadania		prof. dr hab.	Ryszard Strużak	Z-21
Wykonawca pracy		dr inż.	Janusz Sobolewski	Z-21
Kierownik Zadania		mgr inż.	Marek Michalak	Z-21
Wykonawca pracy		dr inż.	Monika Szafrńska	Z-21
Kierownik Zadania		mgr inż.	Marek Jermakowicz	Z-21
Wykonawca pracy		mgr inż.	Tomasz Tomczyk	Z-1
Wykonawca pracy		dr inż.	Krzysztof Maniak	Z-1
Wykonawca pracy		mgr inż.	Karolina Spalt	Z-1
Wykonawca pracy		mgr inż.	Natalia Głowska	
Wykonawca pracy			Michał Stajszczyk	

Praca wykonana w Pracowni Badania Pól i Zaburzeń - Kierownik Pracowni mgr inż. Marek Michalak i w Pracowni Gospodarki i Inżynierii Widma – Kierownik Pracowni dr inż. Dariusz Więcek Zakładu Kompatybilności Elektromagnetycznej (Z-21) - Kierownik Zakładu 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 – Państwowy Instytut Badawczy, Wrocław 2015

## SPIS TREŚCI

<b>1</b>	<b>WPROWADZENIE .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>KOEGZYSTENCJA RÓŻNYCH SYSTEMÓW RADIOKOMUNIKACYJNYCH W PAŚMIE 700 MHZ.....</b>	<b>8</b>
2.1	MFCN .....	10
2.2	PPDR.....	12
2.3	PMSE .....	15
2.4	M2M.....	16
2.5	PODSUMOWANIE.....	17
2.6	LITERATURA DO ROZDZIAŁU 2:.....	19
<b>3</b>	<b>METODY ZWIĘKSZENIA EFEKTYWNOŚCI WYKORZYSTANIA WIDMA RADIOWEGO.....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTYWANIA WOLNYCH KANAŁÓW TV DO CELÓW RADIA KOGNITYWNEGO.....</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>TRANSMISJE TESTOWE TV WS .....</b>	<b>31</b>
5.1	AKTUALNY STAN ROZWIĄZAŃ SYSTEMÓW TV WS.....	31
5.2	BADANIA DOTYCZĄCE WS WYKONANE W TRAKCIE PRACY .....	36
5.3	UKŁAD POMIAROWY .....	38
5.4	BADANIA.....	40
5.5	OCENA WPŁYWU ZABURZEŃ CIĄGLYCH NA STOPEŃ BŁĘDÓW TRANSMISJI PAKIETOWEJ – SYGNAŁY POŻĄDANE I SYGNAŁY ZAKŁÓCAJĄCE.....	46
5.6	ANALIZA ZAKŁÓCEŃ .....	52
5.6.1	SYGNAŁ ZAKŁÓCAJĄCY: SINUS.....	52
5.6.2	SYGNAŁ ZAKŁÓCAJĄCY: DVB-T .....	56
5.6.3	ZAKŁÓCANIE DVB-T PRZEZ WSD .....	58
5.7	PODSUMOWANIE.....	66
5.8	LITERATURA DO ROZDZIAŁU 5.....	67
<b>6</b>	<b>ROZSZERZENIE FUNKCJONALNOŚCI SERWISU WWW.PIAST.EDU.PL .....</b>	<b>69</b>
6.1	WPROWADZENIE I STAN WYJŚCIOWY .....	69
6.2	CEL ZADANIA .....	70

6.3	WYKONANIE I WPROWADZONE ZMIANY W APLIKACJI .....	71
6.4	PODSUMOWANIE.....	74
<b>7</b>	<b>ZAKOŃCZENIE .....</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>ZAŁĄCZNIK 1 .....</b>	<b>76</b>

## 1 Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się znaczący wzrost liczby urządzeń jak i wolumenu danych przesyłanych w różnego typu sieciach bezprzewodowych<sup>1</sup>. Transmisja radiowa stała się jednym z najważniejszych o ile nie najważniejszym środkiem współczesnej komunikacji, teletransmisji, radiodyfuzji i transmisji danych. Na przykład liczba abonentów telefonii komórkowej w Polsce wielokrotnie przewyższa dziś liczbę abonentów telefonii stacjonarnej, także liczba abonentów usług bezprzewodowego dostępu do Internetu oferowanych przez operatorów komórkowych przekracza liczbę usług dostępu stacjonarnego<sup>2</sup>. Powoduje to znaczącą presję operatorów telekomunikacyjnych na regulatorów wielu krajów w celu uzyskania i zagwarantowania praw dostępu do cennego widma radiowego. Powoduje to także osiąganie bardzo wysokich cen w przypadku sprzedaży przez Państwo praw do użytkowania ważnych części widma radiowego na terenie całego kraju. Na przykład w zakończonej w 2015r. aukcji częstotliwości z pasma 790-862 MHz (tzw. pierwsza dywidenda cyfrowa) zorganizowanej przez Urząd Komunikacji Elektronicznej za uzyskanie praw do 2x 25 MHz widma radiowego w tym paśmie na terytorium Polski uzyskano bardzo wysoką kwotę równą 8,64 mld zł. Dowodzi to ogromnego znaczenia praw dostępu do widma radiowego dla operatorów a także konieczności prac badawczych i rozwojowych w obszarze nowych technik jego wykorzystywania i zwiększania efektywności wykorzystania, takich jak np. współużytkowanie widma za pomocą technik radia kognitywnego, będących obecnie na świecie na etapie prac badawczo-rozwojowych i przedwdrożeńiowych lub pilotażowych na świecie. Także coraz liczniejsze urządzenia przemysłowe (tj. M2M, IoT) coraz częściej korzystają z różnego rodzaju dostępnych łączy bezprzewodowych w oparciu o różnego rodzaju bezprzewodowe techniki dostępowe (np. LTE, WiFi, ZigBee, Bluetooth itp.). Presja różnych użytkowników widma widoczna jest często na różnych forach regulacyjnych tj. ITU, EC czy CEPT, na których dochodzi do intensywnych dyskusji techniczno-regulacyjnych i politycznych mających przekonać innych do odpowiadającej danej stronie alokacji ważnego

---

<sup>1</sup> Raporty *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update*, publikowane w latach 2011, 2012, 2013, 2014 i 2015, *Ericsson Mobility Report. On the pulse of the networked society*. Ericsson, 2015, *Wykorzystanie transmisji danych oraz innych usług telefonii mobilnej w latach 2010-2014*, UKE 2015,

<sup>2</sup> *Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego w Polsce w 2014 roku*, UKE, 2015

fragmentu widma radiowego. Ponieważ aktualnie taka regulacja widma i przydzielanie praw do jego wykorzystania prowadzona jest zasadniczo w sposób administracyjny (Tabele, Decyzje, Pozwolenia), wydaje się, że mimo postępu technicznego zwiększającego możliwości koegzystencji różnych systemów, zbliża się kres możliwości administrowania zasobami widma bez wprowadzenia nowych, inteligentnych, wykorzystujących nowe techniki systemy łączności radiowej.

Znacząco rosnąca liczba użytkowników systemów radiowych, presja operatorów na posiadanie w swoich zasobach jak największej części widma radiowego, różnorodność typów zastosowań i typów standardów interfejsów radiowych prowadzi dziś do intensywnych prac prowadzących do zwiększenia efektywności wykorzystywania skończonego widma radiowego takich jak rozwijane w ostatnich latach prace z dziedziny radia kognitywnego – Cognitive Radio.

Podjęte w ostatnich latach i prowadzone w Instytucie Łączności prace badawcze i regulacyjne w dziedzinie dotyczącej zwiększania efektywności wykorzystania widma radiowego w oparciu o systemy radia kognitywnego, których wyniki częściowo już opublikowano<sup>3</sup>, są w dużej części pionierskie w kraju, obecnie nie ma jeszcze np. działających praktycznie w Polsce sieci wykorzystujących te techniki, a pierwsze badania prowadzone są dopiero w kilku ośrodkach.

---

<sup>3</sup> Cognitive Radio Policy and Regulation, Springer International Publishing, Switzerland, 2014, TV White Spaces. A pragmatic approach, ICTP-.The Abdus Salam International Centre for. Theoretical Physics, Trieste, Italy, 2013

## **2 Koegzystencja różnych systemów radiokomunikacyjnych w paśmie 700 MHz**

Sztandarowym przykładem klasycznej koegzystencji systemów radiokomunikacyjnych wykorzystujących techniki radiowe będzie pasmo częstotliwościowe 700 MHz. Na przykładzie propozycji różnych aranżacji częstotliwości w tym paśmie można prześledzić, jak można bardziej efektywnie niż dotychczas wykorzystać widmo częstotliwości radiowych na zasadzie podziału poszczególnych fragmentów widma.

Pasmo 700 MHz (zakres 694 – 790 MHz), jako tzw. II Dywidenda Cyfrowa stanowić będzie przykład kompatybilnej koegzystencji kilku różnych rodzajów systemów radiokomunikacyjnych. Systemy te będą tak alokowane, aby zapewniona była pełna kompatybilność elektromagnetyczna oznaczająca zarówno ochronę innych systemów jak i odporność nowych systemów na zakłócenia. W obecnej chwili pasmo 700 MHz jest w całości zajęte, ale docelowo ma być całkowicie zwolnione przez dotychczasowego beneficjenta, czyli telewizję cyfrową, i stać się „pasmem dziewiczym”, które trzeba zagospodarować od nowa. Telewizja cyfrowa siłą rzeczy nie wykorzystuje zasobu częstotliwości w sposób najbardziej efektywny (choć w pracach planistycznych starano się możliwie produktywnie zająć dostępne częstotliwości), gdyż nie jest to do końca możliwe ze względu na konieczność zachowania kompatybilności odbioru sygnałów pochodzących od stacji o bardzo dużych (z reguły) mocach. Nawet przy prawidłowym, z punktu widzenia sztuki inżynierskiej, planowaniu obszarów wykorzystania częstotliwości w telewizji, nigdy nie uzyska się tak dużej efektywnej zajętości widma na danym obszarze, jak w przypadku lokowania na danym obszarze różnych systemów radiokomunikacyjnych mniejszej mocy wykorzystujących kompatybilnie ten sam zasób częstotliwości. Nowy sposób zagospodarowania tego pasma ma być przeprowadzony w taki sposób, aby uzyskać większą efektywność wykorzystania widma częstotliwości radiowych.

Według najnowszych dokumentów CEPT związanych z wykorzystaniem pasma 700 MHz, takich jak decyzja ECC/DEC/(15)01 [2.1], czy inne dokumenty aktualnie opracowywane, pasmo to po wycofaniu z niego telewizji cyfrowej ma być głównie wykorzystany dla celów komórkowej radiokomunikacji ruchomej (systemów zwanych MFCN – ruchome lub stałe sieci łączności, co obecnie oznacza w praktyce systemy LTE) i



zharmonizowany w skali europejskiej. Pierwotna aranżacja częstotliwości dla tego zakresu, uwzględniająca jedynie systemy MFCN przedstawiona jest na rys. 2.1.

Aranżacja ta przewiduje wykorzystanie podstawowych podzakresów częstotliwości (o szerokości 2x30 MHz) przez systemy MFCN. Zakłada się przy tym istnienie tzw. luki duplexowej o szerokości 25 MHz (podzakres 733 – 758 MHz), której część przeznaczona została wstępnie dla opcjonalnego łącza „w dół” służącemu innym systemom MFCN, niż użytkowane w podzakresach podstawowych.

694-703	703-708	708-713	713-718	718-723	723-728	728-733	733-738	738-743	743-748	748-753	753-758	758-763	763-768	768-773	773-778	778-783	783-788	788-791
Pasma ochronne	MFCN łącze „w górę”						Luka	Opcjonalne dodatkowe łącze „w dół”				MFCN łącze „w dół”						Pasma ochronne
9 MHz	30 MHz (6 bloków po 5 MHz)						5 MHz	20 MHz (od zera do 4 bloków po 5 MHz)				30 MHz (6 bloków po 5 MHz)						3 MHz

*Rys.2.1 Wstępny projekt aranżacji widma dla systemów LTE w paśmie II dywidendy cyfrowej według CEPT*

Jednak stwierdzono również, że do potrzeb innych systemów niż MFCN mogą być wykorzystane pasma ochronne, zarówno dolne o szerokości 9 MHz (podzakres 694 – 703 MHz), które służy ochronie transmisji telewizyjnych w paśmie telewizyjnym na częstotliwościach poniżej 694 MHz, jak i górne o szerokości 3 MHz, które służy ochronie transmisji systemów LTE ulokowanych w paśmie I Dywidendy Cyfrowej, powyżej 791 MHz. Ustalono, że w pasmach ochronnych oraz w luce duplexowej można dopuścić eksploatację innych systemów radiokomunikacyjnych niż systemy komórkowe, mianowicie takich, jak np. PPDR (systemy ochrony publicznej), PMSE (systemy reporterskie) czy IoT (systemy dedykowane Internetowi Rzeczy, w tym głównie systemy M2M typu urządzenie-urządzenie).

Jak dotychczas nie ma konkretnej recepty na pełne zagospodarowanie całego zakresu 694 - 790 MHz, pierwszym założeniem jest obsadzenie systemów MFCN w podzakresach 703 – 733/758 – 788 MHz i rozpatrywane jest wiele wariantów zagospodarowania luki duplexowej oraz pasm ochronnych. Kilka z tych wariantów przedstawionych jest w Sprawozdaniu 53 CEPT [2.2], co zilustrowano na rys. 2.2. Wybór któregoś z wariantów pozostawiony jest do decyzji każdego z krajów członkowskich CEPT.

## 2.1 MFCN

Systemy MFCN obejmują wszelkie systemy Międzynarodowej Telekomunikacji Ruchomej IMT oraz inne systemy radiokomunikacyjne w służbach radiokomunikacji ruchomej i stałej. Systemy MFCN (w tym głównie systemy komórkowe w technice LTE) zostały uznane za zasadnicze, gdy chodzi o obsadzenie pasma 700 MHz. Jak wspomniano powyżej, przewidziano dla nich zagospodarowanie podzakresów podstawowych 703 – 733/758 – 788 MHz (o szerokości 2x30MHz) a także części luki duplexowej o szerokości 20 MHz w podzakresie 735 – 758 MHz, którą można będzie wykorzystać do uzyskania opcjonalnego łącza „w dół” (SDL) skojarzonego z innym, niezdefiniowanym dotychczas zakresem częstotliwości, (patrz rys. 2.1).

Zakresy częstotliwości [MHz]	694 - 703		703 - 733	733 - 738		738 - 743	743 - 748	748 - 753	753 - 758	758 - 788	788 - 791
	694 - 698	698 - 703		733 - 736	736 - 738						
PMSE	PMSE		MFCN łącze „w górę” UL	PMSE					MFCN łącze „w dół” DL		
PPDR (2x5MHz) FDD		PPDR UL						PPDR DL			
PPDR (2x3MHz) FDD				PPDR UL							
M2M (2x3MHz) FDD				M2M							
PPDR (2(2x5MHz)/2x10MHz) FDD				PPDR UL			PPDR DL				
Szerokość bloku [MHz]	4	5		3	2	5	5	5	5		3

Rys.2.2 Koncepcje zagospodarowania luki dupleksowej i pasm ochronnych w paśmie II Dywidendy Cyfrowej według CEPT [1.2]

Aby zachować kompatybilność względem systemów MFCN wykorzystywanych w paśmie I Dywidendy Cyfrowej (powyżej 791 MHz) oraz z systemami naziemnej telewizji cyfrowej DTT działającej poniżej częstotliwości 694 MHz w sprawozdaniu [2.2] określono dopuszczalne parametry nadajników systemów MFCN (LTE) pracujących w wyżej wymienionych podzakresach. Ustalono także maski promieniowania nadajników systemu LTE, włącznie z wyznaczeniem maksymalnych poziomów promieniowania pozapasmowego (OOB). Dzięki temu zapewniona ma być niezakłócona praca systemów telewizyjnych w paśmie telewizyjnym oraz systemów komórkowych LTT w paśmie I Dywidendy.

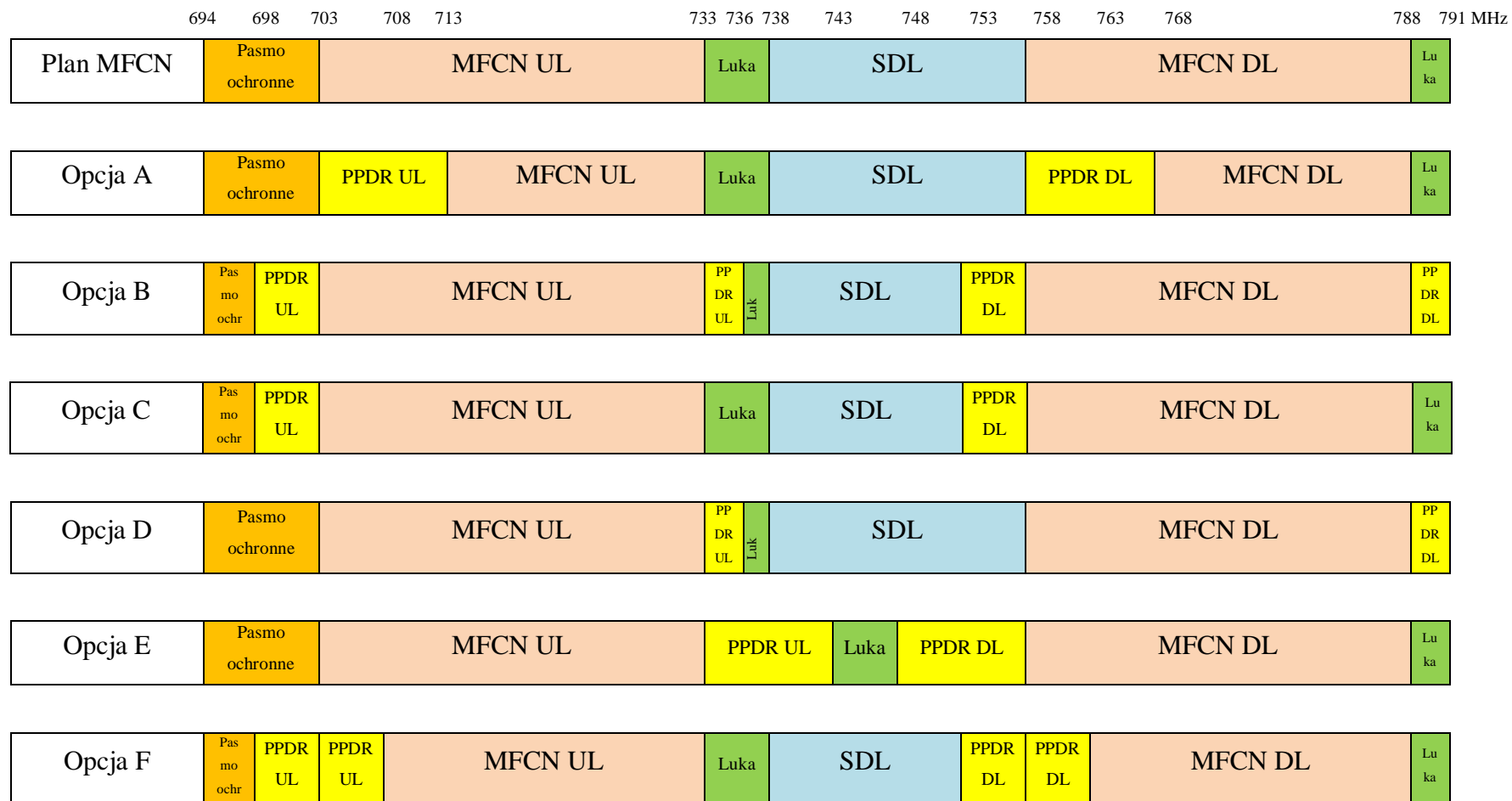
Z badań wynika, że przy relatywnie niskich mocach nadajników DTT zapewniona jest ochrona odbioru dla systemów MFCN w podzakresie 703 – 733 MHz. Jednak przy dużych mocach nadajników telewizyjnych pracujących w kanałach sąsiednich, tzn. w kanałach bliskich kanałowi 49, powyżej 69 dBm, potrzebne są dodatkowe środki zwiększające izolację odbiorników systemu LTE od systemu DTT, głównie ze względu na blokowanie odbiorników, może być to np. dodatkowa filtracja przychodzących sygnałów.

## 2.2 PPDR

Służby PPDR mają za zadanie w dziedzinie ochrony publicznej (PP) zapewnić bezpieczeństwo publiczne, czyli zapewnić przestrzeganie prawa i porządku, zabezpieczać życie i mienie obywateli oraz reagować podczas różnych wypadków spowodowanych działalnością człowieka. Natomiast w dziedzinie pomocy ofiarom klęsk żywiołowych (DR) powinny wykazać się skutecznym działaniem podczas istotnej dezorganizacji funkcjonowania społeczeństwa stwarzającej znaczne powszechne zagrożenie dla ludzkiego życia, zdrowia, mienia i środowiska. Niezbędne jest więc zapewnienie im odpowiedniego zasobu widmowego, aby umożliwić ich sprawne i skuteczne działanie. Ocenia się, że wystarczającym zasobem widmowym dla tego celu jest 2x10 MHz [1.3], który w całości lub częściowo może być zrealizowany w paśmie 700 MHz.

W Sprawozdaniu 53 CEPT [2.2] rozpatrywano możliwości aranżacji częstotliwości w paśmie 700 MHz różnych systemów, w tym, PPDR, o tyle w Sprawozdaniu ECC 218 [2.4] przedstawiono sześć wariantów wykorzystania luki duplexowej oraz pasm ochronnych jedynie dla potrzeb systemów PPDR i MFCN (bez PMSE oraz IoT-M2M). Warianty te,

których jest o trzy więcej, niż w sprawozdaniu [2.2] – patrz rys. 2.2, przedstawione są na rys. 2.3, gdzie zestawiono je ze wstępnym projektem (plan MFCN) z decyzji [2.1].



Rys. 2.3 Opcje obsadzenia systemów PPDR w luce dwupłaskowej i w części pasm ochronnych

Wszystkie te rozwiązania wariantowe zostały poddane badaniom kompatybilnościowym (PPDR w stosunku do MFCN oraz do telewizji cyfrowej zajmującej częstotliwości poniżej 694 MHz), rezultaty których zostały opublikowane w Sprawozdaniu ECC 239 [2.5]. Badania te wykazały, że ze względu na brak kompatybilności wykluczona być musi opcja E (rys. 2.3), natomiast inne opcje są dopuszczalne pod warunkiem dokonania pewnych działań redukujących możliwość zakłóceń, takich jak: nie przekraczanie określonych wartości mocy terminali i stacji bazowych zawartych w maskach krawędzi mocy BEM, czy stosowanie dodatkowej filtracji.

### 2.3 PMSE

Zgodnie z zapisami Europejskiej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości ECA [2.6] systemy PMSE mogą pracować w zakresie 470 – 789 MHz na zasadzie drugiej ważności jako urządzenia wspomagające radiodifuzję i służące do tworzenia programów, takie jak np. mikrofony bezprzewodowe, które muszą spełniać ograniczenia mocy określone w Zaleceniu ERC 70-03 [2.7].

W paśmie 700 MHz sprawozdanie [2.2] określa podzakresy częstotliwości (694 – 703 MHz oraz 733 – 758 MHz, patrz rys. 1.2), w których możliwe jest użytkowanie systemów PMSE. Nie wyklucza to wykorzystywania systemów PMSE na zasadzie kognitywności, w lukach przestrzeni widmowej całego pasma 700 MHz. Podczas Konferencji WRC15 opracowano Uchwałę dotyczącą pasma 700 MHz (Uchwała COM4/4), w której zachęca się administracje do wykorzystywania dostępnych luk i pasm ochronnych do celów PMSE, zgodnie z Uchwałą ITU-R 59. Ostateczna decyzja o sposobie wykorzystania luki duplexowej pozostaje w gestii narodowych Administracji Łączności.

Należy jednak podkreślić, że nie ma jak dotychczas decyzji, w której wyznaczono by zakresy częstotliwości dla potrzeb PMSE. Natomiast w Decyzji ECC (15)01 [2.1] dotyczącej m.in. harmonizacji widma w paśmie 700 MHz nie uwzględniono explicite zakresów przeznaczonych dla PMSE, co może oznaczać, że będą kłopoty w eksploatacji urządzeń PMSE wykorzystujących dotychczasowo częstotliwości w tym paśmie oraz instalacji nowych. Jak wiadomo, w ramach tej decyzji rozpatrywane są jedynie opcje harmonizacji systemów MFCN (IMT) oraz PPDR, co zilustrowano na rys. 2.1. Pomimo tego, wychodząc naprzeciw tendencjom zagospodarowania pasma 700 MHz przez systemy PMSE, w ramach CEPT opracowano Sprawozdanie ECC 221 [2.8], w którym rozpatrywana jest kompatybilność pomiędzy systemami PMSE umieszczonymi hipotetycznie w podzakresie 733 – 758 MHz a systemami MFCN, które będą pracować w podzakresach sąsiednich.

Przedstawione tam wyniki pokazują, że nie zawsze w równoległej pracy systemów PMSE oraz MFCN będzie zachowana kompatybilność. Krytyczną sytuacją jest praca mikrofonów bezprzewodowych w obecności terminali użytkownika systemów MFCN. W sprawozdaniu określono ograniczenia mocy mikrofonów bezprzewodowych przenośnych oraz umieszczanych na ciele użytkownika w celu zapewnienia niezbędnej kompatybilności. Zaznaczono przy tym uwagę, że identyczna sytuacja będzie miała miejsce, gdy systemy PMSE pracować będą w podzakresie 694 – 703 MHz.

## 2.4 M2M

Jednym z systemów, które przewidziane są do wykorzystywania pasma 700 MHz są systemy Internetu Rzeczy IoT, w których główną rolę odgrywają systemy urządzenie-urządzenie M2M (ang. machine-to-machine). Systemy IoT wdrażane będą nie tylko w paśmie 700 MHz, w ITU-R prowadzone są obecnie badania nad rozległopasmowymi systemami M2M, które będą rozwijane w różnych zakresach częstotliwości powyżej 20 GHz. Problemy związane z alokacją systemów M2M poruszone zostaną na kolejnej Światowej Konferencji Radiokomunikacyjnej w 2019 r.

Systemy urządzenie-urządzenie obejmują aplikacje i urządzenia do radiokomunikacji typu B2B (business-business), B2B2C (business-business-konsument) oraz B2C (business-konsument). Domeny M2M obejmują szeroką gamę rynków takich jak transport, służba zdrowia, energia, handel, bezpieczeństwo publiczne, budownictwo i in. Część z nich może być zgrupowana według funkcjonalności np. podczas automatyzacji prowadzonej w mieście (czasem zwanej Inteligentnym Miastem) wyróżnić można automatyzację obsługi obiektów, motoryzacji (telematykę) czy np. mobilną opiekę zdrowotną.

Obecnie aplikacje M2M mogą być wykorzystywane w sieciach MFCN przy użyciu zarówno techniki GSM (kanały o szerokości pasma 200 kHz) jak i UMTS, czy LTE (kanały o szerokości pasma 1,4 MHz i 3 MHz) pod warunkiem stosowania odpowiednich interfejsów pomiędzy urządzeniami. Równocześnie stowarzyszenie 3GPP zajmuje się m.in. opracowaniem „czystego” standardu M2M, w którym kanały miałyby mieć szerokość 200 kHz i który miałby parametry przepustowości oraz parametry kompatybilnościowe porównywalne z parametrami systemu GSM [2.9].

Z rozważań przedstawionych w projekcie Sprawozdania ECC 242 [2.9] wynika, że systemy M2M (M2M-LTE i M2M-GSM) implementowane w paśmie 700 MHz mogą spotkać się z interakcją w następujących konfiguracjach:



- M2M ↔ MFCN 700/800;
- M2M ↔ MFCN SDL;
- M2M ↔ PMSE;
- M2M ↔ PPDR.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń symulujących sytuacje ewentualnych konfliktów pomiędzy systemami M2M i pozostałymi systemami wskazują, że w przypadku interakcji:

- M2M ↔ MFCN 700/800 – praktycznie nie ma ograniczeń w lokalizacjach stacji obu systemów, gdyż aranżacja kanałów systemów MFCN jest taka, że z ew. podzakresem przeznaczonym dla M2M sąsiadują podzakresy, w których ulokowano łącza „w dół” i to zarówno w paśmie 700 MHz jak i w paśmie 800 MHz ;
- M2M ↔ MFCN SDL – wpływ obu systemów na siebie jest bardzo ograniczony, jedynie w przypadku kolokacji anten obu systemów wymagany jest odstęp częstotliwości roboczych równy minimum 2 MHz, należy również zastosować specjalną filtrację w odbiornikach stacji M2M;
- M2M ↔ PMSE – współistnienie jest możliwe, jeżeli systemy PMSE zachowają poziomy promieniowania pozapasmowego zgodne z [2.8] oraz w stosunku do łącza M2M „w górę” zostanie zachowany odstęp co najmniej 1 MHz;
- M2M ↔ PPDR – nie rozpatrywano przypadku, gdy pasmo przeznaczone dla PPDR ma szerokość 2x10 MHz, natomiast gdy pasmo to wynosi 5 MHz (opcje B, C, E na rys. 2.2) wnioski są takie same, jak w przypadku MFCN SDL.

Tym samym, systemy M2M mogą być wykorzystywane pod pewnymi warunkami w paśmie 700 MHz na tym samym obszarze, co inne systemy wymienione powyżej.

## 2.5 Podsumowanie

Z analizy możliwości implementacji różnych systemów (MFCN, PPDR, PMSE i M2M) w zakresie 694 – 790 MHz wynika, że możliwe jest tam ich współistnienie pod warunkiem zachowania kompatybilności elektromagnetycznej [2.5, 2.8, 2.9]. Systemy te mogą współużytkować pasmo 700 MHz pracując w podzakresach do siebie przylegających (jak na rys. 2.2 i 2.3), bądź nawet równolegle, w tych samych podzakresach, zachowując odpowiednie metryki w wielowymiarowej przestrzeni widmowej. Niewykluczona jest więc też możliwość kognitywnego wykorzystania tego zakresu, co w efekcie zapewni zwiększenie efektywności wykorzystania widma częstotliwości radiowych na zadanym obszarze.

Z tych samych założeń wyszła Komisja Europejska przygotowując poprzez swój organ, Komitet Widma Radiowego RSC, decyzję implementującą harmonizację widma w zakresie 694 – 790 MHz [1.10]. W projekcie tej decyzji przewiduje się wykorzystanie systemów:

- MFCN 700 w podzakresach 703 – 733 MHz i 758 – 788 MHz, czyli tak jak na rys. 2.1;
- MFCN SDL w podzakresach 738 – 758 MHz lub 738 – 753 MHz;
- PPDR w podzakresach 698-736 MHz i 753-791 MHz (różne warianty na rys. 2.3;
- PMSE w podzakresach 694-703 MHz i 733-758 MHz (por. rys. 2.2);
- IoT (M2M) w podzakresach 733-736 MHz i 788-791 MHz (por. rys. 2.2).

Jak widać, zakresy zastosowań poszczególnych systemów się ze sobą często pokrywają, stąd wniosek, że zachowując odpowiednie warunki kompatybilności można będzie wykorzystywać te systemy w tej samej przestrzeni widmowej, czasem również na zasadzie działania radia kognitywnego.

## 2.6 Literatura do rozdziału 2:

- [2.1] - CEPT ECC: *Harmonised technical conditions for mobile/fixed communications networks (MFCN) in the band 694-790 MHz including a paired frequency arrangement (Frequency Division Duplex 2x30 MHz) and an optional unpaired frequency arrangement (Supplemental Downlink)*, ECC Decision ECC/DEC/(15)01, Approved 06 March 2015,
- [2.2] - CEPT: “*To develop harmonised technical conditions for the 694-790 MHz ('700 MHz') frequency band in the EU for the provision of wireless broadband and other uses in support of EU spectrum policy objectives*”, Report A from CEPT to the European Commission in response to the Mandate, CEPT Report 53, 28 November 2014,
- [2.3] - Grzybowski M.J.: *Systemy PPDR w przestrzeni widmowej II dywidendy cyfrowej*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 4/2015, vol. LXXXVII, s. 477 – 480,
- [2.4] - CEPT ECC: *Harmonised conditions and spectrum bands for the implementation of future European broadband PPDR systems*, ECC Report 218, Approved October 2015,
- [2.5] - CEPT ECC: *Compatibility and sharing studies for BB PPDR systems operating in the 700 MHz range*, ECC Report 239, Approved 30 September 2015,
- [2.6] - CEPT ECC: *The European Table of Frequency Allocations and Applications in the Frequency Range 8.3 kHz to 3000 GHz (ECA Table)*, Approved May 2015, ERC Report 25,
- [2.7] – CEPT ECC: 70-03 Recommendation, *Relating to the use of Short Range Devices (SRD)*, Tromsø 1997, Subsequent amendments 30 September 2015,
- [2.8] – CEPT ECC; *Adjacent band compatibility between MFCN and PMSE audio applications in the 700 MHz frequency band*, ECC Report 221, Approved September 2014,
- [2.9] – CEPT ECC: *Compatibility and sharing studies for M2M applications in the 733-736 MHz / 788-791 MHz band*, Draft ECC Report 242,
- [2.10] – European Commission, Radio Spectrum Committee, *Draft Commission Implementing Decision on the harmonisation of the 694-791 MHz frequency band for systems capable of providing electronic communications services and for flexible national use in the Union*, Working Document, RSCOM15-42, Brussels, 21 September 2015

### **3 Metody zwiększenia efektywności wykorzystania widma radiowego**

Intensywny rozwój sieci bezprzewodowych i prognozowany gwałtowny wzrost ruchu w tych sieciach (np. do celów M2M, Internetu, transmisji obrazu i głosu, IoT) wymusza prace badawcze zmierzające do zwiększenia efektywności wykorzystania zasobów widma radiowego. Tradycyjny sposób wykorzystania widma, polegający na wyłączności, nie wystarcza i traci na znaczeniu. Coraz częściej mówi się o dynamicznym współużytkowaniu tej samej części widma radiowego przez różne systemy (np. telewizyjne i M2M) pod warunkiem zachowania warunków kompatybilności elektromagnetycznej. Obecnie na świecie trwają intensywne prace badawczo-rozwojowe, standaryzacyjne i przed-wdrożeniowe w tej dziedzinie: nowe systemy wykorzystujące techniki Cognitive Radio i TV White Space są obecnie testowane i pilotażowo uruchamiane w różnych krajach.

W ramach tej pracy dokonano przeglądu podstawowych problemów dotyczących efektywności wykorzystania widma radiowego, niezależnie od technologii i konkretnych zastosowań. Wykazano, że obecne praktyki i doktryny wykorzystania widma wynikają z doświadczeń zdobytych w przeszłości i mają często na celu krótko-terminowe korzyści wąskich grup interesów. Zwrócono uwagę, że efektywne wykorzystanie widma zależy nie tylko od czynników technologicznych, ale w bardzo silnym stopniu także od czynników poza-technicznych. Podsumowano ważniejsze argumenty i wnioski formułowane w okresie począwszy od powstania pierwszych radiotelegrafów do dzisiaj. Warto je przypomnieć w obecnych dyskusjach nad tym jak rozwiązać problem braku wolnych częstotliwości, który utrudnia dalszy rozwój radiokomunikacji, jak powszechnie się uważa. Przedstawiono ważniejsze doktryny, aby lepiej zrozumieć jak mechanizmy zarządzania widmem wiążą się z innymi procesami społecznymi, z interesem publicznym oraz z dystrybucją informacji, wiedzy, kultury, bogactwa i władzy. Wskazano na podobieństwa, jakie istnieją między ochroną widma radiowego i ochroną przyrody. Zwrócono uwagę na szkodliwą społecznie rolę lobbingu i niejawnych porozumień. Podkreślono konieczność współpracy, jawności i bezpośredniego udziału wszystkich użytkowników w proces zarządzania widmem radiowym. Wskazano elementy, które mogą - jak się wydaje - być poprawione bez wielkich nakładów materialnych, dzięki dobrej woli, otwartym negocjacjom, konsensusowi i lepszej organizacji wszystkich zainteresowanych.

Pełny raport z pracy, przygotowany przez prof. Ryszarda Strużaka przy współpracy z dr Terje Tjelta z Norwegii oraz z dr Jose' P. Borrego z Portugalii w języku angielskim, jest przedstawiony w załączeniu (Załącznik 1). Po pozytywnym zaopiniowaniu przez 2 anonimowych recenzentów i po niewielkich poprawkach, został on opublikowany w Radio Science Bulletin URSI No 354 September 2015 str. 11-36 pod tytułem: „**On Radio-Frequency Spectrum Management**”.

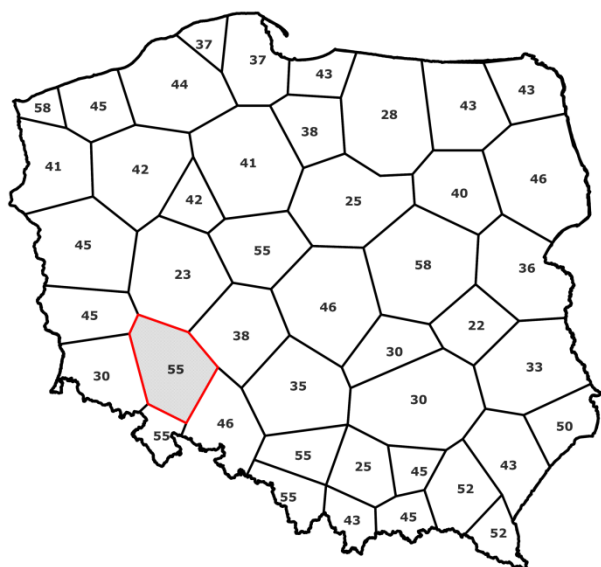
## **4 Możliwości wykorzystywania wolnych kanałów TV do celów radia kognitywnego**

W celu zwiększenia efektywności wykorzystywania widma radiowego aktualnie prowadzone są na świecie prace badawcze głównie w obszarze radia kognitywnego, którego istota bazuje na analizie, obserwacji i inteligentnej reakcji na zmieniające się środowisko radiowe [4.1]. Obserwacja i analiza bazuje z reguły na lokalnej analizie widma radiowego (sensing widma) jak i na wykorzystaniu zasobów bazodanowych gromadzących informację o chwilowym stanie zajętości widma. Jednym z pierwszych praktycznych obszarów wykorzystania systemów radia kognitywnego są systemy wykorzystujące tzw. białe przestrzenie widma pasm telewizyjnych (TV White Spectrum TV WS), które wykorzystują lokalnie wolne kanały telewizyjne. Informacja o lokalnie wolnych kanałach (wraz z dopuszczalnymi parametrami urządzeń TV WS – White Space Devices WSD) trafia do bazy danych geolokalizacyjnych, z której, po podłączeniu do niej i podaniu swojej lokalizacji geograficznej, urządzenia WSD odbierają informację o dostępnych zasobach widma radiowego [4.2]. Zapewnienie bazy danymi o wolnych kanałach telewizyjnych poprzedzone jest szczegółową analizą dostępności widma radiowego w poszczególnych miejscach. W niniejszym rozdziale dokonano analizy dostępnych zasobów widma radiowego kanałów TV we Wrocławiu, w siedzibie IŁ-PIB, pod kątem możliwości późniejszego wykorzystania tych zasobów do celów realizacji transmisji testowych TV WS.

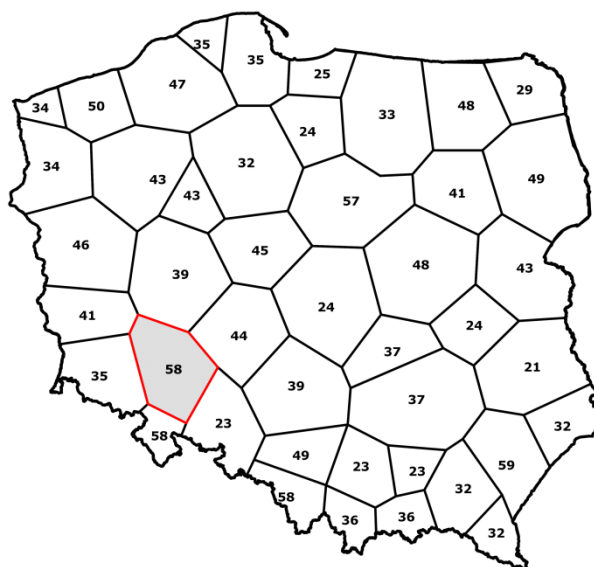
Zgodnie z Planem GE06 [4.3] na potrzeby emisji naziemnej telewizji cyfrowej dla Polski zatwierdzono 6 ogólnopolskich multipleksów cyfrowych (MUX1-MUX6) w zakresie częstotliwości UHF 470-790 MHz.

Aktualnie ogólnopolskie emisje DVB-T prowadzona są w multipleksach MUX1-4 (MUX1-3 z programami niekodowanymi oraz MUX4 z programami kodowanymi), natomiast częstotliwości multipleksów MUX5 i MUX6 są niewykorzystywane. Dodatkowo prowadzone są emisje o zasięgu lokalnym dla obszarów: Świdnica/Wrocław k24, Głogów/Legnica/Lubin k43, Częstochowa1/Kamieńsk/Tomaszów k 36, Ornontowice/Rybnik k47, Lubiąż/Jelenia Góra/Bolesławiec/Chojnów k38.

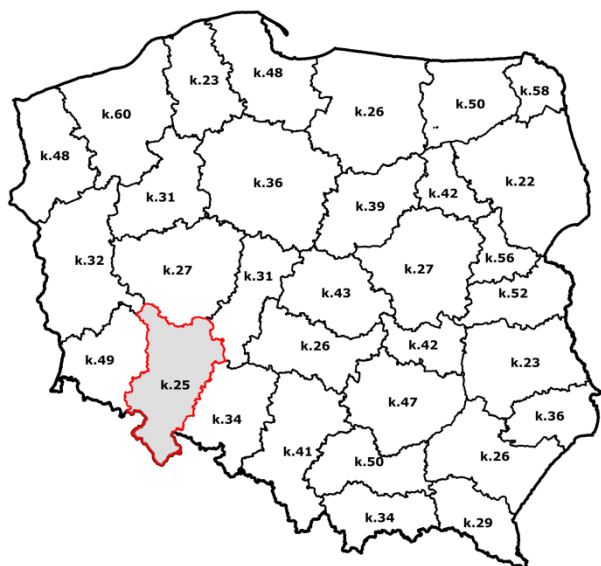
Poniżej przedstawiono mapy kanałowe z zaznaczonymi obszarami rezerwacji częstotliwości dla obszaru Wrocławia.



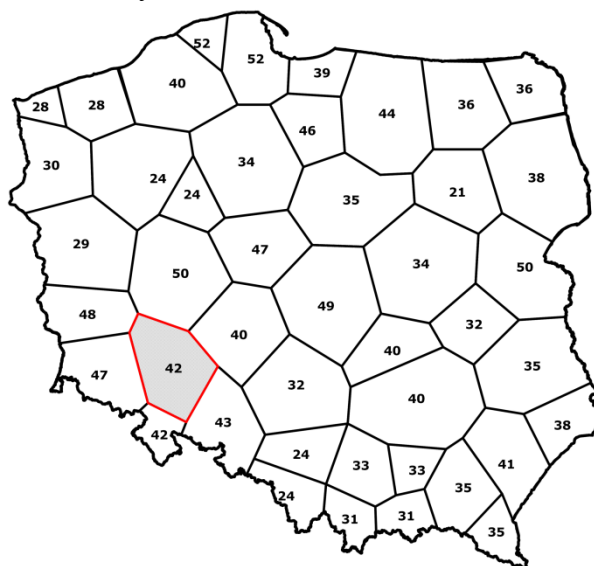
Rys. 4.1 Mapa kanałowa obszarów wykorzystania częstotliwości DVB-T dla MUX1



Rys. 4.2 Mapa kanałowa obszarów wykorzystania częstotliwości DVB-T dla MUX2

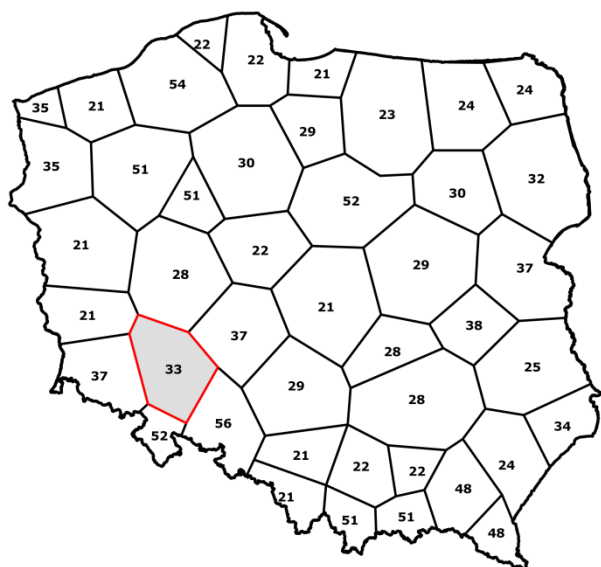


Rys. 4.3 Mapa kanałowa obszarów wykorzystania częstotliwości DVB-T dla MUX3

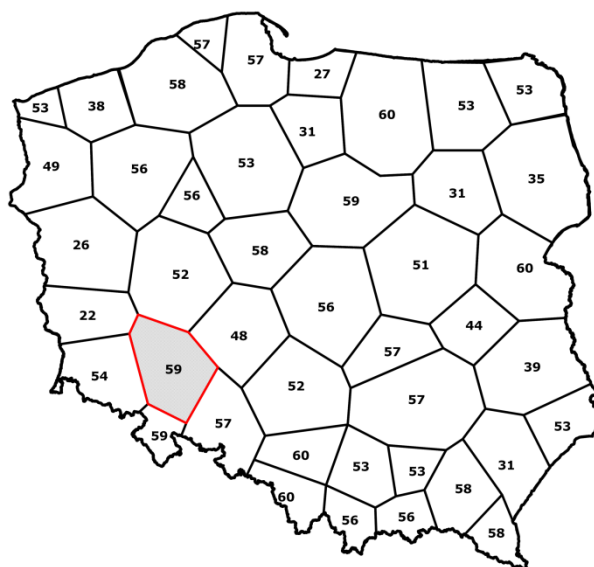


Rys. 4.4 Mapa kanałowa obszarów wykorzystania częstotliwości DVB-T dla MUX4





Rys. 4.5 Mapa kanałowa obszarów wykorzystania częstotliwości DVB-T dla MUX5



Rys. 4.6 Mapa kanałowa obszarów wykorzystania częstotliwości DVB-T dla MUX6



Rys. 4.7 Mapa w wykorzystania częstotliwości DVB-T dla emisji o zasięgu lokalnym

Głównym kryterium w analizie dostępności kanału jest ochrona rzeczywistych zasięgów stacji DVB-T. W analizie nie uwzględniano pozostałych systemów mogących pracować w paśmie TV (ARNS, PMSE, RAS).

Podstawowym założeniem metodologii wyznaczania białych przestrzeni widma zapewniającej ochronę rzeczywistych zasięgów stacji DVB-T, jest traktowanie urządzeń WSD jako dodatkowych analogicznie do uzupełniających Plan GE06 stacji TV.

Do analizy przyjęto następujące warunki :



- ochrony rzeczywistych stacji DVB-T bazująca na parametrach zgodnie z GE06, dla 95% lokalizacji, anteny odbiorczej zawieszanej na 10 m n.p.t z charakterystyką dookólną.
- obliczenia zakłóceń metodą ITU-R P.1546-5 dla 1% czasu i 50% lokalizacji;
- Agregacja zakłóceń od większej ilości urządzeń WSD nie przekraczająca istniejących poziomów zakłóceń od stacji DVB-T;
- Sąsiednie kanały (n+1, n-1) chronione są na całym obszarze.

W tabeli **4.1** przedstawiono parametry techniczne dla których wykonano analizę.

Tabela 4.1. Wartości parametrów wykorzystane do analizie

Maksymalny dopuszczalny poziom zakłóceń dla obszaru zasięgu DVB-T	56 dB $\mu$ V/m
Współczynnik ochronny	21 dB
Korekta prawdopodobieństwa lokalizacji	13 dB
Agregacja zakłóceń	10 dB

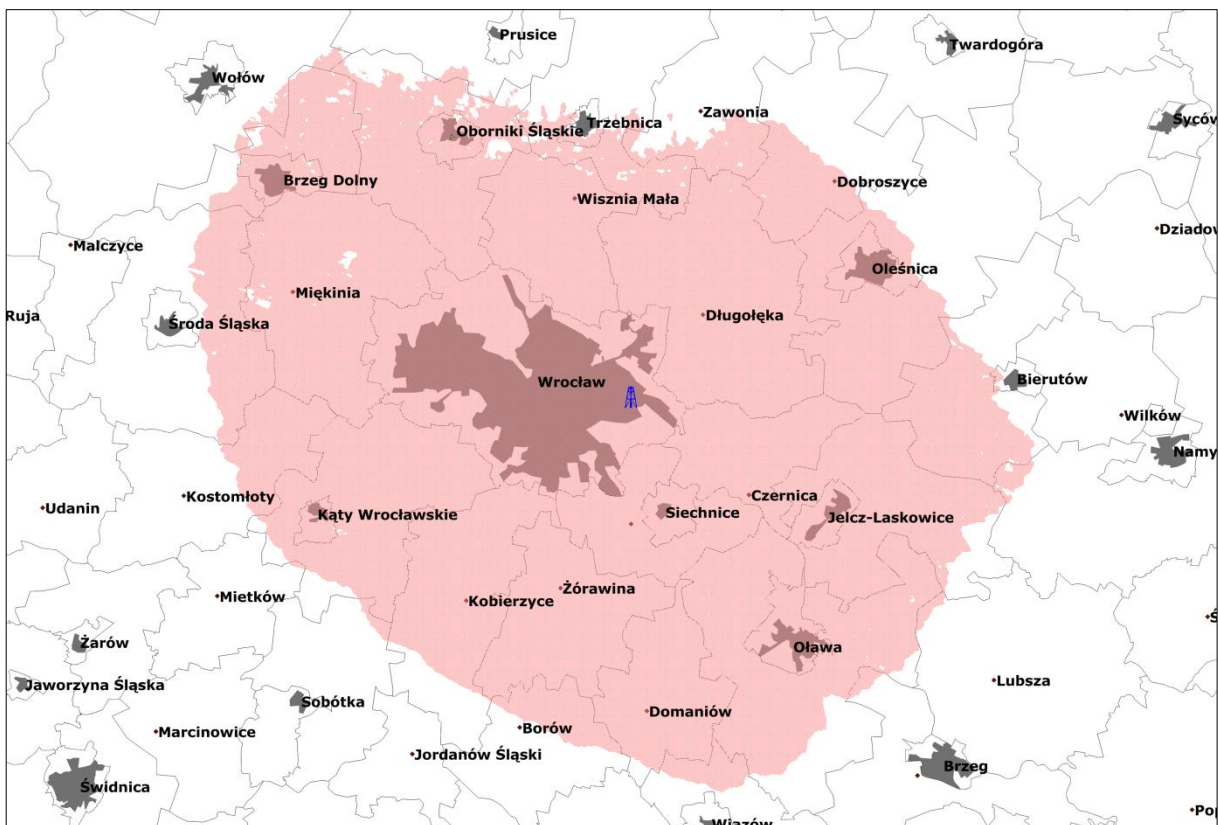
Dopuszczalny poziom zakłóceń w tych warunkach wyniósł 12 dB $\mu$ V/m.

Do analizy przyjęto parametry stacji nadawczej przestawione w tabeli nr 4.2.

Tabela 4.2. Parametry obiektu nadawczego przy ul. Swojczyckiej 38 we Wrocławiu

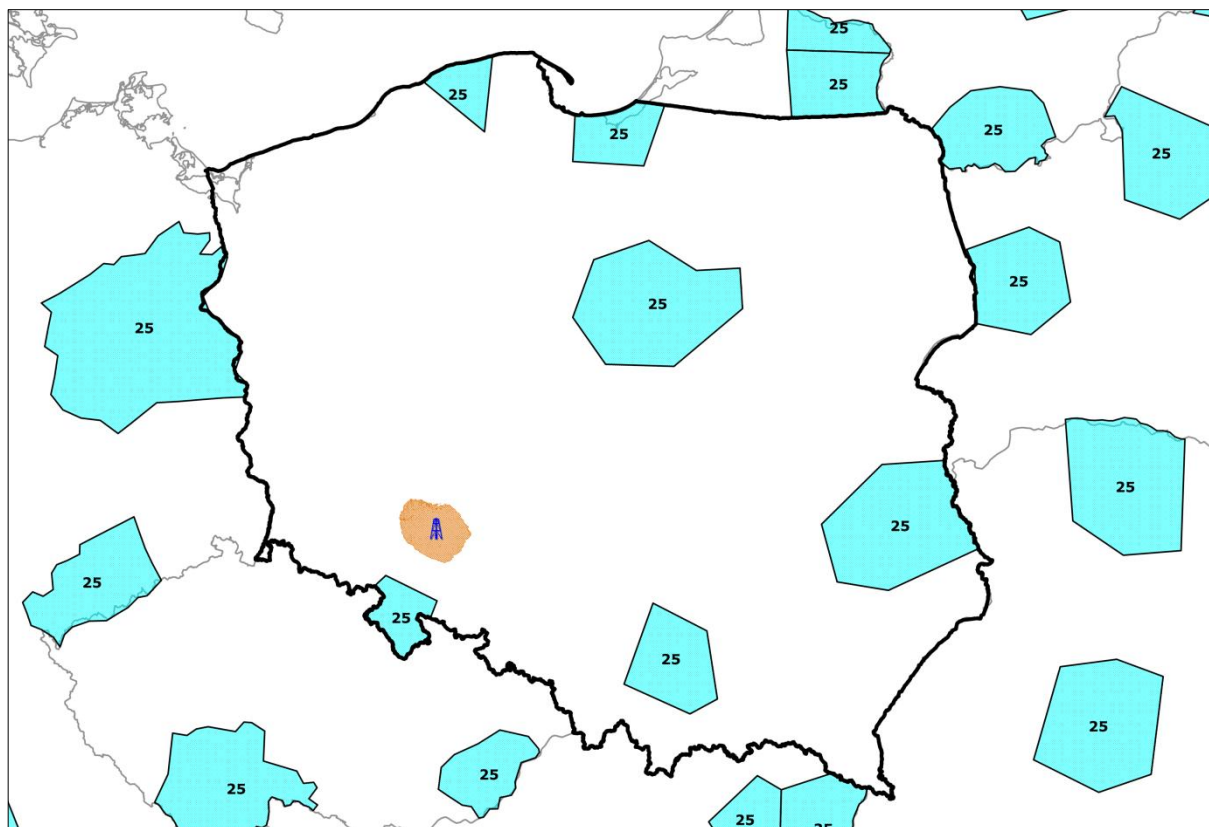
Długość geograficzna	Szerokość geograficzna	Wysokość posadowienia anteny [ m n.p.m.]	Wysokość zawieszenia anteny [m n.p.t.]	ERP [ W ]	Charakterystyka anteny	Częstotliwość [ MHz]
17E6'48"	51N06'55"	115	20	4	ND	626

Sygnał zakłócający analizowany metodą ITU P.1546-5 jest reprezentowany przez natężenie pola przekraczane w 50% miejsc i 1% czasu dla natężenia pola 12 dB $\mu$ V/m. Zasięg zakłóceniuowy przedstawiona na rysunku nr 4.1.

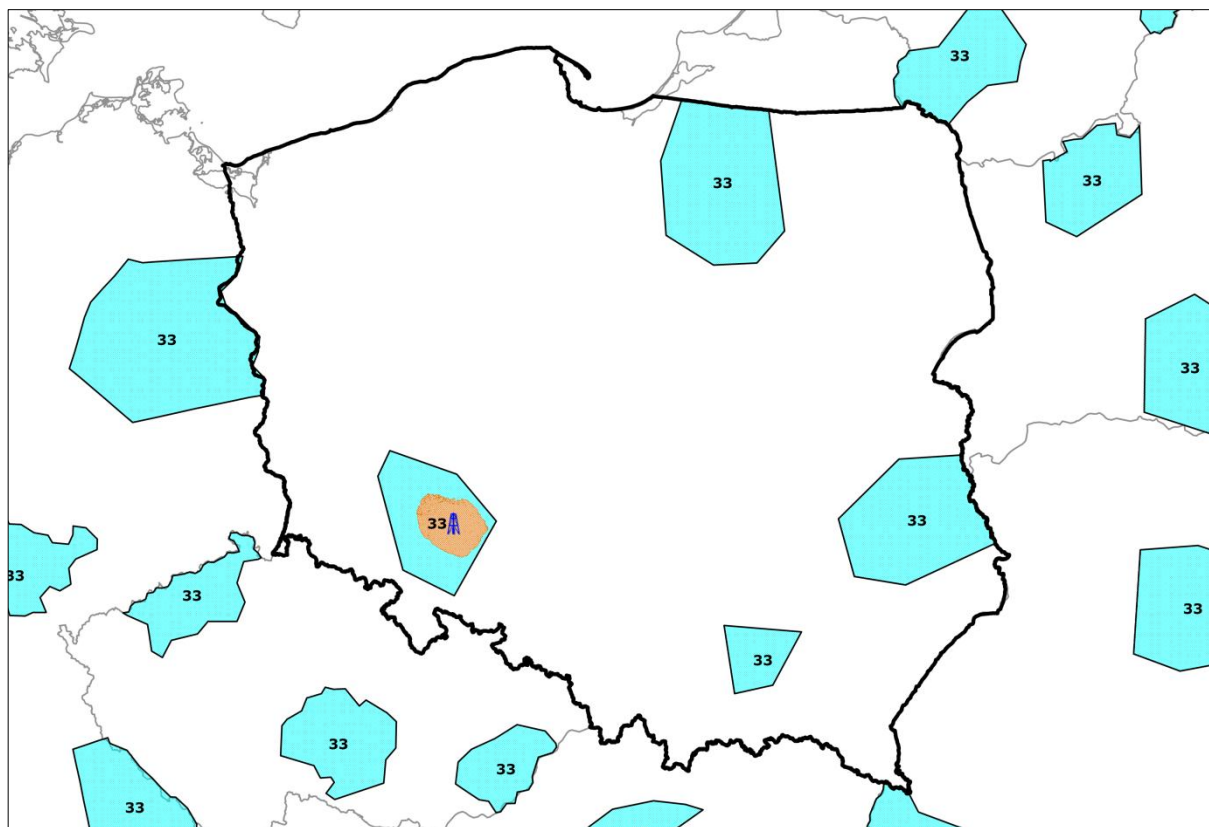


Rys. 4.1. Obszar zakłóceń dla natężenia pola 38 dB $\mu$ V/m

Przykładowa analiza kompatybilności zgodnie z zasadami GE06 oceniająca wypadkowe zakłócenia sieci SFN pokazana jest na Rysunku 4.2 oraz 4.3.



Rys. 4.2. Obszar zakłóceń dla natężenia pola  $12 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  (kanał analizowany 25)



Rys. 4.3. Obszar zakłóceń dla natężenia pola 12 dB $\mu$ V/m (kanał analizowany 33)

Nr kanału	Wykorzystanie kanału	Dostępność kanału
21		✓
22		✓
23	ochrona sąsiedniego kanału (k24)	✗
24	lokalna emisja na obszarze Świdnica\Wrocław	✗
25	ochrona sąsiedniego kanału (k24)	✗
26		✓
27		✓
28		✓
29		✓
30		✓
31		✓

Nr kanału	Wykorzystanie kanału	Dostępność kanału
32	ochrona sąsiedniego kanału (k33)	X
33	emisja na obszarze rezerwacji częstotliwości Wrocław w ramach MUX 3	X
34	ochrona sąsiedniego kanału (k33)	X
35		✓
36		✓
37		✓
38		✓
39		✓
40		✓
41	ochrona sąsiedniego kanału (k42)	X
42	emisja na obszarze rezerwacji częstotliwości Wrocław w ramach MUX 4	X
43	ochrona sąsiedniego kanału (k42)	X
44		✓
45		✓
46		✓
47		✓
48		✓
49		✓
50		✓
51		✓
52		✓
53		✓
54	ochrona sąsiedniego kanału (k55)	X
55	emisja na obszarze rezerwacji częstotliwości Wrocław w ramach MUX 1	X
56	ochrona sąsiedniego kanału (k55)	X
57	ochrona sąsiedniego kanału (k58)	X
58	emisja na obszarze rezerwacji częstotliwości Wrocław w ramach	X

Nr kanału	Wykorzystanie kanału	Dostępność kanału
	MUX 2	
59	obszar rezerwacji częstotliwości Wrocław w ramach MUX 6	<b>X</b>
60	ochrona sąsiedniego kanału (k59)	<b>X</b>

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono iż dla obszaru gminy Wrocław dostępne są 24 kanały z zakresu 470 – 790 MHz

### Literatura

- [4.1] Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal J. MITOLA, GERALD Q. MAGUIRE, JR., IEEE Personal Communications, August 1999
- [4.2] R. Strużak, D. Więcek: Regulatory issues for TV White space in TV White Spaces. A pragmatic approach, ICTP. The Abdus Salam International Centre for. Theoretical Physics, Trieste, Italy, 2013
- [4.3] Final Acts of the RRC-06, Genewa June, 2006

## 5 Transmisje testowe TV WS

### 5.1 Aktualny stan rozwiązań systemów TV WS

W ramach niniejszej pracy dokonano przeglądu obecnie wykorzystywanych na świecie rozwiązań urządzeń WSD (White Space Devices – urządzenia pracujące w tzw. wolnych „białych” przestrzeniach widma w paśmie telewizyjnym - TV White Space). Celem tego przeglądu było wyszukanie rozwiązań komercyjnych, które są dostępne na rynku, a które można by wykorzystać do realizacji transmisji testowych. Większość rozwiązań, z którymi spotkali się wykonawcy niniejszej pracy, to rozwiązania bazujące na GNU radio lub innych rozwiązaniach o raczej testowo-badawczym charakterze. Autorom nie udało się wyszukać stosownych dostępnych rozwiązań komercyjnych pozwalających na zakup do celów testowych transmisji w tzw. białych przestrzeniach (WS) pasma (470 MHz - 790 MHz) naziemnej telewizji cyfrowej DVB-T. Stan ten może wynikać z tego, iż obecnie tylko w niektórych krajach (tj. USA, UK, Singapur) i od niedawna (w UK od 2015r.) dopuszczalne jest wykorzystywanie pilotażowe i komercyjne urządzeń typu WSD. Obecne projekty zapisów normatywnych nadal są rozwijane, zaś presja rynku nie jest dostatecznie silna aby wymusić na producentach rozwiązań komercyjnych rozpoczęcie produkcji powszechnie dostępnych („półkowych”) rozwiązań. Na taki stan sytuacji rynkowej w szczególny sposób wpływa również brak dostępnych baz danych geolokalizacyjnych zawierających na bieżąco aktualizowane informacje o dostępnych kanałach na zadanych obszarach oraz jasno określonych zaleceń co do sposobu korzystania z tych baz danych, poza kilkoma krajami na świecie (USA, UK, Singapur). Bez odpowiednich baz danych realizacja idei urządzenia WSD pracującego w obszarach dozwolonych może być wręcz niemożliwa. Prowadzenie i nadzorowanie baz danych wymagałoby ich powiązania nie tylko z aktualnymi danymi uzyskiwanymi z urzędów zarządzających widmem na danym obszarze, ale również z danymi odnoszącymi się do pozwoleń czasowych na użytkowanie widma, co wymaga wcześniejszych rozwiązań legislacyjnych. Dodatkowo w ramach weryfikacji stanu rynku rozwiązań komercyjnych przeprowadzono pod koniec 2015 roku ponowną weryfikację powyższych informacji, z której wynika, że urządzenia takie nadal nie są powszechnie dostępne, jedynie zwiększyła się liczba rozwiązań badawczo-rozwojowych i pilotażowych bazujących na zastosowaniach softwarewych, a nie na typowych komercyjnych rozwiązaniach WSD.



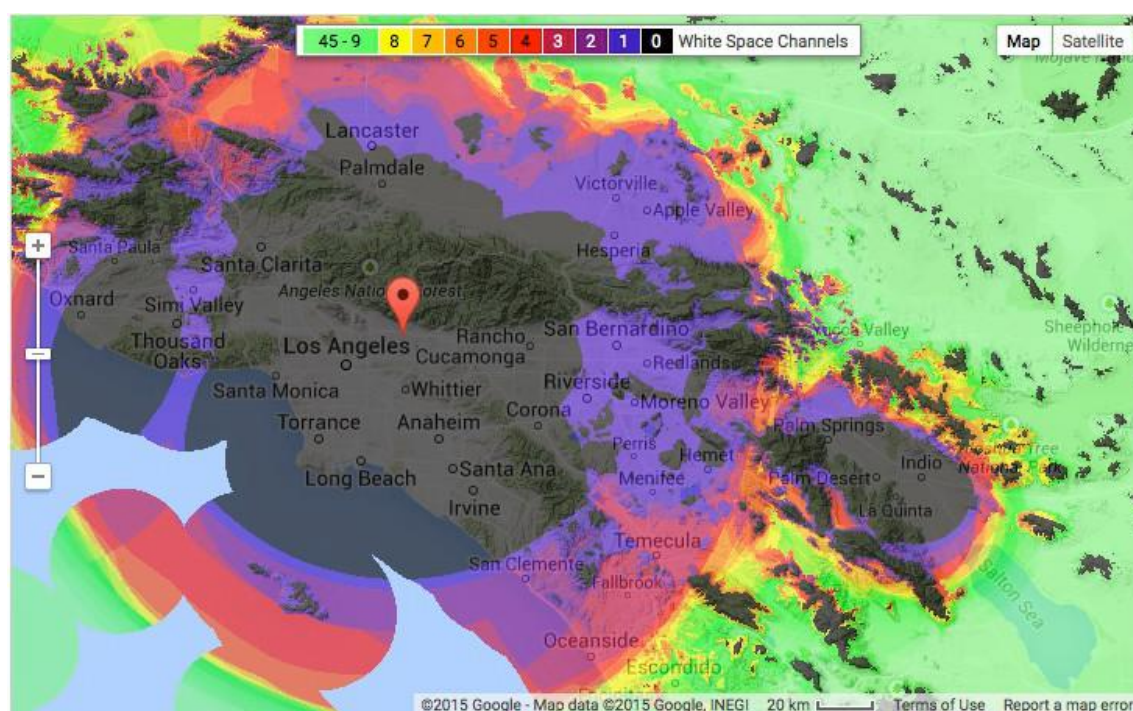
Odnosząc się do problemów prawnych związanych z istnieniem WSD należy wspomnieć, że w 2015 roku opublikowano w USA i Wielkiej Brytanii przepisy [5.2, 5.3], w oparciu o które można już przystąpić do wykorzystywania urządzeń WSD, jednakże zasięg tej legislacji nadal nie wykracza poza pojedyncze kraje i może powodować, że dopóki nie rozpocznie się proces powszechnego normowania zasad dotyczących korzystania z WSD w większej liczbie państw, dopóty urządzenia komercyjne nie będą łatwo dostępne na rynku (w szczególności na rynku europejskim). W zakresie prac nad dopuszczaniem prawnego użycia WSD wiodą prym USA, gdzie od roku 2009 można było stosować w ograniczony sposób WSD, jednak urządzenia wtedy dopuszczone do sprzedaży nie spełniają obecnych wymagań (więcej na ten temat w dalszej części rozdziału). Jak zatem widać, obecny stan wiedzy wskazuje na to, iż mogą wystąpić dwa sposoby rozwoju zastosowań WSD: albo w Europie zacznie być dynamizowana sprawa wprowadzania uregulowań dotyczących korzystania z WSD i będzie to powiązane z rozwiązaniami ogólnoświatowymi (w szczególności opracowaniami powstającymi w USA) albo USA przyjmie takie rozwiązania, które później nie będą bezpośrednio transformowane do Europy.

Ze sposobu działania urządzeń wykorzystujących białe przestrzenie pasma telewizyjnego (WSD) wynika, iż koniecznym jest, wg przyjętego obecnie scenariusza, korzystanie z baz danych geolokalizacyjnych zawierających informacje o dostępnych zasobach widmowych dostępnych dla tych urządzeń w poszczególnych punktach geograficznych. Zagadnienie to w dalszym ciągu jest analizowane i rozwijane, nawet w krajach przodujących w tej dziedzinie (czyli w USA i Wielkiej Brytanii). Konieczne jest podjęcie odpowiednich działań prawnych powiązanych z ustanowieniem hierarchii przydzielania kanałów, co połączone musi być z bazami zawierającymi dane o zajętości widma. Ponadto takie informacje muszą być odpowiednio wcześniej zamieszczane w bazach danych, które z kolei powinny podlegać nadzorowaniu przez jednostki odpowiedzialne za gospodarkę widmem na danym obszarze (np. w Polsce to zagadnienie mogłoby podlegać nadzorowi UKE). Dodatkowo musi być zapewniony system zabezpieczający bazy danych przed wprowadzaniem do nich danych niezgodnych ze stanem faktyczny oraz system wymuszający wystarczająco wiarygodną weryfikację urządzeń korzystających z wolnych w danej lokalizacji kanałów.

O konieczności odpowiedniego analizowania zagadnień prawnych oraz administracji w zakresie baz danych kanałów dozwolonych dla WSD świadczą m.in. dotychczasowe doświadczenia związane z próbami uruchomienia transmisji systemów WSD w USA, w rejonie Kalifornii. W



wyniku pierwszych prób użytkowania urządzeń WSD, w których informację o lokalizacji urządzenia wpisywane były przez użytkowników samodzielnie (zamiast automatycznie na podstawie np. geolokalizacji), były wykorzystywane w sposób niezgodny z przyjętymi zasadami. Zaobserwowane działania polegały m.in. na podawaniu przez użytkowników, w rejonach w których brakowało zupełnie wolnych kanałów (Rys.5.1.), nieprawdziwych informacji o własnej lokalizacji w celu uruchomienia WSD. Przekłamywane przez użytkowników były dane dotyczące lokalizacji, np. teren zabudowany - teren otwarty, rodzaju zabudowy, np. pojedynczy budynek – zwarta zabudowa, położenie geograficzne – w skrajnych przypadkach podawano nawet położenie w innych krajach[5.3].



Rys. 5.1. Dostępność wolnych kanałów dla WSD w rejonie Los Angeles, USA [5.3]

Takie praktyki użytkowników WSD w USA doprowadziły do podjęcia nacisków przez nadawców telewizyjnych (National Association of Broadcasters - NAB) i producentów WSD na FCC (Federal Communications Commission) w celu wymuszenia prawnego nakazania, aby wszelkie WSD posiadały konieczną wbudowaną geolokalizację lub były zmuszone do współpracy z urządzeniami zapewniającymi poprawną geolokalizację. Tak postawione wymaganie miało na celu ochronę licencjonowanych użytkowników pasma telewizyjnego. Poza oczywistymi podstawowymi użytkownikami (nadawcami telewizyjnymi) ma to ochronić

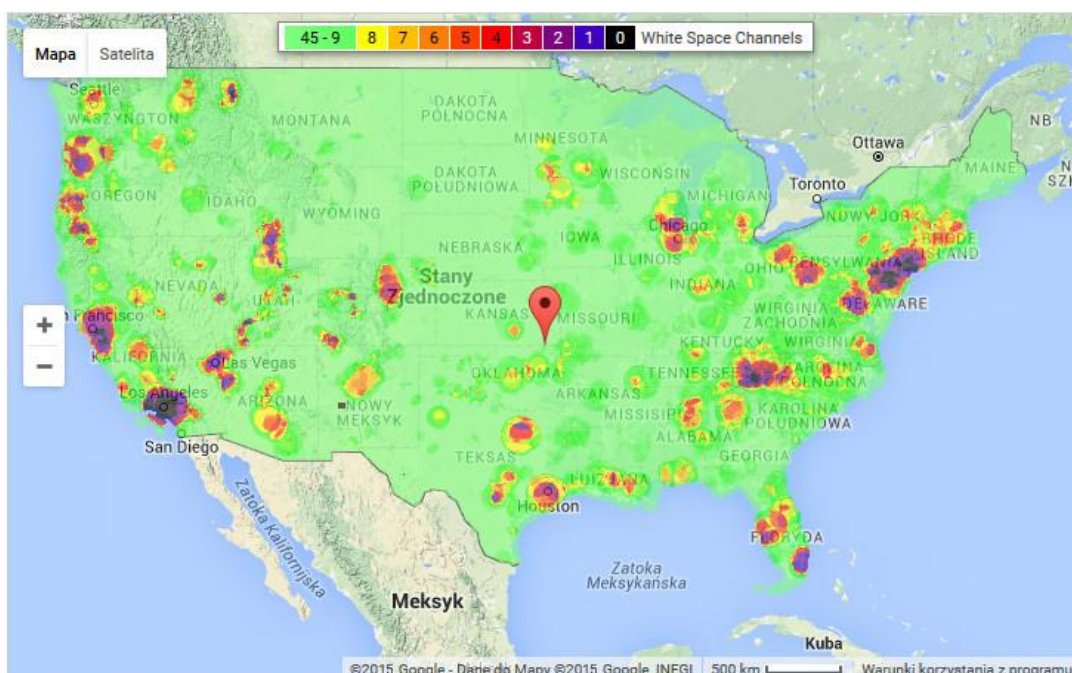
również użytkowników mikrofonów bezprzewodowych oraz urządzeń medycznych korzystających z tego pasma.

W zakresie zabezpieczania przed podobnymi praktykami użytkowników pierwszej ważności, w Wielkiej Brytanii pod koniec roku 2015 opublikowano dokument [2] dający podstawę do użytkowania WSD: „2015 No. 2066 ELECTRONIC COMMUNICATIONS The Wireless Telegraphy (White Space Devices) (Exemption) Regulations 2015”.

Dokument ten dopuszcza do użytku na ziemi (nie w urządzeniach latających) urządzeń WSD w kategoriach stacjonarnej i mobilnej. Urządzenia te pracując w trybie MASTER muszą obligatoryjnie korzystać z bazy danych geolokalizacyjnej zawierającej dopuszczone do użytku w danej lokalizacji kanały o określonych parametrach. Urządzenia pracujące w trybie SLAVE muszą mieć zapewnioną ciągłą łączność z urządzeniem MASTER, które zarządzają dostępem do widma radiowego. Wszelkie problemy z łącznością urządzenia MASTER z bazą danych lub urządzenia SLAVE z urządzeniem MASTER muszą skutkować praktycznie natychmiastowym wyłączeniem nadawania. Wspomniana regulacja prawna nakłada na producenta WSD obowiązek zabezpieczenia WSD przed jakąkolwiek ingerencją w urządzeniu pozwalającą na nieautoryzowaną zmianę parametrów nadawania, w tym wpływu na dane geolokalizacji. Dokument ten [5.2] wymienia z nazwy cztery instytucje uprawnione do zarządzania bazami danych. Zaś wszyscy operatorzy WS w Wielkiej Brytanii są zobowiązani do korzystania tylko z tych określonych dokumentem [5.2] baz danych.

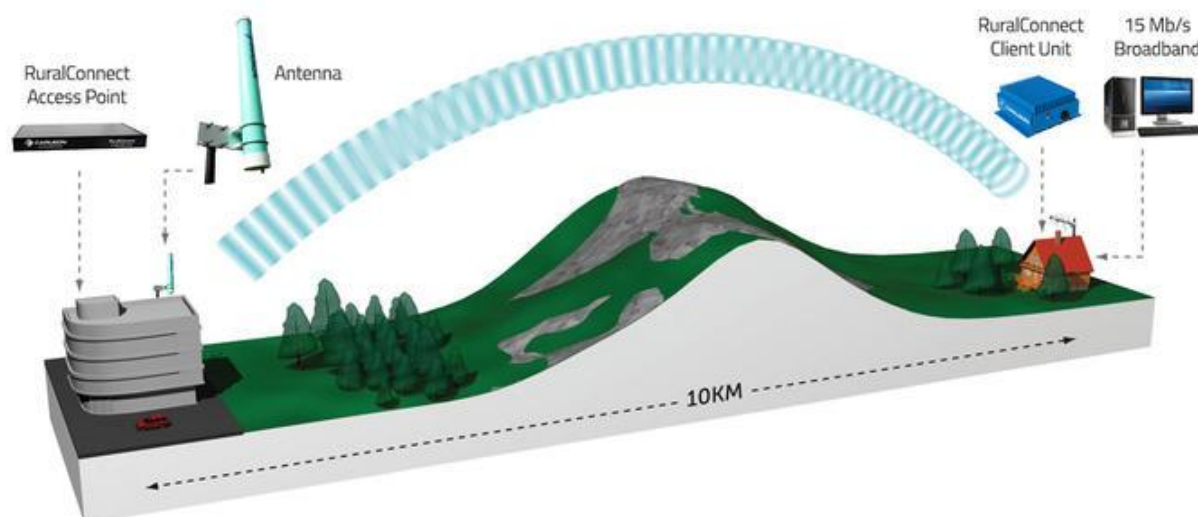
W USA w związku z oddolnym zapotrzebowaniem na rozwijanie sieci WSD, w szczególności małych operatorów lokalnych oraz grup pracujących z wykorzystywaniem GNU radio, powstały pierwsze przygotowane nie administracyjnie bazy danych, informujące o ilości dostępnych kanałów na danym obszarze.

Obecnie możliwe jest bezpłatne korzystanie np. z witryny <https://www.google.com/get/spectrumdatabase/channel/> wskazującej stan zajętości kanałów dla USA oraz w ograniczonym zakresie (do celów testowych i badawczych) z bazy danych <https://developers.google.com/spectrum/paws/gettingstarted>. Komercyjne wykorzystanie bazy danych Google wymaga stosownej umowy.



Rys.5.2. Dostępność kanałów WS w USA wg bazy danych Google

Wg danych z 2013 roku opublikowanych przez PewResearchCenter (<http://www.pewinternet.org/>) [5.5] około 4 mld ludzi na świecie, w tym 60 mln w USA nie posiada stałego szerokopasmowego dostępu do Internetu. Natomiast wg danych opublikowanych w 2015 roku [5.4] wręcz spada liczba osób korzystających ze stałego łącza szerokopasmowego na rzecz rozwiązań mobilnych. Na obszarach o słabej urbanizacji właśnie m.in. urządzenia WSD dają szansę na uzyskanie takiego dostępu. Rozwiązania bazujące na WS posiadają korzystną cechę związaną z zakresem częstotliwości, jaką są dobre warunki propagacyjne. Transmisja w paśmie UHF (naziemnej telewizji cyfrowej) znacząco zmniejsza koszty związane z prowadzeniem transmisji, gdyż sygnał nie jest tak szybko tłumiony, jak ma to miejsce w przypadku transmisji np. w paśmie WiFi.



Rys. 5.3. Wykorzystanie WSD na obszarach wiejskich [6]

## 5.2 Badania dotyczące WS wykonane w trakcie pracy

Tak jak zostało to wspomniane we wcześniejszej części niniejszego opracowania, obecnie nie ma możliwości nabycia w Polsce dedykowanych urządzeń WSD. Nie zdecydowano się również na zakup, wspomnianych wcześniej, urządzeń dostępnych w USA (opracowanych w 2009 r.) pracujących w sposób niezgodny z przyjętymi obecnie unormowaniami, z uwagi na wysoce prawdopodobny brak możliwości ich eksploatacji poza terytorium USA.

Do badań i eksperymentów wykorzystano natomiast dwa urządzenia (typu GNU Radio - radio programowalne Software Defined Radio) NI USRP-2920 wykorzystywane również we wcześniejszych pracach w Zakładzie Z-21. Urządzenia te od strony funkcjonalnej stanowią mogą dobre przybliżenie przyszłych komercyjnych urządzeń WSD. Szczegółowe informacje dostępne są na stronie producenta [5.7].



Rys. 5.4. NI USRP-2920 50 MHz – 2,2 GHz Software Radio



Urządzenia te pracują w zakresie częstotliwości od 50 MHz do 2,2 GHz. Pozwalają, przy wykorzystaniu oprogramowania dostarczonego wraz z urządzeniami oraz własnego oprogramowania napisanego w LabVIEW, na uzyskanie sprawnie działającego kanału radiowego nadającego w części dostępnego zakresu programowalnego, np. w paśmie UHF naziemnej telewizji cyfrowej. Zastosowane urządzenia, z uwagi na to, że nie są urządzeniami dedykowanymi do transmisji mającej na celu przesyłanie znacznej ilości danych, lecz urządzeniami typu Software Radio, w których parametry transmisyjne takie jak np. modulację i demodulację uzyskuje się drogą programową. Pozwalają one na uzyskiwanie ograniczonego transferu danych (do kilkudziesięciu kilobitów na sekundę). Urządzenia te, z uwagi na sposób działania oraz to, iż nie stanowią typowych urządzeń komercyjnych przeznaczonych do transmisji danych, a są uniwersalną platformą testową, w trakcie badań i eksperymentów wprowadzały nieznaczną niestabilność w czasie i tzw. szumy fazowe wynikające z cyfrowego przetwarzania przez komputer sygnałów analogowych po ich próbkowaniu oraz wynikające z cyfrowej syntezy sygnałów nadawanych.

Pomimo powyższych ograniczeń, urządzenia USRP pozwoliły na sprawdzenie mechanizmów zakłócania transmisji pakietowej realizowanej z modulacją QPSK sygnałem DVB-T nadawanym w rzeczywistym kanale telewizyjnym (sygnał z generatora sygnału DVB-T i modulatora pojedynczego kanału TV).

Ponadto w ramach realizacji niniejszej pracy sprawdzono również oddziaływanie na transmisję pakietową w kanale radiowym z modulacją szerokopasmową QPSK (symulującą zachowanie urządzeń WS) sygnałów pasożytniczych, jak również określono wpływ sygnału DVB-T na prowadzoną transmisję. Badania prowadzone były w układzie zamkniętym (bez propagowania kanałem radiowym sygnałów), tak aby wyeliminować wpływ zmienności otoczenia na wyniki prowadzonych pomiarów i zmniejszyć niepewność pomiaru.

Dodatkowo w ramach niniejszej pracy zrealizowano testową transmisję radiową zawierającą oprócz przesyłania danych tekstowych również przesłanie plików graficznych w formacie jpg jak i bezpośrednią transmisję wideo z kamery z rozdzielczością 320x240 px. Testowe transmisje, o których tu mowa, zrealizowano z wykorzystaniem anten dookólnych (o małym zysku) dostarczonych wraz z URSP przy transmisji na odległość kilku metrów oraz przy transmisji na odległość kilkudziesięciu metrów z wykorzystaniem anten kierunkowych (Yagi). Przykład tego drugiego sposobu zestawienia kanału transmisyjnego pokazano na poniższym rysunku.



Rys. 5.5. Przykład zestawienia kanału transmisyjnego przy pomocy urządzeń USRP

### 5.3 Układ pomiarowy

W ramach realizacji pracy przygotowane zostały dwie wersje stanowiska badawczego:

- dla warunków normalnej transmisji bezprzewodowej tj. stanowisko na którym prowadzono badania w docelowej konfiguracji urządzeń nadawczych i odbiorczych. Na stanowisku tym podczas badań do urządzeń WS zastosowano dwa komplety anten nadawczo-odbiorczych, pierwszy wykorzystujący anteny dookólne o małym zysku z zestawu USRP oraz drugi z zastosowaniem anten typowo pracujących w paśmie telewizyjnym typu Yagi.
- dla warunków laboratoryjnych mających wyeliminować wpływ czynników zewnętrznych – dwie wersje układu: układ dla transmisji między urządzeniami USRP zakłócaney sygnałami o różnej modulacji (Rysunek 5.6.) lub sygnałem DVB-T oraz układ dla sygnału DVB-T zakłócanego sygnałem wytwarzanym przez urządzenie USRP (Rys. 5.7.).

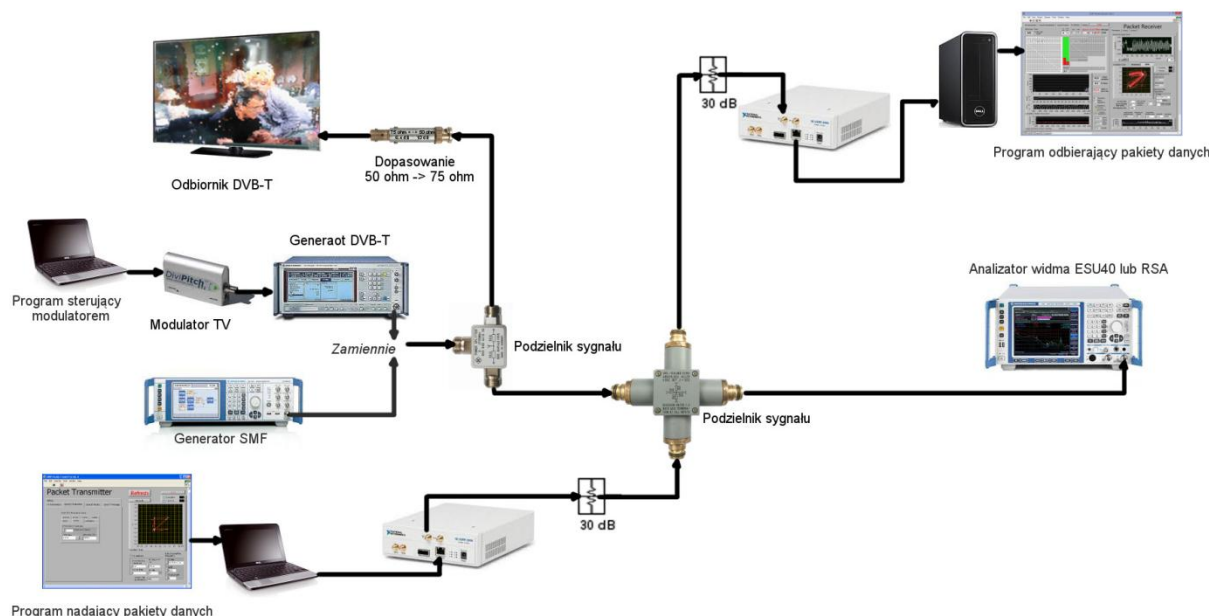
W celu zapewnienia odpowiedniej odtwarzalności i powtarzalności pomiarów, jak również zapewnienia odpowiedniej stabilności transmisji oraz w celu uniknięcia dodatkowych zakłóceń w trakcie badań, konieczne było zastosowanie układu pomiarowego dla warunków laboratoryjnych (z wykorzystaniem połączeń kablowych). W układzie tym zastosowano odpowiednie elementy toru: tłumiące, sprzęgające i dopasowujące (tam gdzie była taka konieczność) z systemu pomiarowego 50  $\Omega$  na system 75  $\Omega$ .

Stosowany system laboratoryjny pozwala na badanie parametrów sieci i nie jest podatny na zmiany środowiska zewnętrznego. Kluczowa była tu potrzeba wyeliminowania losowych czynników i uzyskania odpowiedniej stabilności w prowadzonych pomiarach. Dla celu wyznaczania współczynników, o których mowa w dalszej części sprawozdania, zastosowany układ gwarantował uzyskiwanie odpowiednich i powtarzalnych wyników mierzonych parametrów, zarówno przy badaniach wpływu na przykładową transmisję WSD w zależności od wprowadzanych sygnałów zakłócających jak i wpływu przykładowej transmisji WSD na sygnał telewizyjny.

W badaniach wykorzystano:

- nośnik transmisji pakietowej symulującej działanie sieci WSD, składający się z dwóch urządzeń NI URSP-2920 (wraz z niezależnymi komputerami sterującymi procesem nadawania i odbierania danych);
- odbiornik sygnału DVB-T do oceny subiektywnej wpływu zakłóceń (SAMSUNG UE50H5500AWXXH, nr ser. C0RT3HIF500006E);
- analizator sygnału DVB-T analizator ETL TV Analyzer firmy Rohde & Schwarz;
- źródło sygnału DVB-T TV Test Transmitter SFQ firmy Rohde&Schwarz;
- źródło sygnału TV modulator DiviPitch firmy ENENSYS Technologies wraz z programem sterującym przesyłającym do modulatora odpowiednio przygotowany krótki film;
- źródło sygnałów zakłócających ciągłych o różnych typach modulacji, generator SMF firmy Rohde&Schwarz;
- analizator widma czasu rzeczywistego RSA 34088A firmy Tektronix lub odbiornik pomiarowy ESU40 firmy Rohde&Schwarz w trybie analizatora (stosowane zamiennie);
- dodatkowe wyposażenie
  - tłumiki 30dB podłączone do wyjścia/wejścia antenowego każdego z urządzeń NI URSP-2920 (w celu zabezpieczenia urządzeń oraz obniżenia emitowanej energii oraz obniżenia czułości wejściowej w układzie laboratoryjnej/przewodowej symulacji kanału radiowego);
  - dzielniki sygnału (powersplitter) firmy Rohde&Schwarz 1:2 i 1:3 umożliwiające realizację kanałów transmisji z jednoczesnym jego zakłócaniem oraz podglądem na analizatorze widma i odbiorniku telewizyjnym.





Rys. 5.6. Układ pomiarowy do oceny wpływu różnych zaburzeń na stopę błędów transmisji pakietowej

## 5.4 Badania

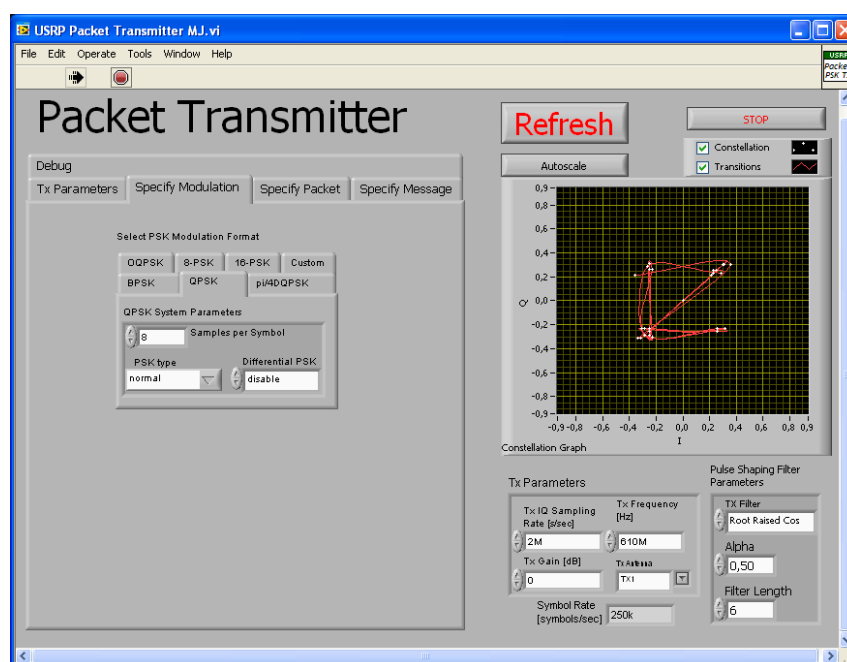
Celem badań laboratoryjnych urządzeń przeznaczonych do pracy w WS było przygotowanie stanowisk badawczych ażeby uzyskać zdolność prowadzenia badań WSD. Istotne jest to zarówno w przyszłych celach badawczo-rozwojowych, komercyjnych jak i w celu wsparcia grup/komitetów normalizacyjnych dążących do usystematyzowania warunków badania produktów przed wprowadzeniem ich na rynek. Dzięki badaniom możliwe jest potwierdzanie wyników teoretycznych i obliczeniowych związanych z wyznaczaniem warunków/granic stosowalności urządzeń WSD w sposób niezakłócany – zarówno dla nich samych jak i dla systemów pierwszej ważności.

Należy zwrócić uwagę na to, że urządzenia zastosowane podczas realizacji niniejszej pracy (prób laboratoryjnych), nie są komercyjnymi rozwiązaniami WSD, tylko radiami programowalnymi. Część funkcji programowych jest realizowana w samym urządzeniu, jednak obsługa samej transmisji, demodulacja zakodowanej informacji i jej prezentacja odbywa się z użyciem komputera sterującego. W urządzeniach WSD całość przetwarzania odbywa się w jednym urządzeniu. Dlatego też należy zwrócić uwagę na to, że wyniki związane z wyznaczonymi wartościami granicznymi dla urządzeń WSD mogą się w pewnym stopniu różnić od uzyskiwanych wyników w oparciu o radio programowalne. Ponadto, z uwagi na



sposób działania algorytmu i przetwarzania wyników poza urządzeniem bezpośrednio poddanym działaniu zakłóceń, obserwowane były przekłamania, o których wspomniano w dalszej części niniejszego opracowania, przy omawianiu wyników prowadzonych badań.

Istotnym elementem, który został wykorzystany i przygotowany specjalnie do prowadzonych badań była modyfikacja i rozbudowa oprogramowania sterującego urządzeniami NI USRP-2920.



Rys. 5.7. Widok pulpitu programu sterującego nadawaniem

W szczególności dużej rozbudowie poddany został program sterujący odbieraniem danych prezentowany niżej na Rys. 5.8. i 4.9. W celu lepszego obrazowania program uzupełniono o elementy niezbędne do oceny jakości badanej transmisji. W tym celu rozbudowano sekcję związaną z wczytywaniem kopii pliku zawierającego dane używane przez nadajnik mającej za zadanie porównanie tych danych z danymi odbieranymi podczas prowadzenia badania. Dodano również moduły wyliczające w sposób ciągły parametry jakościowe transmisji oraz prezentujące je zarówno w formie liczbowej i w formie wykresów. Prezentacja za pomocą wykresów, przy tego typu badaniach, jest szczególnie przydatna, gdyż nierównomierność procesu dekodowania w warunkach silnych zakłóceń bardzo utrudnia ustalenie stopnia degeneracji kanału transmisyjnego.

W celu ułatwienia analizy liczbowej parametrów, których chwilowa zmienność uniemożliwiała praktyczną ocenę wpływu zakłócenia na transmisję danych, wprowadzono do programu obróbkę statystyczną wyliczającą na bieżąco średnie parametry transmisji z zadanej liczby

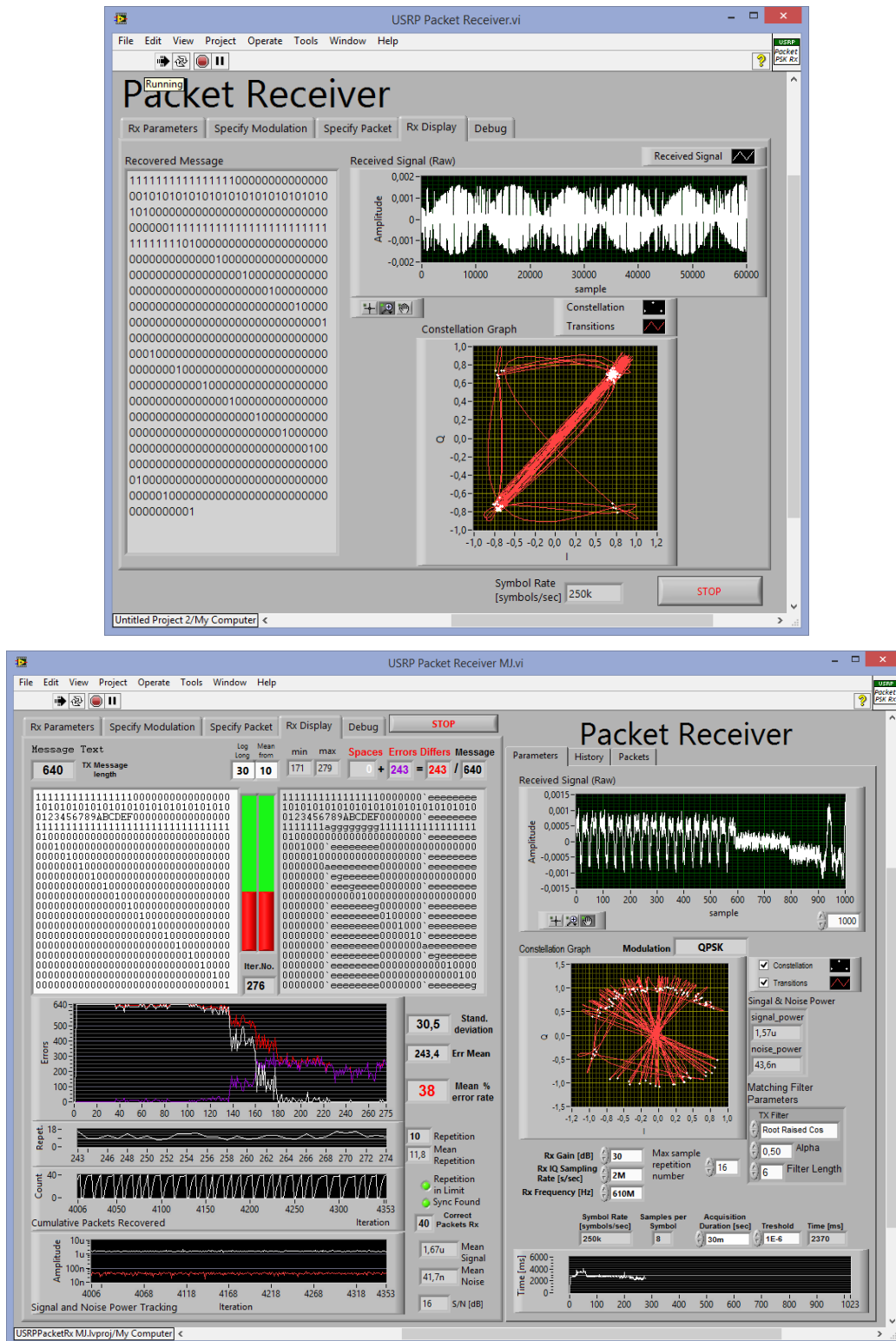
ostatnio odebranych paczek danych. Te średnie wartości były dalej brane pod uwagę przy analizie wpływu sygnałów zakłócających na degenerację kanału transmisyjnego.

Dopiero analiza wartości średnich pozwoliła na ujawnienie regularności w pogarszaniu się różnych parametrów transmisji, tj. stopy błędów braku odbioru pakietów, stopy błędów przekłamań danych, ilości dodatkowych odczytów pakietów, czasu odbioru całej paczki danych, zmierzonych przez odbiornik poziomów sygnału i szumu na jego wejściu antenowym.

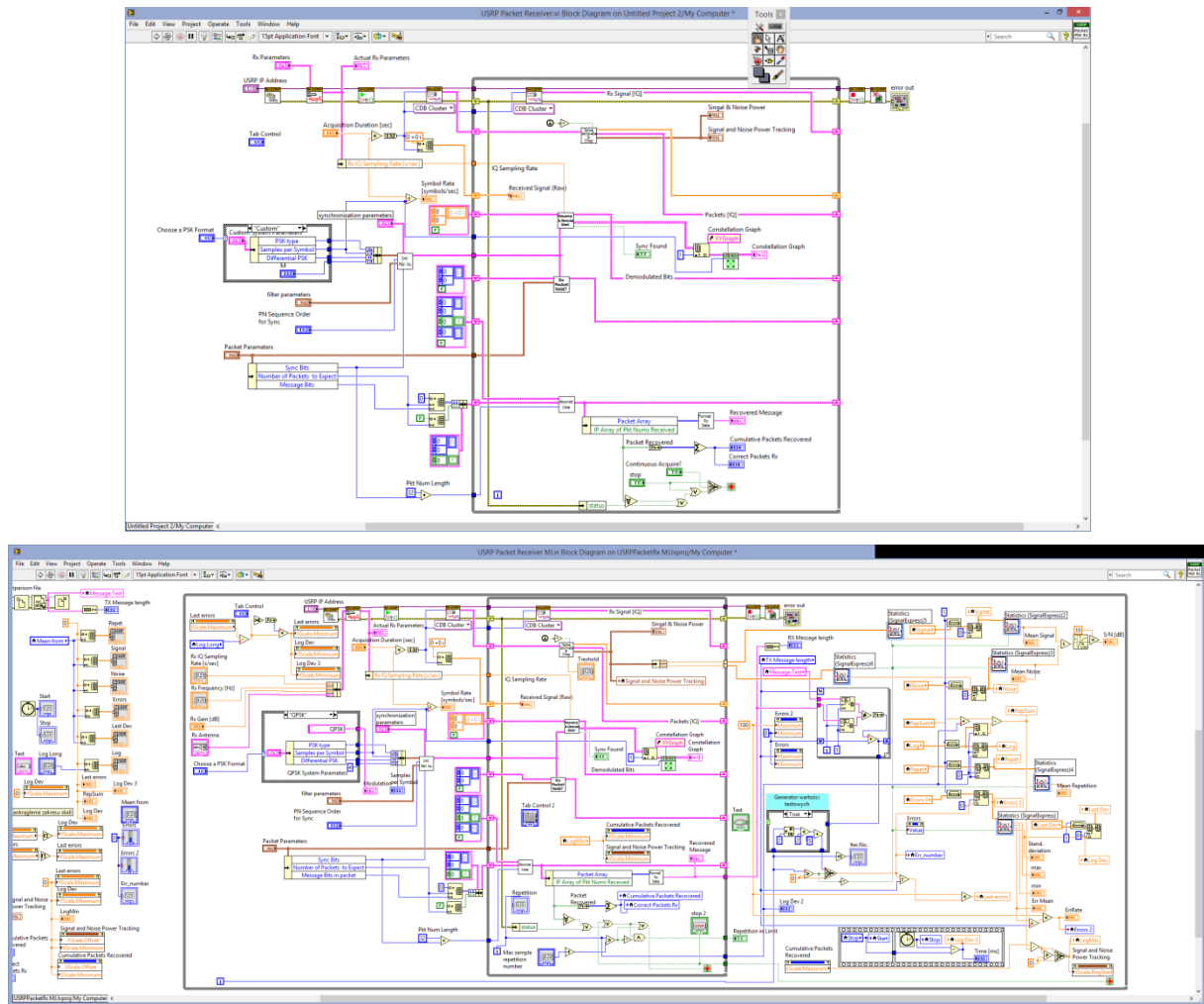
Analiza tych parametrów pozwoliła na dokładniejsze umiejscowienie etapów odbioru transmisji powodujących problemy z odczytem i błędy w danych. Sam proces odbioru danych poczynając od demodulacji sygnału antenowego, odtworzenie próbkowanych symboli, zdekodowanie bitów, podział na poszczególne części pakietu, zamianę części informacyjnej na bajty znaków, aż po złożenie odebranych pakietów danych w paczkę danych, to skomplikowany wieloetapowy proces. Na każdym jego etapie są możliwe błędy i część tych błędów jest powodowana przez zakłócenie transmisji innym sygnałem. Pełniejsze rozumienie tych zjawisk może pozwolić na tworzenie odbiorników lepiej radzących sobie z zakłóceniami.

Na lewej stronie poniższego rysunku (część dolna), są widoczne: wzorcowa kopia danych wysyłanych przez nadajnik, dane odebrane, historia liczby stwierdzonych błędów transmisji (fiolet – przekłamania, biały – brak pakietów, czerwony - całkowita ilość błędów w paczce danych), historia liczby koniecznych powtórzeń odczytywania wysyłanej paczki, skuteczność odbioru pakietów, poziomy sygnału i szumu odczytywane przez odbiornik. Powtarzanie odczytu jest przerywane po osiągnięciu maksymalnej liczby powtórzeń traktowanej jako parametr. Używana była liczba 16. Przy braku zakłóceń do pełnego i poprawnego odbioru całej paczki danych wystarczało 7 powtórzeń.

Po prawej stronie są widoczne: wykres amplitudy w dziedzinie czasu na wejściu odbiornika po demodulacji, wykres tzw. konstelacji, czyli składowych „Q” i „I” sygnału modulowanego QPSK, historia czasów odbioru paczek danych.

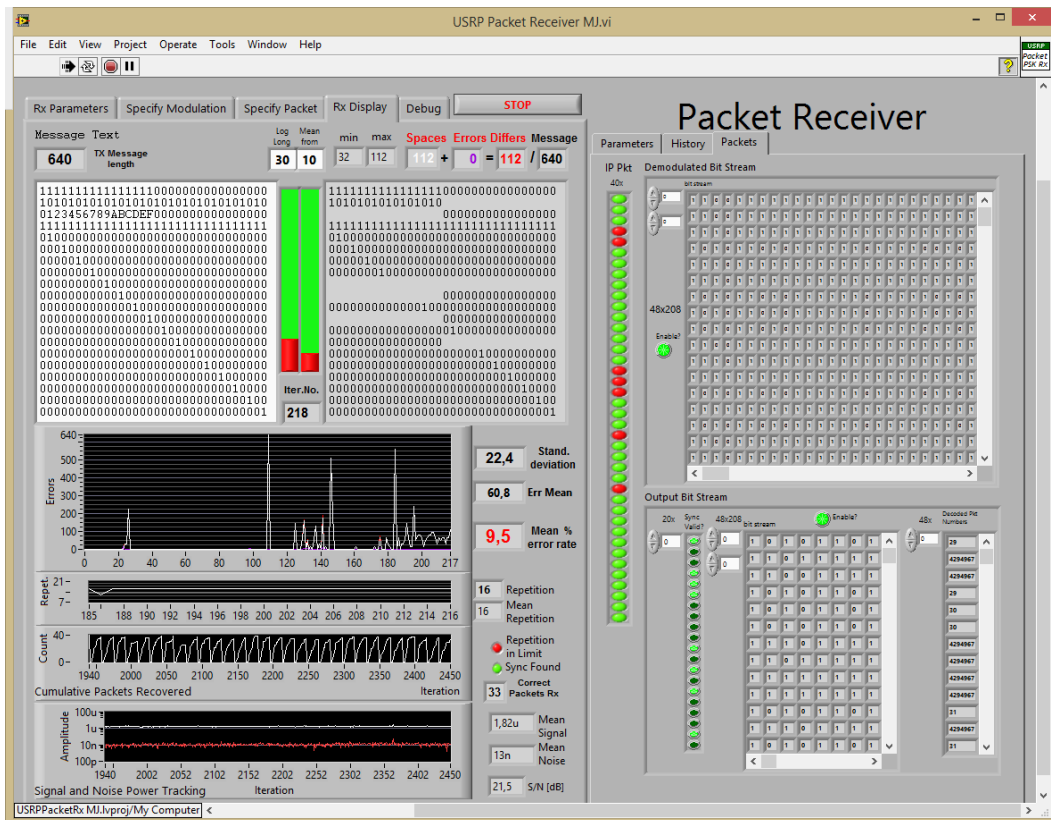


Rys. 5.8. Interfejs użytkownika wyjściowej wersji programu do odbierania pakietów (na górze) oraz interfejs użytkownika programu po zmianach wprowadzonych podczas realizacji niniejszej pracy (poniżej)



Rys. 5.9. Kod programu (w języku G stosowanym w środowisku LabVIEW ) przed rozbudową (u góry) i po rozbudowie (na dole)

Wszystkie te dodatkowo wprowadzone i oprogramowane elementy były istotne z punktu widzenia prowadzenia oceny wpływu zakłócających sygnałów na transmisję prowadzoną przez testowane urządzenia, mające odpowiadać w przyszłości warunkom pracy WSD.



Rys. 5.10. Widok interfejsu użytkownika z widoczną zakładką „Packets”

Dodana do programu zakładka pozwala na bieżąco śledzić status odbioru kolejnych 40 pakietów wchodzących w skład paczki danych, zdekodowane bity danych, potwierdzone bity synchronizacji, zdekodowane numery pakietów. Dane te są przydatne do analizy mechanizmu dekodowania danych w transmisji pakietowej i powstających przy tym błędów transmisji.

Dodane funkcje pozwoliły na rozróżnienie, czy zakłócenia w przekazywaniu zawartości pliku polegają na przekłamaniami informacji, czy na utracie informacji. Jak można się przekonać na podstawie omówionych w dalszej części sprawozdania badań, w pewnych sytuacjach celowo wprowadzane zakłócenia wywoływały znaczny udział przekłamań przy małej ilości w pełni utraconych pakietów, a przy innych zakłóceniach odbiornik albo odbierał albo nie odbierał pakietów ale danych nie przekłamywał. Na podstawie prowadzonych prób, podczas badań realizowanych w ramach niniejszej pracy, zauważono znaczne spowolnienie odbieranych pakietów, nawet w przypadku braku błędów przy niektórych rodzajach zakłóceń i ich umiejscowieniu oraz poziomie względem sygnału użytecznego. Takie częściowe spowolnienie przekazywania całej paczki danych wzrastało nawet 10-krotnie.

Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na fakt, że do badań wybrano możliwie najprostszy protokół wymiany informacji, czyli w pełni asynchroniczną wysyłkę kolejnych pakietów, bez

jakiegokolwiek potwierdzania lub żądania ponowienia transmisji przez odbiornik. Miało to na celu poddanie badaniom samego zachowania się toru transmisyjnego, a nie stosowanych dodatkowych metod zabezpieczania transmisji (np. za pomocą bitów parzystości). Odbierana informacja nie była w żaden sposób weryfikowana, np. poprzez specjalne kodowanie umożliwiające wykrycie błędów po stronie odbiornika lub ich częściowe naprawienie, tak jak to się odbywa w przypadku typowej teletransmisji. Stosuje się do tego celu różne rozwiązania, od bardzo prostych zabezpieczeń, np. bity parzystości lub bardziej rozbudowanych CRC, aż po wyrafinowane matematycznie kodowanie cykliczne dające możliwość poprawnego odbioru nawet bardzo zakłóconych transmisji. Tych ostatnich używa się na przykład do łączności z odległymi sondami kosmicznymi.

Ponieważ celem pracy było tylko badanie potencjalnych zagrożeń dla współistnienia w tym samym paśmie urządzeń DVB-T i WSD, ograniczono się więc do najprostszej transmisji polegającej na powtarzalnej wysyłce paczki 640 bajtów zawierających cyfry i litery, która pozwoliła na sformułowanie stosownych wniosków. Po odbiorze paczki kolejne bajty były sprawdzane w porównaniu do znanego wzorca i na tej podstawie wyznaczana była stopa błędów procentowa, będąca podstawową miarą poziomu degeneracji transmisji.

Do badań transmisji pakietowej wybrano modulację QPSK, w której występuje jednocześnie modulacja fazy i amplitudy. W celu ograniczenia wpływu nierównomiernej pracy komputera sterującego ograniczono częstotliwość próbkowania do 2 MHz. Pozwoliło to na długotrwałą i stabilną pracę nadajnika.

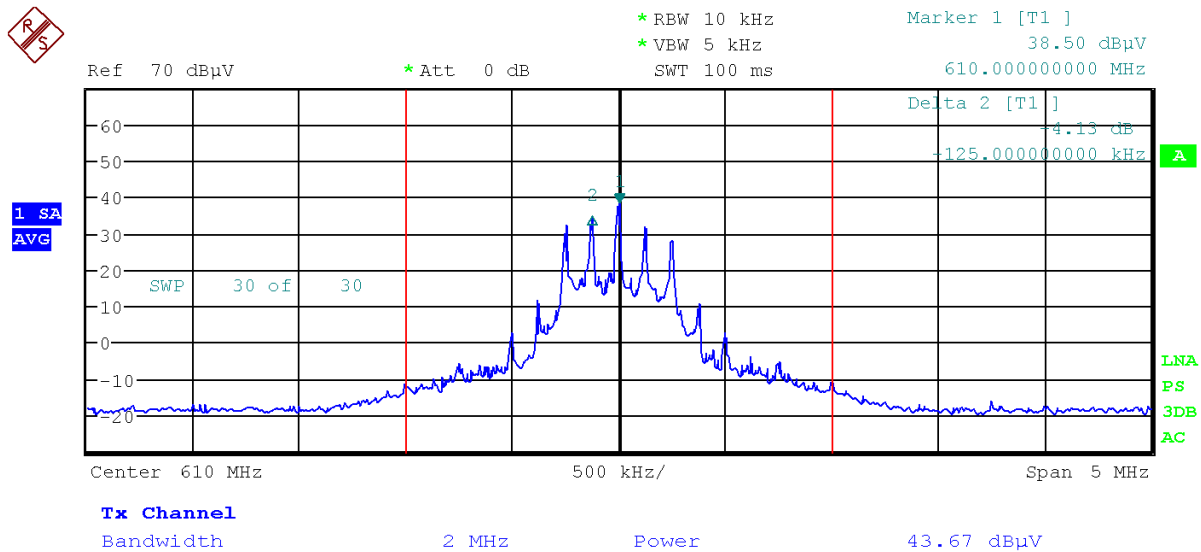
### **5.5 Ocena wpływu zaburzeń ciągłych na stopę błędów transmisji pakietowej – sygnały pożądane i sygnały zakłócające**

W ramach realizacji pracy przeprowadzono badania mające na celu oszacowanie odstępu pomiędzy sygnałem użytecznym i zakłócającym zapewniającego zachowanie ciągłości transmisji prowadzonej za pośrednictwem urządzeń pracujących w WS przy współistnieniu typowo spotykanych w tych pasmach częstotliwości zakłóceń.

Zarejestrowane zostały spektrogramy sygnału użytecznego oraz sygnałów niepożądanych. Sygnałem użytecznym zastosowanym podczas badań była wspomniana we wcześniejszym rozdziale transmisja prowadzona za pomocą urządzeń USRP.

Na Rysunku 5.11 pokazano widmo sygnału użytecznego. Kształt i szerokość widma sygnału są oczywiście powiązane z przyjętą do prowadzenia transmisji opisaną wcześniej modulacją.

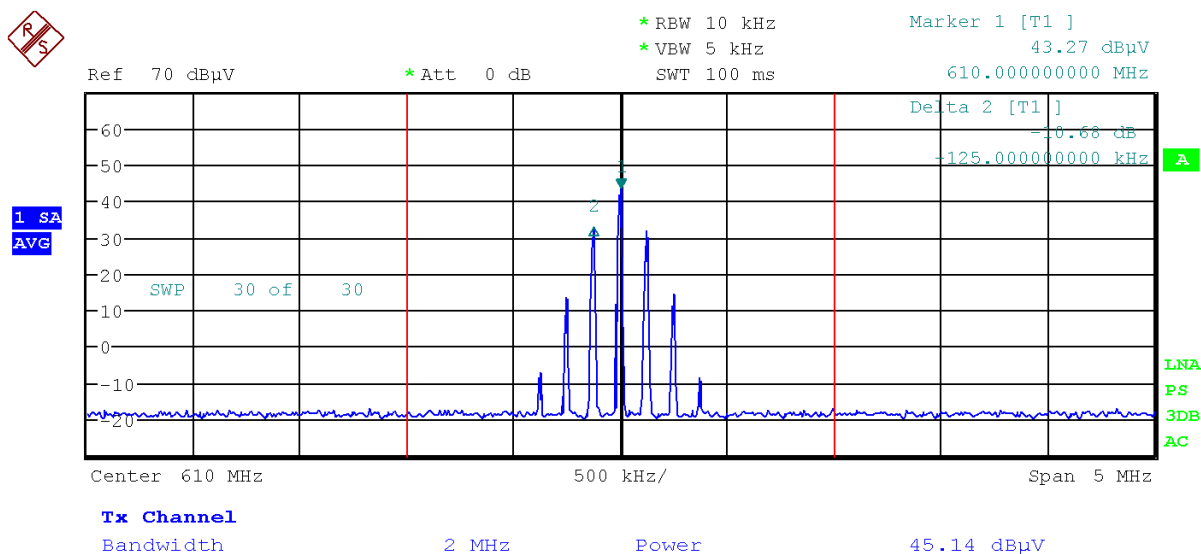




Rys. 5.11. Sygnał użyteczny transmisji pakietowej. Modulacja QPSK, 8 próbek/symbol, obraz zarejestrowany za pomocą odbiornika pomiarowego ESU40 firmy R&S. Widoczny na analizatorze widma (Rys. 5.11.) kształt przebiegu jest jego uśrednioną wartością dla kolejnych 30 przebiegów analizatora. Uśrednienie dobrze oddaje charakter modulacji oraz rzeczywiste widmo zawierające dodatkowe produkty związane z modulacją i pracą samego nadajnika. Widoczne na przebiegu czerwone linie związane są z pomiarem mocy sygnału w kanale 2 MHz.

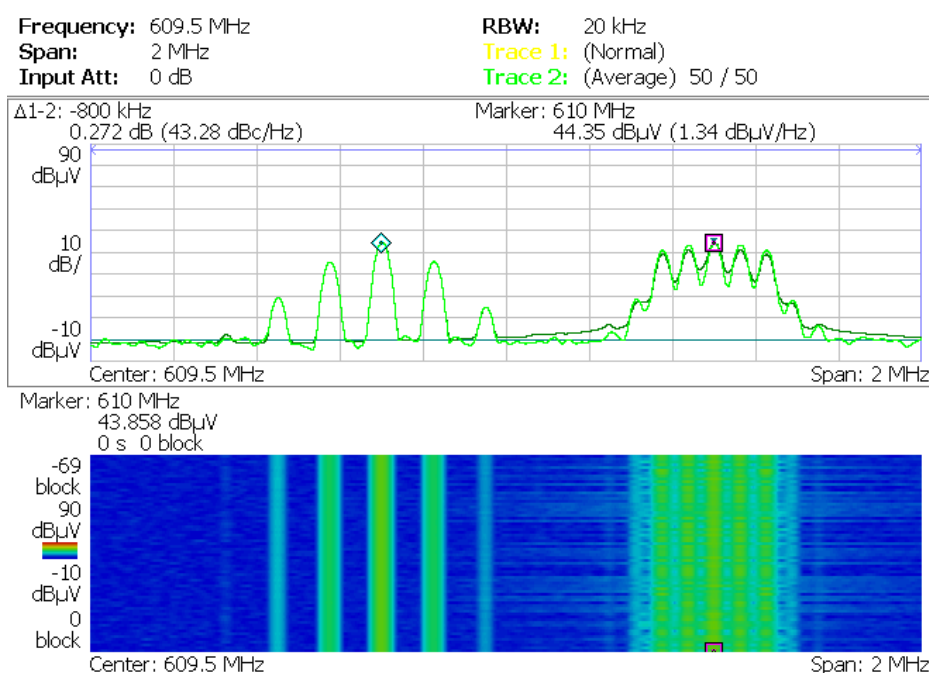
W wyniku prowadzonych prac stwierdzono, że na potrzeby realizacji pracy w celu oceny mocy sygnału zakłócanego i zakłócającego dla kanału możliwe jest zastosowanie pomiaru napięcia maksymalnej składowej obu sygnałów.

Poniżej przedstawiono przykłady sygnałów zakłócających, jakie mogą pojawić się w paśmie telewizyjnym, które mogą oddziaływać na prowadzoną transmisję WSD.



Rys. 5.12. Sygnał zakłócający modulowany AM 125kHz głębokość modulacji 80%

W ramach prowadzonych badań współczynników ochronnych wprowadzono sygnały zakłócające do kanału, w którym prowadzona była transmisja użyteczna za pomocą WSD. Na podstawie wprowadzania zakłóceń w kanał transmisyjny oceniano jakość transmisji, a na podstawie tych wyników podatność badanego systemu na zakłócenia. Poniżej pokazano sygnał zakłócający odsunięty od sygnału użytecznego o 800kHz, przed wprowadzeniem (przesunięciem częstotliwościowym) w kanał transmisji.

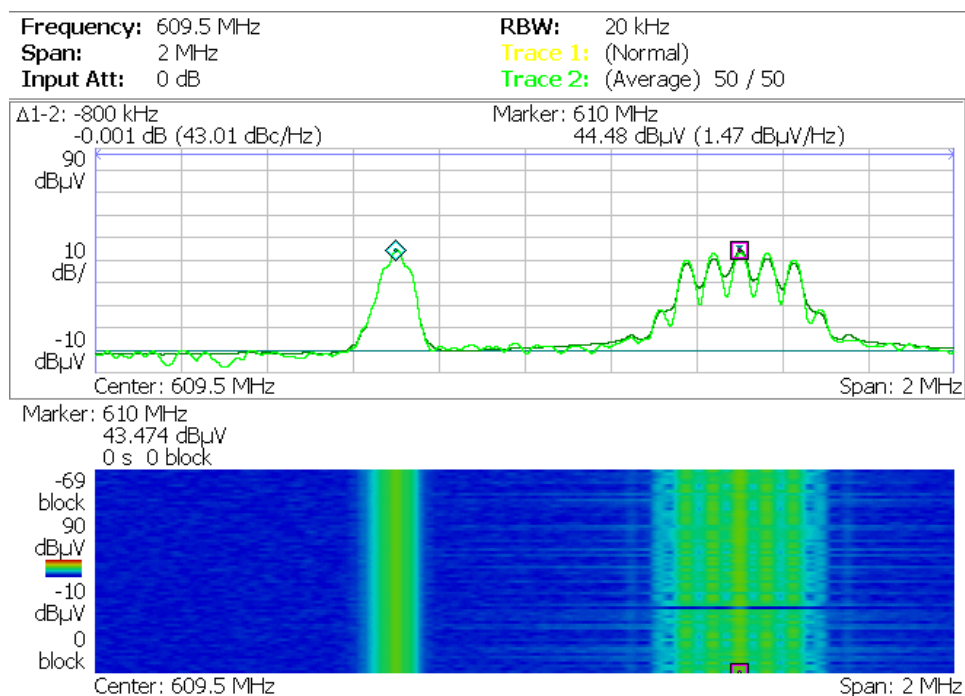


Rys. 5.13. Sygnały użyteczny (po prawej) i zakłócający AM 125 kHz 80% (po lewej) odsunięte od siebie o 800 kHz i wyrównanych do jednego poziomu wartościach maksymalnych prążków.

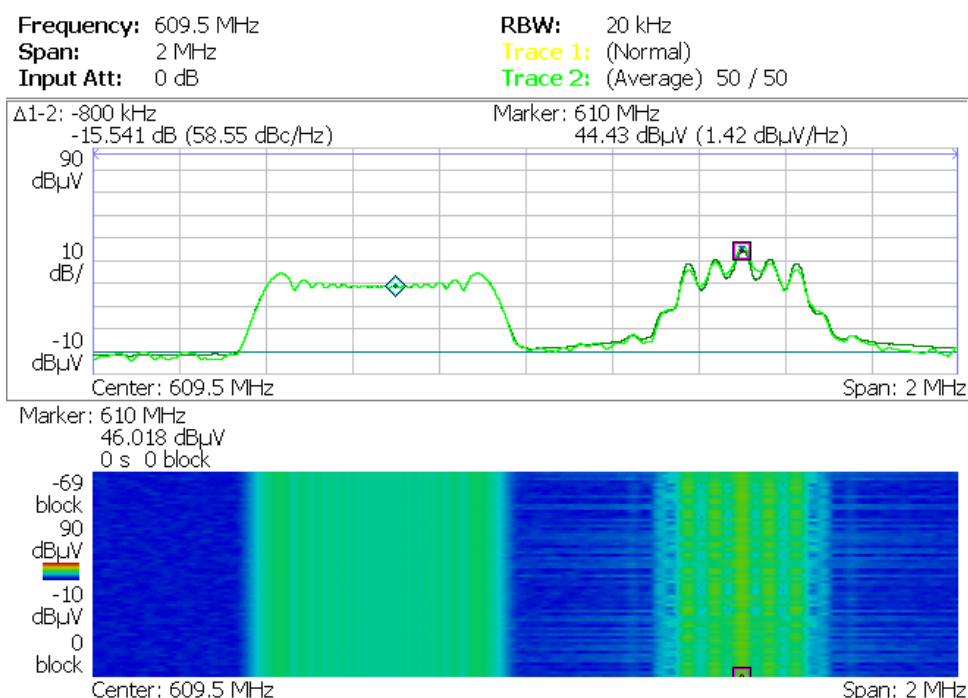
Jak widać na spektrogramie na dolnej części Rysunku 5. 13, obserwowano zmienność w czasie widma sygnału użytecznego (związaną z różnym wypełnieniem i powiązaną z tym modulacją) w przeciwieństwie do ciągłego sygnału zakłócającego pochodzącego z generatora.

W dalszej części zaprezentowano spektrogramy zarejestrowane dla różnych sygnałów zakłócających (mających inne typy modulacji), które były stosowane w badaniach laboratoryjnych.

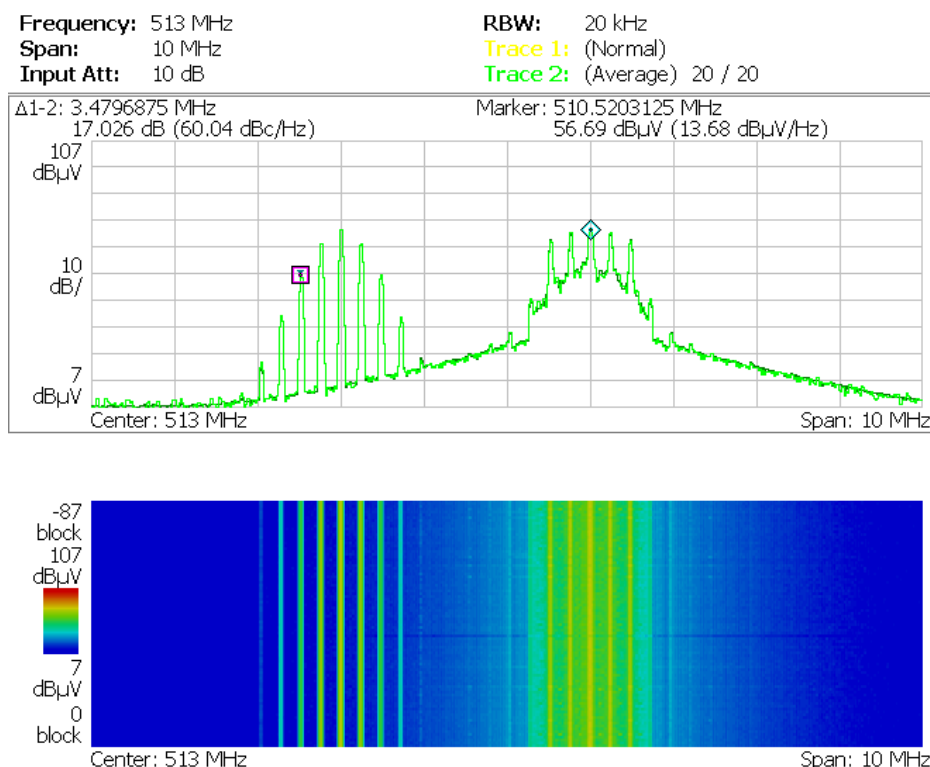




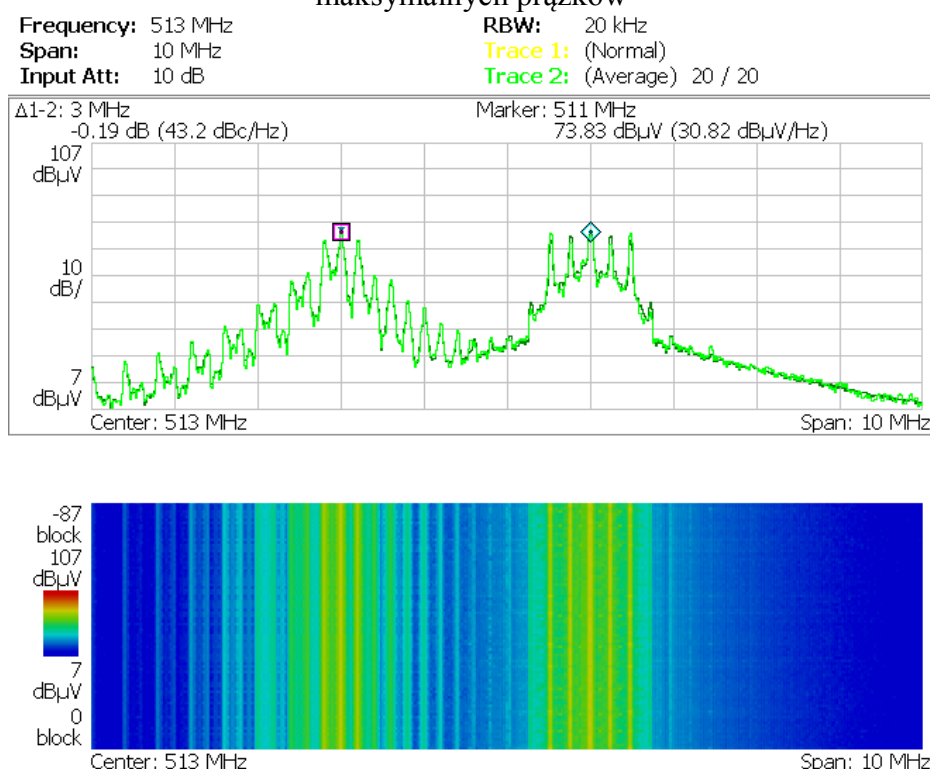
Rys. 5.14. Sygnały użyteczny (po prawej) i zakłócający AM 25 kHz 80% (po lewej) odsunięte od siebie o 800 kHz i wyrównanych do jednej wartości maksymalnych prążków



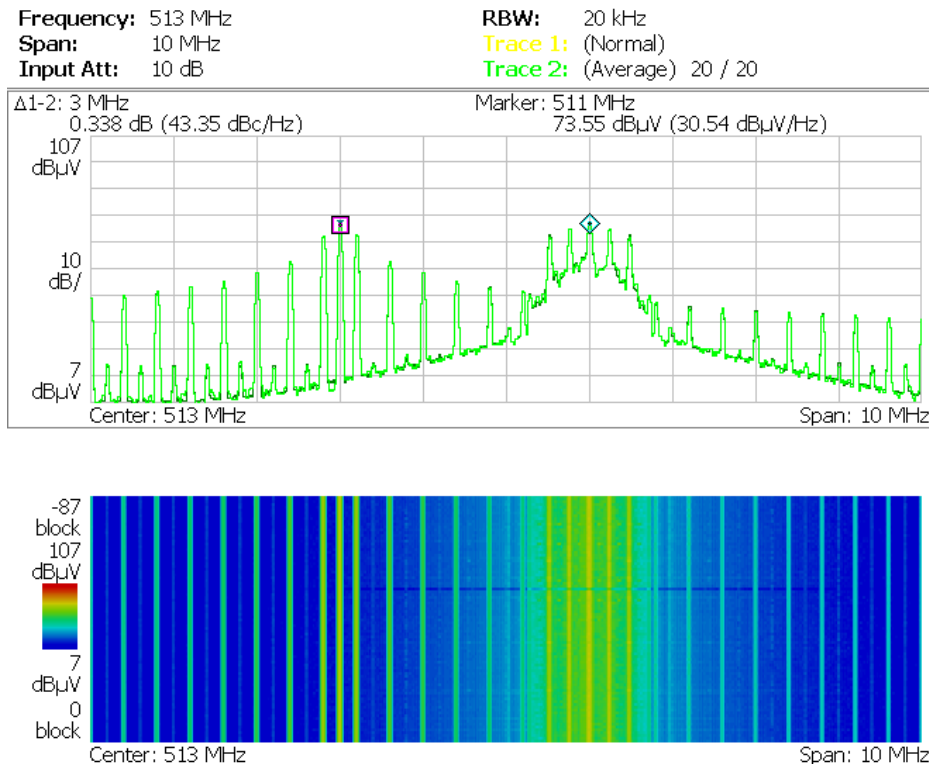
Rys. 5.15. Sygnały użyteczny (po prawej) i zakłócający FM 250 kHz dewiacja 10 kHz (po lewej) odsunięte od siebie o 800 kHz



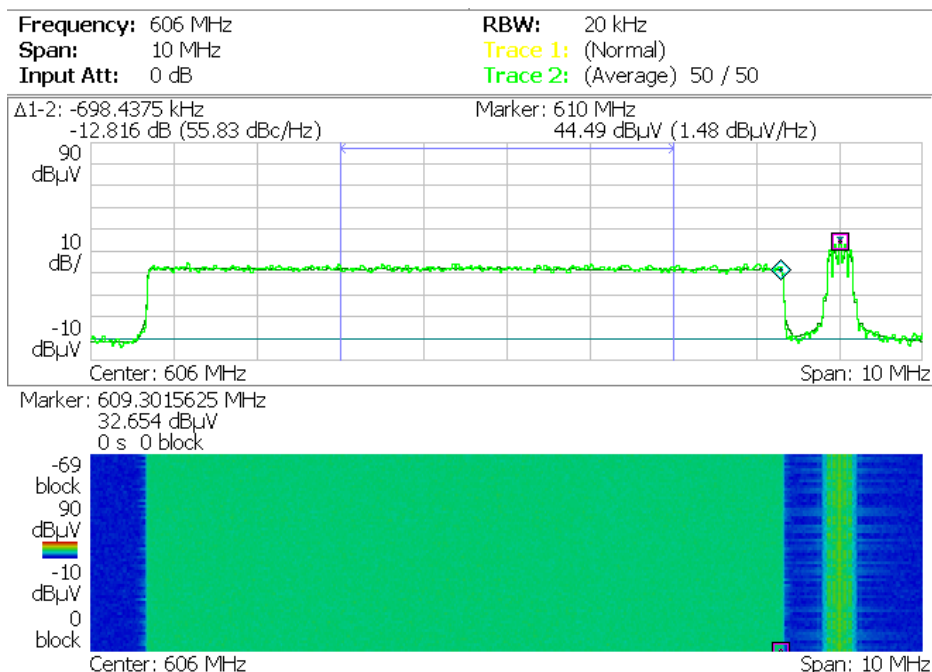
Rys. 5.16. Sygnały użyteczny (po prawej) i zakłócający modulowany fazowo PhM 240 kHz 1 Rad (po lewej) odsunięte od siebie o 3 MHz i wyrównanych do jednego poziomu wartościach maksymalnych prążków



Rys. 5.17. Sygnały użyteczny (po prawej) i zakłócający modulowany cyfrowo PSKM impulsami o długości 5 us i wypełnieniu w czasie 50% (po lewej) odsunięte od siebie o 3 MHz i wyrównanych do jednego poziomu wartościach maksymalnych prążków



Rys. 5.18. Sygnały użyteczny (po prawej) i zakłócający modulowany impulsowo PM impulsami o długości 5 us i wypełnieniu w czasie 50% (po lewej –z markerem widoczna nośna) odsunięte od siebie o 3 MHz i wyrównanych do jednego poziomu wartościach maksymalnych prążków. Widoczne jest zdecydowanie szerokopasmowe widmo zakłócenia



Rys. 5.19. Sygnały użyteczny (po prawej) i zakłócający DVB-T (po lewej)odsunięte od siebie o 4 MHz (środky sygnałów). Kształt sygnału DVB-T jest praktycznie niezależny od zawartości obrazu transmitowanego przez sygnał i jest węższy o od nominalnej szerokości kanału 8 MHz

Zaprezentowane w niniejszym rozdziale sygnały zakłócające były wstępnie przeanalizowane pod kątem możliwości zaaplikowania ich w dalszej części badań, mającej na celu określenie wpływu zakłóceń powodowanych przez prezentowane sygnały na systemy WSD. Do dokładniejszej analizy zakłóceń wybrano tylko niektóre typy sygnałów i modulacji zakłócających.

## 5.6 Analiza zakłóceń

W wyniku prowadzonych wstępnych obserwacji różnych sygnałów zakłócających (opisanych w we wcześniejszym rozdziale) pozwoliły na podjęcie decyzji, że do dalszych szczegółowych badań jako reprezentant dający najbardziej porównywalne i najczystsze wyniki jest sygnał sinusoidalny. Pozwala on na wyznaczenie współczynników, które z przyjętą dokładnością na poziomie 30% odpowiadają transmisjom wąskopasmowym (poniżej 1 MHz ciągłej zajętości widma) ze stosowaniem różnych modulacji prostych. Jako odpowiednik sygnałów szerokopasmowych a jednocześnie sygnał, który może najczęściej wpływać na poprawność działania WSD przeprowadzono badania i analizy wykorzystując sygnał DVB-T.

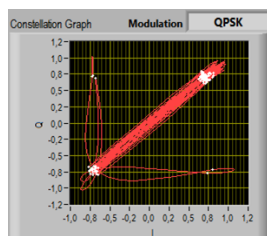
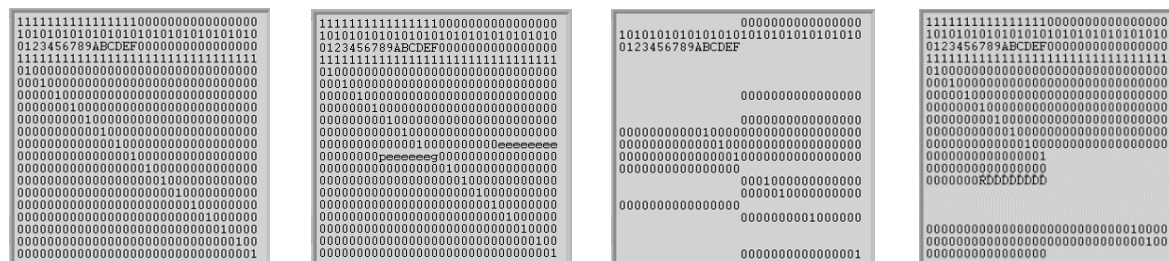
### 5.6.1 Sygnał zakłócający: SINUS

Niemodulowany sygnał sinusoidalny pozwala na oddanie zjawisk zachodzących w przypadku sygnałów zakłócających będących sygnałami modulowanymi za pomocą prostej sinusoidy. Analiza zakłóceń, wywoływanych przez sygnał sinusoidalny w odbiorze pakietów danych, pozwoliła zauważyć ciekawe i opisane w dalszej części opracowania zależności.

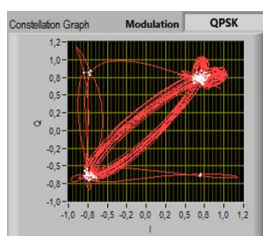
W wyniku badań zaobserwowano, że transmisja modulowana kwadraturowo nie ulega największym zakłóceniom przy „centralnym” nałożeniu sygnału zakłócającego. Odnotowano, że spadek ilości błędów tak przy odstrajaniu jak i przy zmniejszaniu poziomu zaburzenia ma charakter niemonotoniczny. Wśród pojawiających się zjawisk zauważono również, że zmienia się proporcja między przekłamaniami i zupełną utratą pakietów.

Zjawisko związane z przekłamaniami i utratą pakietów zachodzi z powodu zakłócania w odbiorniku procesu wykrywania bitów startu i bitów synchronizujących. W wyniku takiego zakłócenia dochodzi do całkowitej utraty pakietów. W wyniku zakłócenia procesu demodulacji dochodzi do utraty transmitowanych symboli. W przypadku modulacji kwadraturowej

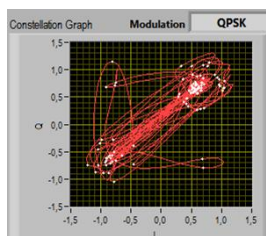
zakłóceniu ulega osobno modulacja fazy i modulacja amplitudy. Zakłócenie sinusoidalne może zakłócać oba rodzaje modulacji niekoniecznie jednocześnie. Stąd też biorą się widoczne powtarzające się przekłamania danych. Na poniższych rysunkach zarejestrowano typowe błędy związane z odbiorem lub utratą sygnału transmisji WSD (Modulacja QPSK, 8 próbek/symbol), zakłócanego sygnałem sinusoidalnym.



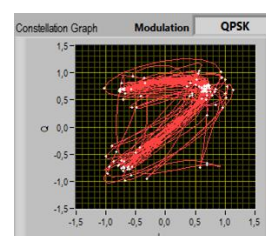
Transmisja bez  
zakłóceń



Pojedyncze  
przekłamania

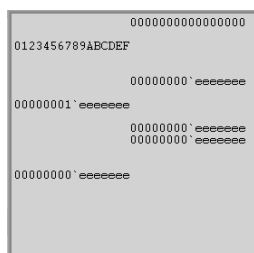


Utrata pakietów bez  
przekłamań

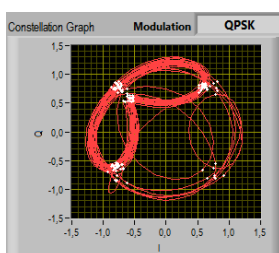


Utrata pakietów i  
pojedyncze  
przekłamania

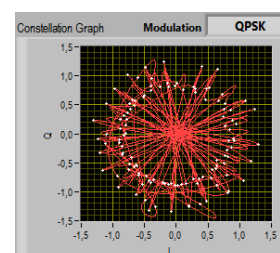
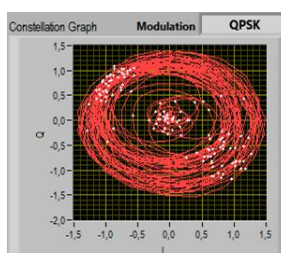
Rys. 5.20. Typowe błędy odbioru zauważone w trakcie badań



Znaczna utrata  
pakietów i  
przekłamania



Przy znacznej utracie pakietów i dużej ilości przekłamań widoczna była utrata synchronizacji na etapie demodulacji transmisji objawiająca się konstelacjami niemożliwymi do detekcji znacząco różniącymi się od typowej, poprawnej konstelacji prawidłowej sygnału QPSK.

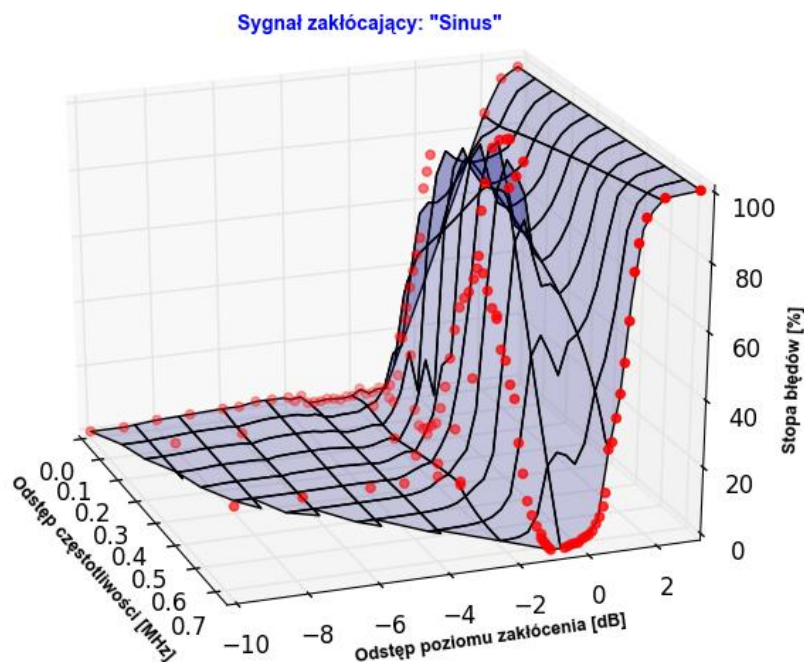


Rys. 5.21. Silne zakłócenia powodują widoczną znaczną utratę synchronizacji dającą w efekcie znaczną stopę błędu lub wręcz całkowity zanik transmisji

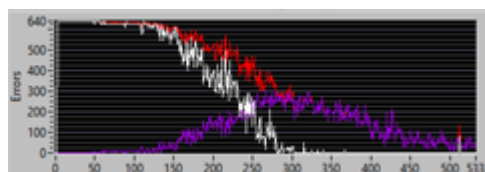


Przyczyną błędnej demodulacji jest jednocześnie odbieranie sygnału użytecznego i zakłócającego - nakładanie się sygnałów wywołuje interferencje zakłócające zarówno fazę jak i amplitudę sygnału użytecznego.

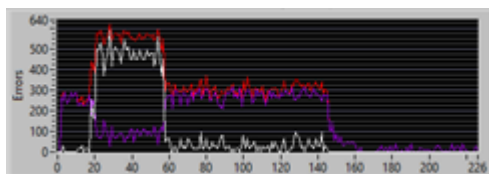
Wykonanie wielu transmisji zakłócanych sygnałem sinusoidalnym w różny sposób pozwoliło na zebranie wyników pomiaru poziomu błędów transmisji w zależności od względnego poziomu zakłócenia względem sygnału użytecznego oraz od różnicy częstotliwości. Zależność tą przedstawiono na wykresie poniżej.



Rys. 5.22. Zależność poziomu błędów transferu transmisji pakietowej od wzajemnej różnicy częstotliwości i poziomu między sygnałem użytecznym i zakłócającym



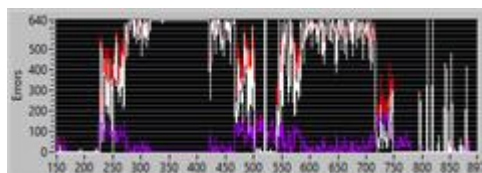
Rys. 5.23. Widoczny spadek ilości błędów przy obniżaniu poziomu sygnału zakłócającego w stosunku do stałego poziomu sygnału użytecznego. Częstotliwości obu sygnałów się pokrywają. Oś pionowa: ilość błędnych bajtów wśród 640 bajtów przesyłanych. Oś pozioma: numery kolejnych odczytów takiej samej paczki 640 bajtów nadawanych przez drugie urządzenie USRP. Kolory: biały – ilość bajtów nieodebranych, fioletowy – ilość bajtów przekłamanych, biały – sumaryczna ilość bajtów błędnych w paczce 640 bajtów.



Rys. 5.24. Widoczny nierównomierny wzrost i spadek ilości błędów przy zmniejszaniu i zwiększaniu różnicy częstotliwości między sygnałem użytecznym i zakłócającym. Oś pionowa: ilość błędnych bajtów wśród 640 bajtów przesyłanych. Oś pozioma: numery kolejnych odczytów takiej samej paczki 640 bajtów nadawanych przez drugie urządzenie USRP. Kolory: biały – ilość bajtów nieodebranych, fioletowy – ilość bajtów przekłamanych, biały – sumaryczna ilość bajtów błędnych w paczce 640 bajtów.

Tak jak zostało to pokazane na wykresach powyżej, obserwowano zarówno efekty generowane w przypadku zmiany częstotliwości sygnałów względem siebie (jak pokazano na rysunku 5.23) jak również poprzez zmiany amplitudy (jak pokazano na rysunku 5.24.).

Efekt zbliżenia do kanału transmisji danych, symulującego pożądaną transmisję WSD, którego częstotliwość środkowa wynosiła 610 MHz, sygnału zakłócającego sinusoidalnego poprzez przesunięcie częstotliwości z 609,32 MHz na częstotliwość 609,36 MHz, czyli przy zmianie częstotliwości o 40 kHz, generuje widoczny wzrost udziału „zgubionych” pakietów (linia biała) w stosunku do liczby danych przekłamanych (linia fioletowa). Po oddaleniu na poprzednią częstotliwość 609,32 MHz maleje znacznie ilość „zgubionych” pakietów na rzecz pakietów przekłamanych. W dalszym ciągu należy uznać transmisję za silnie zakłóconą. W obu przypadkach odbiornik wykorzystuje maksymalną dopuszczalną liczbę (16) powtarzania detekcji nieodebranych pakietów. Po dalszym odsunięciu sygnału zakłócającego na częstotliwości 609,22 MHz, czyli o 10 kHz w stosunku do początkowego stanu pomiarów, zakłócenia znacznie maleją, brak jest nieodebranych pakietów, a pakiety przekłamane występują pojedynczo. Jednocześnie maleje do około 8 liczba powtórzeń detekcji pakietów, co znacznie zmniejsza czas potrzebny do odebrania wszystkich 40 pakietów składających się na transmisję pojedynczej wiadomości złożonej z 640 znaków.



Rys. 5.25. Rysunek pokazuje efekt zbliżania się zakłócenia sinusoidalnego do sygnału użytecznego, aż do wyrównania częstotliwości, a następnie ponownego oddalania się częstotliwości. Oś pionowa: ilość błędnych bajtów wśród 640 bajtów przesyłanych. Oś pozioma: numery kolejnych odczytów takiej samej paczki 640 bajtów nadawanych przez drugie urządzenie USRP. Kolory: biały – ilość bajtów nieodebranych, fioletowy – ilość bajtów przekłamanych, biały – sumaryczna ilość bajtów błędnych w paczce 640 bajtów.

Podczas badań obserwowano również dodatkowy efekt widoczny na powyższym rysunku po prawej stronie – jest to wtórna nierównomierność wpływu zakłócenia po oddaleniu się sygnałów; zjawisko to jest powtarzalne. Podczas oddalania w dziedzinie częstotliwości sygnału zakłócającego względem sygnału użytecznego w pewnym momencie zamiast prognozowanego dalszego spadku ilości błędów następuje zauważalny wzrost błędów, a następnie, przy dalszym oddalaniu sygnału następuje zupełny zanik błędów. Efekt ten związany jest z intermodulacjami na wejściu odbiornika.

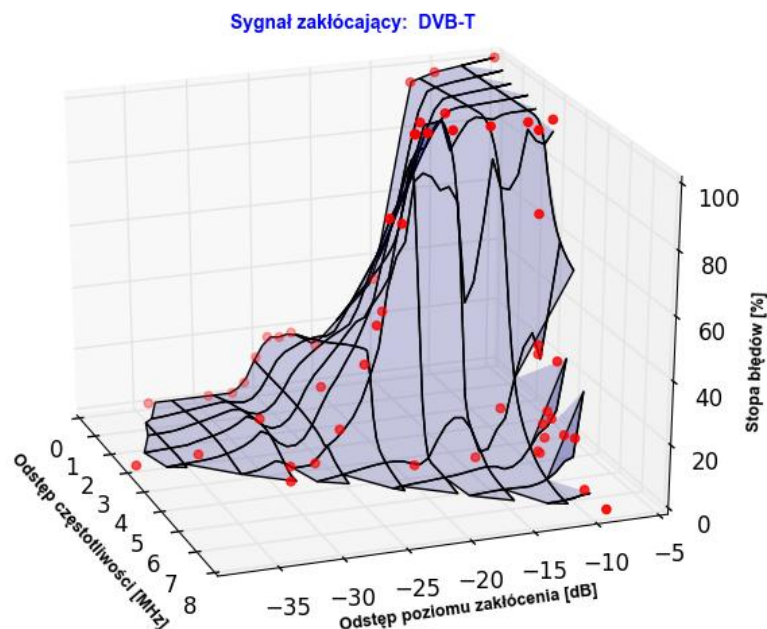
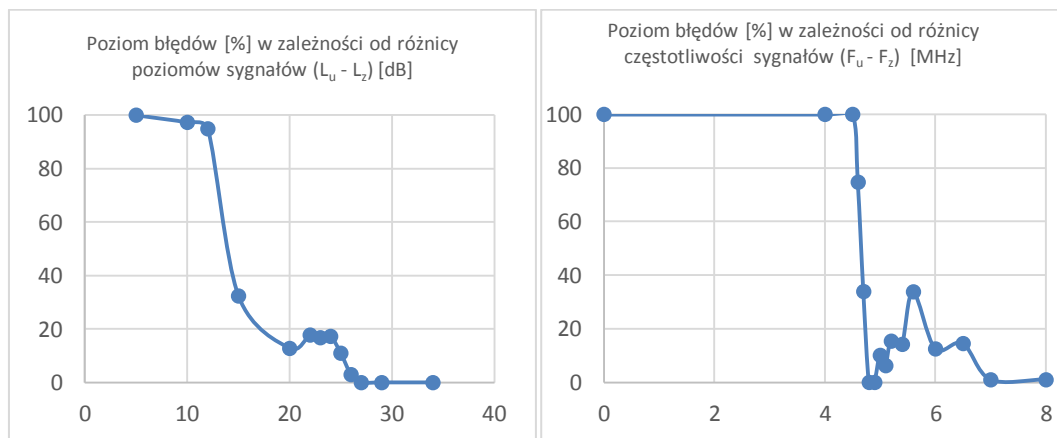
### 5.6.2 Sygnał zakłócający: DVB-T

Sygnał szerokopasmowy DVB-T jest naturalnym zakłóceniem jakie z punktu widzenia WSD będzie współdzieliło zakres częstotliwości, w którym te urządzenia będą mogły pracować, zwłaszcza w znacznej odległości od zasięgu wskutek np. sporadycznej propagacji troposferycznej. Scenariusze stosowania WSD co prawda mówią o tym, że do takiej kolizji zasadniczo dojść nie powinno, jednakże z uwagi na charakter niniejszej pracy zdecydowano się przyjąć do badań również taki scenariusz, który może zaistnieć w krótkim okresie czasu (np. 1% czasu w roku). Dodatkowo sygnał DVB-T może również w tak wstępnych badaniach stanowić odpowiednik sygnałów szerokopasmowych modulowanych złożonymi modulacjami cyfrowymi, które w przyszłości mogą się pojawić i współistnieć z zakresie częstotliwości naziemnej telewizji cyfrowej. Jako źródło sygnału zakłócającego DVB-T 64QAM, o parametrach: code rate 7/8, guard interval 1/4, user bandwidth 7,607 MHz, useful data rate 24 MBit/s, posłużył generator TV Test Transmitter SFQ produkcji Rohde&Schwarz.



Zebrane wyniki pomiaru poziomu błędów transmisji w zależności od względnego poziomu zakłócenia względem sygnału użytecznego oraz od różnicy częstotliwości przedstawiono na wykresie poniżej.

Widoczna różnica w odległości częstotliwości pomiędzy wykresami dla zakłócenia typu SINUS i DVB-T wynika z faktu, że dla obu wykresów przyjęto do obliczenia różnicy przesunięcia częstotliwościowego jako początek częstotliwości środkowe. W przypadku sygnału DVB-T szerokość górnej części charakterystyki widmowej (Rys.4.19.) wynosi około 7,4 MHz, natomiast sygnał SINUS jest z natury wąskopasmowy.

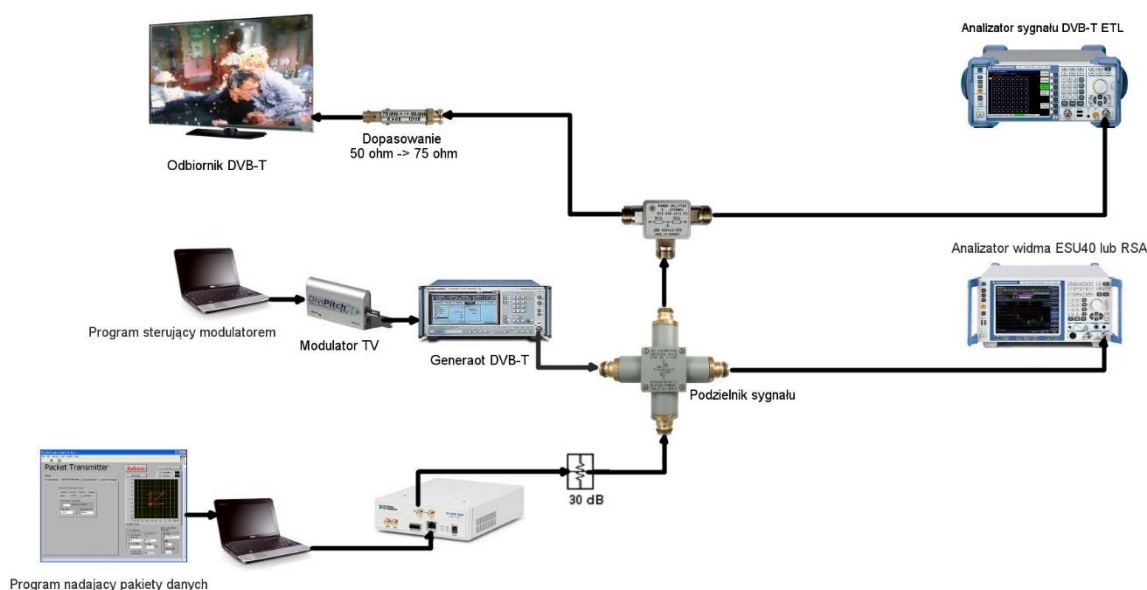


Rys. 5.26. Nieliniowa zależność poziomu błędów transferu transmisji pakietowej od wzajemnej różnicy częstotliwości i poziomu między sygnałem użytecznym i zakłócającym

### 5.6.3 Zakłócanie DVB-T przez WSD

Sygnały jakie mogą pochodzić od WSD wpływają na jakość odbioru DVB-T. W obecnej chwili, kiedy regulacje krajowe nie definiują jeszcze wszystkich kwestii technicznych dla WSD, istotne jest aby przygotować również informacji, przydatne do włączenia do aktów prawnych, mówiące o parametrach widmowych mających zabezpieczyć użytkownika pierwszej ważności, jakim jest transmisja DVB-T. Wykonane badania mogą pomóc przy właściwym zdefiniowaniu wymagań regulacyjnych, zabezpieczających odbiór sygnałów telewizji naziemnej.

W pracy przeprowadzono badania, wykorzystując metodę oceny subiektywnej, jaka przyjęta jest w normie dla odbiorników telewizyjnych PN-EN 55020, jak również metodę obiektywną z wykorzystaniem analizatora jakości sygnału telewizyjnego [16]. Układ pomiarowy stosowany w tej części badań został przedstawiony na rysunku poniżej.



Rys. 5.27. Układ pomiarowy do oceny wpływu zaburzeń powodowanych przez transmisję pakietową w odbiorze sygnału DVB-T widocznego na ekranie telewizora z użyciem analizatora sygnału DVB-T

Niżej opisane badanie miało na celu stwierdzenie, w jaki sposób transmisja pakietowa (symulująca pracę WSD) może zakłócać odbiór programu telewizyjnego DVB-T we współczesnym odbiorniku telewizyjnym. Do badań użyto odbiornika SAMSUNG

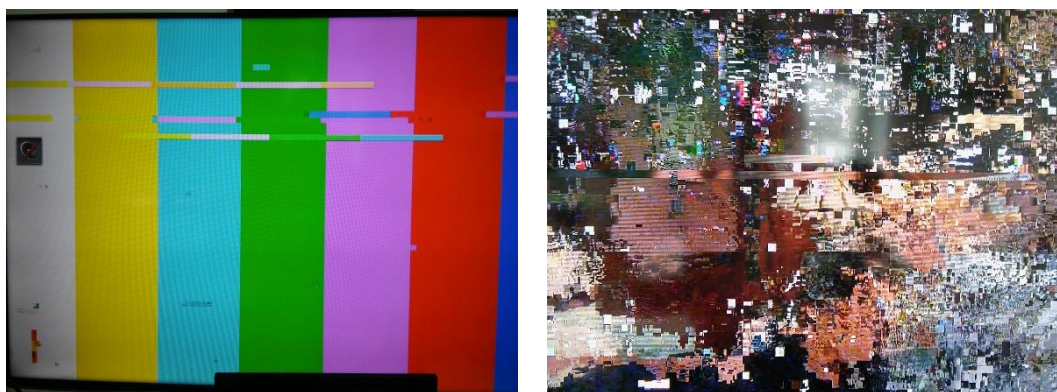
UE50H5500AWXXH. Jako sygnału wzorcowego użyto gotowych plików zawierających obraz kontrolny.

Z uwagi na to, że sygnał kontrolny zalecany w normie PN-EN 55020 jest sygnałem znacznie bardziej odpornym na wpływ niepożądanych efektów, niż rzeczywista transmisja (obraz ruchomy), podczas badań stosowano również plik wideo zawierający sekwencję ruchomą, dającą o wiele bardziej zauważalne efekty wpływu na jakość transmisji (zakłócenie jest zauważalne przy mniejszym poziomie sygnału zakłócającego).



Rys. 5.28. Wykorzystane do badań obrazy wzorcowe

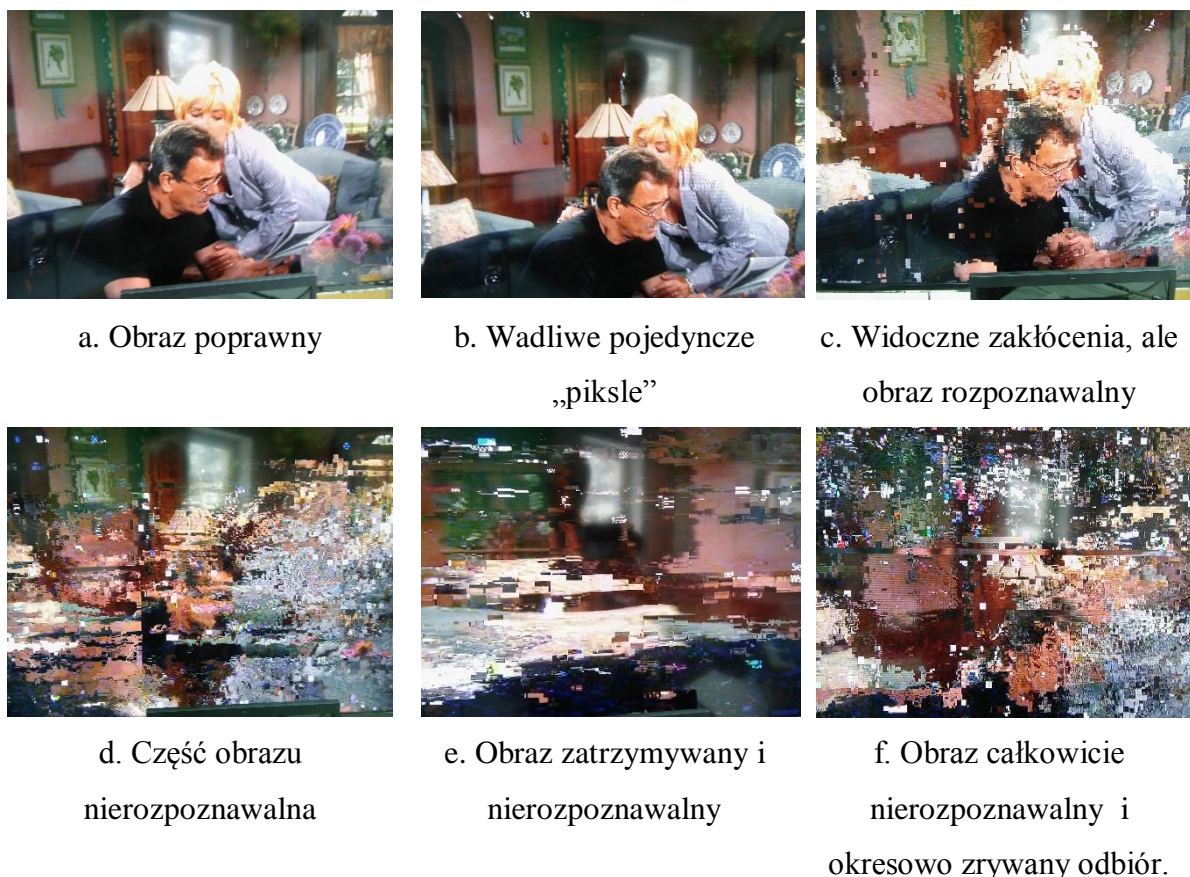
W trakcie badań potwierdzono większą odporność na zakłócenia obrazu kontrolnego złożonego z jednorodnych pasów. Analogiczny poziom zakłócenia obrazu ruchomego uzyskiwano przy poziomie sygnału zakłócającego niższym o około 2 dB.



Rys. 5.29. Różnica stopnia zakłócenia odbioru przy identycznym poziomie zakłócenia dla różnych typów obrazu

W dalszych badaniach użyto tylko sekwencji filmowej.





Rys. 5.30. Degradacja odbioru DVB-T pod wpływem transmisji pakietowej prowadzonej w tym samym kanale lub w bliskim sąsiedztwie kanału (ocena subiektywna)

Oprócz oceny subiektywnej (na podstawie oceny obrazu na ekranie odbiornika DVB-T) wykonano także ocenę obiektywną z użyciem analizatora sygnału DVB-T. Jako analizator został wykorzystany ETL TV Analyzer firmy Rohde & Schwarz. W dalszej części pracy (w Tab. 4.1) zaprezentowano wyniki badań wykonanych za pomocą analizatora i odniesiono je do wyników równoległej oceny subiektywnej i zarejestrowanych na analizatorze widma RSA przebiegów widma łącznego sygnału zakłócającego i użytecznego.

W celu przybliżenia zagadnienia pomiaru jakości sygnału DVB-T autorzy w kolejnych kilku akapitach krótko wyjaśnili najistotniejsze parametry stosowane w pomiarach jakości sygnału DVB-T.

Pierwszym elementem, który należy omówić jest FEC (Forward Error Correction). FEC opiera się na algorytmach, które wprowadzają nadmiarowe dane do transmisji (ta nadmiarowość nie ma żadnej wartości informacyjnej i wymaga zwiększenia pasma), co pozwala na wykrycie

przez odbiornik błędów i dokonanie stosownej korekcji powstałych w trakcie propagacji i zakłócania.

Algorytmy FEC stosowane tradycyjnie w DVB-T to algorytmy Viterbiego i Reeda-Solomona (RS) (oba wykonywane łącznie jeden po drugim). Wraz z opracowaniem standardów DVB-S2 i DVB-T2, role tych algorytmów przejęły nowocześniejsze rozwiązania LDPC i BCH. Do określania błędów powstałych w trakcie transmisji stosuje się poniższe dwie miary:

- BER (Bit Error Rate) tj. bitowa stopa błędów, jest ona stosunkiem ilości źle odebranych bitów do wszystkich odebranych bitów;
- PER (Packet Error Rate) tj. pakietowa stopa błędów, jest ona stosunkiem ilości źle odebranych pakietów (mowa tu o pakietach TS rozmiaru 188 bajtów) zmierzonych po dokonaniu korekcji do ilości odebranych pakietów.

Zarówno na podstawie pomiaru BER, jak i PER można szacować jakość przesyłanego sygnału cyfrowego. Przy czym w tradycyjnych systemach transmisyjnych (DVB-T) zazwyczaj wykorzystuje się wartość BER.

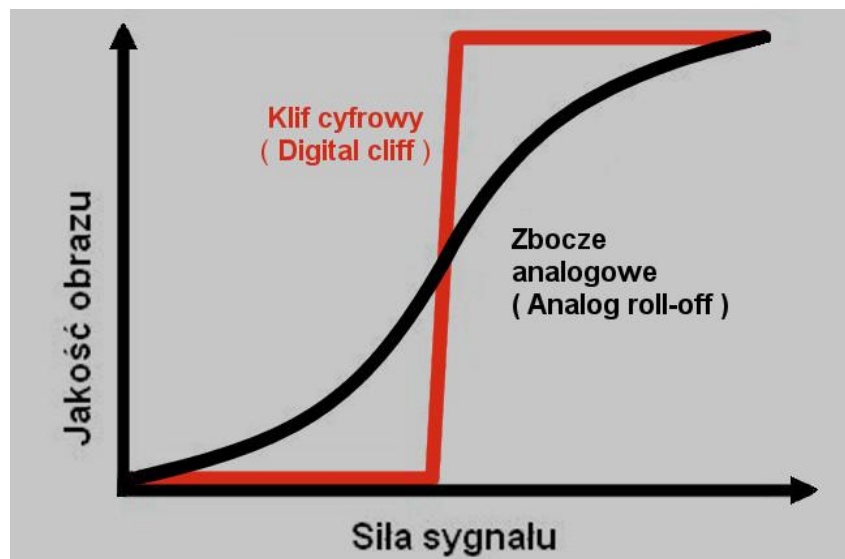
W nowych systemach nadal stosuje się BER, jego wartość jest mierzona po zastosowaniu algorytmu LDPC (low-density parity-check), zanim rozpocznie się wykonywanie algorytmu BCH. Wartość BER uzyskana po przeprowadzeniu LDPC powinna wynosić maksymalnie  $1e-7$ . Podobnie zalecane jest aby zachować minimum 5 dB odstępu od punktu granicznego (punktu, przy którym zmiana wynoszącej 0,2 dB towarzyszy zmiana z  $1e-7$  do  $1e-1$  [5.10 – 5.15].

Współczynnikiem który uznawany jest jako miara jakości sygnału jest MER (Modulation Error Ratio) będący wypadkową miarą wszystkich zakłóceń wpływających na sygnał telewizji cyfrowej.

Chcąc dobrze zrozumieć istotę pomiarów współczynnika MER należy mieć na uwadze fakt występowania tzw. klifu cyfrowego związanego z odbiorem DVB-T. W przypadku sygnałów analogowych, pogarszający się C/N (stosunek nośna/szum) powoduje stopniową degradację jakości sygnału. Przykładowo, sygnał o C/N równym 44 dB oznacza z reguły bardzo dobrą jakość obrazu. Spadek C/N o około 10-15 dB owocuje wzrostem zaszumienia obrazu, przy czym większość z odbiorców uzna go za akceptowalny. Przy spadku C/N o kolejne 10-15 dB, obraz staje się nie do zaakceptowania na skutek dużego poziomu szumów.

Sytuacja przy odbiorze telewizji DVB-T jest zupełnie inna. Sygnał bardzo dobrej jakości odbierany jest do momentu jego zupełnego zaniku. Istnieje więc bardzo wąska granica między sygnałem idealnym a jego zupełnym brakiem. W praktyce jeśli zdarzy nam się odszukać tę wąską granicę, na ekranie telewizora zaobserwujemy pojawiające się obszary, w których

powstają potocznie zwane „piksele” i zamrożenia obrazu. Opisywany efekt to wspomniany wcześniej efekt klifu cyfrowego.



Rys. 5.31. Efekt klifu cyfrowego w telewizji DVB-T. W telewizji analogowej jakość obrazu spada stopniowo

MER traktować można nie tylko jako miarę jakości sygnału, ale również jako miarę marginesu, jaki pozostawia nam instalacja do całkowitego zaniku sygnału. Typowe oraz minimalne wartości parametru MER dla uzyskania prawidłowego odbioru uzależnione są od technik modulacji. Doświadczenia praktyczne wskazują, że dla modulacji 64-QAM za wartość minimalną przyjąć należy 26 dB, z kolei wartości typowe to 30-31 dB [5.9].

Autorzy pragnąc przybliżyć zagadnienia związane z pomiarami jakie zostały wykonane przy metodzie obiektywnej, poniżej zamieścili kilka dodatkowych informacji jakie należy dodać na temat bitowej stopy błędów (BER), na podstawie której zobrazowano wyniki badań obiektywnych wpływu sygnału pochodzącego z transmisji WSD na jakość odbioru DVB-T.

BER jest istotnym parametrem, który należy brać pod uwagę podczas dokonywania pomiarów sygnału naziemnej telewizji cyfrowej. Mówi on o tym, jaka część bitów, które docierają do odbiornika została przekłamana na skutek występujących w kanale transmisyjnym zakłóceń i interferencji. Istnieje kilka rodzajów współczynnika BER. Sygnał cyfrowy przed przesłaniem poddawany jest kodowaniu nadmiarowemu. Oznacza to, że oprócz użytecznych informacji nadajnik wysyła również bezużyteczne z punktu widzenia odbiorcy dane pozwalające na naprawę przekłamanych po drodze bitów. O ilości tych bitów decyduje parametr FEC (Forward Error Correction). Zwykle wynosi on  $\frac{3}{4}$  lub  $\frac{5}{6}$ , co oznacza odpowiednio 25% lub 17% danych nadmiarowych w stosunku do całego przesyłanego sygnału. Im większy FEC, tym

mniej błędów otrzymamy po stronie odbiornika. Należy mieć jednak na uwadze również fakt, że zbyt duża wartość tego parametru powodować mogą niepotrzebne ograniczenia przepustowości danego kanału transmisyjnego.

Zakodowany nadmiarowo sygnał cyfrowy poddawany jest po stronie odbiorczej procesowi dekodowania oraz korekcji. Ze względu na stosunkowo nieskomplikowaną implementację sprzętową, najczęściej wybieranym algorytmem jest algorytm Viterbiego. Sama zasada działania algorytmu nie jest istotna z punktu widzenia prowadzonych w pracy badań, jedyną informacją o której należy wspomnieć jest to, że sygnały przed i po zdekodowaniu/korekcji to dwa różne sygnały z punktu widzenia ilości występujących w nich błędów. W tym miejscu zdefiniować możemy następujące typy parametru BER:

- BER before Viterbi - bitowa stopa błędów, której pomiar dokonywany jest po zdekodowaniu a przed korekcją Viterbiego. Z punktu widzenia zagrożeń zakłóceniami, pomiar tego parametru jest najbardziej istotny;
- BER before RS - bitowa stopa błędów, której pomiar dokonywany jest po korekcji Viterbiego i przed korekcją Reeda-Solomona (RS). Wartość tego parametru jest z reguły około 10 000 razy mniejsza od BER. Służyć może raczej do długoterminowej oceny jakości sygnału, a nie do oceny stopnia zakłócenia sygnału;
- BER after RS - bitowa stopa błędów, której pomiar dokonywany jest po korekcji Viterbiego i po korekcji Reeda-Solomona (RS).

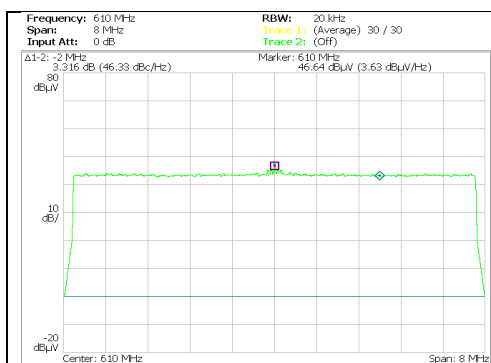
Za dobry jakościowo przyjmowany jest sygnał o wartości BER równej  $1E-4$  [5.15]. Jest to tzw. wartość QEF (Quasi Error Free) oznaczająca pseudo niezakłócony odbiór. Oczywiście dążyć należy do uzyskania jak najniższych wartości parametru BER.

Wyniki przeprowadzonych w tej części pracy badań zebrano w Tabeli 1, zaś na rysunku 5.32 zobrazowano warunki dla obu sygnałów na spektrogramach. Wyniki uzyskane przy ocenie metodą obiektywną są powiązane z odpowiednio wcześniej prezentowanymi wynikami, uzyskanymi podczas oceny subiektywnej.

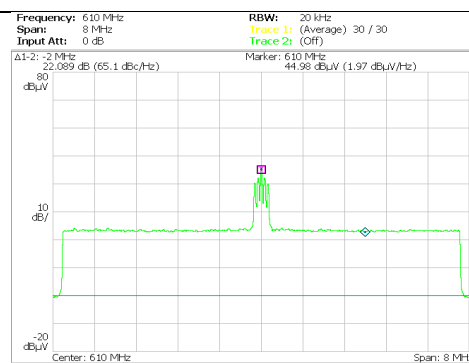


Tabela 5.1. Wyniki pomiarów zakłóceń sygnału DVB-T – pomiary wykonane przy użyciu analizatora ETL firmy Rohde&Schwarz (ocena obiektywna)

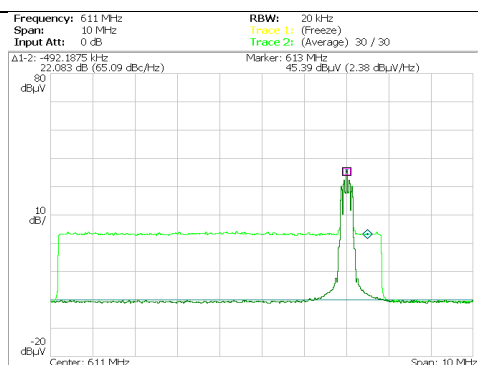
Lp	$F_z - F_u$	$L_z - L_u$	BER before Viterbi	BER before RS	BER after RS	Packet Error Ratio	Packet Errors
	[MHz]	[dB]					/s
1.	Bez zakłóceń	Bez zakłóceń	6,6e-4	7,3e-3	0	1,7e+4	0
2.	0	3	8,8e-3	8,1e-4	5,6e-3	0	0
3.	0	22	1,4e-2	8,9e-3	6,0e-3	1	1,7e+4
4.	3	22	1,0e-2	8,1e-3	5,8e-3	9,8e-1	1,7e+4
5.	4	22	5,7e-3	8,4e-3	7,2e-4	1,2e-1	0
6.	5	32	5,9e-3	8,9e-3	9,0e-4	1,5e-1	3,3e+3
7.	4,5	32	1,4e-3	1,4e-3	9,0e-5	1,5e-2	0
8.	5	62	6,8e-4	8,7e-4	2,8e-8	4,6e-6	0
9.	5,5	62	8,8e-4	8,9e-4	1,0e-8	1,6e-6	0



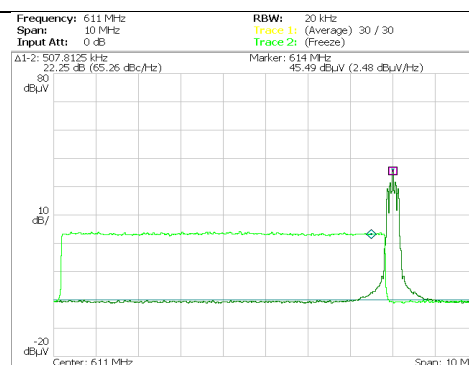
Brak zakłóceń (a, p.2)



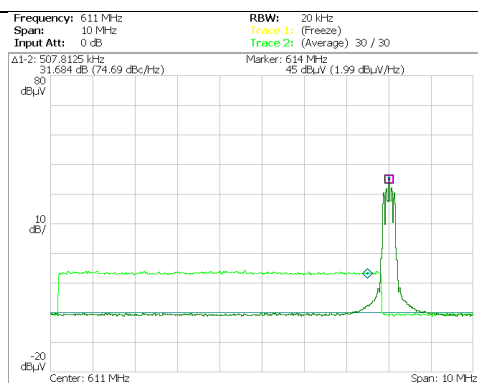
Cały obraz nieczytelny (e, p.3)



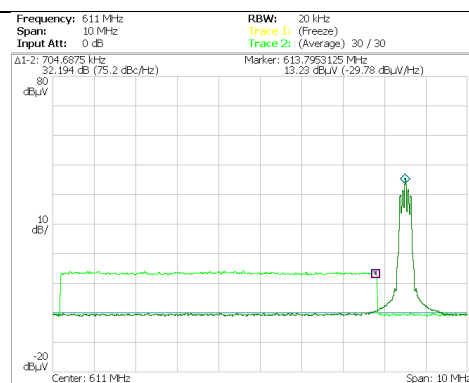
Półowa obrazu nieczytelna (d, p.4)



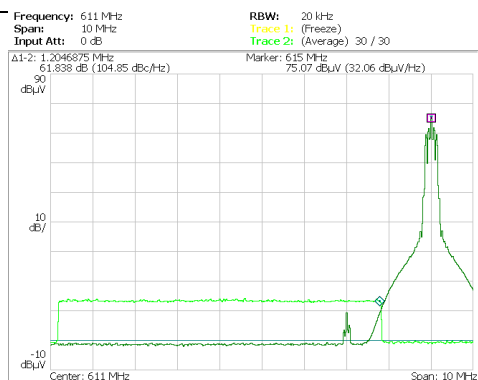
Brak zakłóceń (a, p.5)



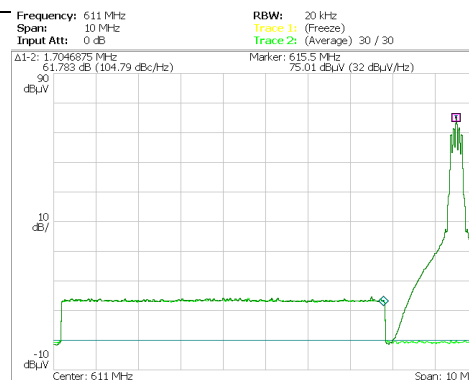
¼ obrazu zakłócona (c-d, p.6)



Brak zakłóceń (a, p.7)



1/8 obrazu zakłócona (c, p.8)



Brak zakłóceń (a, p.9)

Rys. 5.32. Wpływ położenia i poziomu sygnału zakłócającego (transmisja pakietowa) względem sygnału DVB-T na poziom zakłóceń obrazu widocznego na odbiorniku DVB-T. Oznaczenia literowe odnoszą się do Rys. 4.30, a odniesienia do numerów pozycji dotyczą Tabeli 5.1.

## 5.7 Podsumowanie

W trakcie pracy opracowano metody pomiarów, przygotowano oprogramowanie wspomagające pomiary, uruchomiono stanowiska pomiarowe i je praktycznie zweryfikowano poprzez wykonanie sporej liczby pomiarów. Przygotowane stanowiska o w pełni kontrolowanych tłumieniach pozwalają na wykonywanie pomiarów odporności urządzeń pracujących w paśmie naziemnej telewizji cyfrowej i wyznaczaniu współczynników ochronnych. Dodatkowo uruchomiono testową radiową transmisję pakietową w paśmie naziemnej telewizji cyfrowej z wykorzystaniem urządzeń Software Defined Radio pełniącego funkcję urządzenia WSD, potwierdzającą praktyczną możliwość realizacji i przydatność takich rozwiązań w Polsce. Jest to jedna z pierwszych transmisji tego typu w kraju, nie są autorom znane inne krajowe badania zakłóceń urządzeń WSD w paśmie telewizyjnym.

Wraz z efektami pracy z poprzedniego roku 2014 [5.1], w której przedstawiono m.in. wyniki badań WSD pod kątem zgodności z nową normą [5.8] opracowane metody badawcze i sprawdzone stanowiska pomiarowe pozwalają na podjęcie kroków zmierzających do wprowadzenia w laboratoriach IŁ-PIB nowych procedur mogących poszerzyć naszą działalność w dziedzinie badań komercyjnych o badania urządzeń WSD, w zakresie odporności urządzeń na wpływ sygnałów niepożądanych jak i weryfikacji parametrów użytecznych transmisji zestawionej przy wykorzystaniu urządzeń WSD. Przyczynić się to może również do współpracy z Administracją w sprawie opracowania w przyszłości wymagań regulacyjnych urządzeń WSD w Polsce.

Należy jednak zwrócić uwagę na to, że urządzenia zastosowane podczas realizacji niniejszej pracy (prób laboratoryjnych), nie są komercyjnymi rozwiązaniami WSD, tylko radiami programowalnymi. Część funkcji programowych jest realizowana w samym urządzeniu, jednak obsługa samej transmisji, demodulacja zakodowanej informacji i jej prezentacja odbywa się z użyciem komputera sterującego. W urządzeniach WSD całość przetwarzania odbywa się w jednym urządzeniu. Analizując pomiary należy też uwzględnić fakt, że wyniki związane z wyznaczonymi wartościami granicznymi dla urządzeń WSD mogą się w pewnym stopniu różnić od uzyskiwanych wyników w oparciu o radio programowalne.

## 5.8 Literatura do rozdziału 5

- [5.1] Zarządzanie częstotliwościami radiowymi i inżynieria widma. Raport Instytutu Łączności PIB Z21/21300014/95/2014. Gdańsk Warszawa Wrocław, grudzień 2014.
- [5.2] Statutory Instruments 2015 No. 2066 Electronic Communications, The Wireless Telegraphy (White Space Devices) (Exemption) Regulations 2015  
[http://www.legislation.gov.uk/ukxi/2015/2066/pdfs/ukxi\\_20152066\\_en.pdf](http://www.legislation.gov.uk/ukxi/2015/2066/pdfs/ukxi_20152066_en.pdf)
- [5.3] <http://www.tvtechnology.com/news/0002/nab-and-white-space-device-makers-agree-on-geolocation/276633>
- [5.4] [http://www.pewinternet.org/2015/12/21/home-broadband-2015/pi-2015-10-21\\_broadband2015-00/](http://www.pewinternet.org/2015/12/21/home-broadband-2015/pi-2015-10-21_broadband2015-00/)
- [5.5] <https://www.washingtonpost.com/news/the-switch/wp/2013/08/19/the-60-million-americans-who-dont-use-the-internet-in-six-charts/>
- [5.6] <http://www.techrepublic.com/article/white-space-the-next-internet-disruption-10-things-to-know/>
- [5.7] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pl/nid/212995>
- [5.8] ETSI EN 301 598 v1.1.1. White Space Devices (WSD); Wireless Access Systems operating in the 470 MHz to 790 MHz TV broadcast band; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive.
- [5.9] [http://www.dipol.com.pl/pomiary\\_i\\_wzmacnianie\\_cyfrowych\\_sygnalow\\_dvb-t\\_bib212.htm](http://www.dipol.com.pl/pomiary_i_wzmacnianie_cyfrowych_sygnalow_dvb-t_bib212.htm)
- [5.10] Neural Network Based Software for Calculation BER Parameter of DVB-T Receiver; Marija Milijić, IEEE Member, Bratislav Milovanović, IEEE Member, Zoran Stanković, IEEE Member; 20th Telecommunications forum TELFOR 2012.
- [5.11] Analysis of measurement results of DVB-T signals in Croatia Kopecki, A. ; Croatian Post & Electron. Commun. Agency, Zagreb, Croatia; Rimac-Drlje, S.
- [5.12] DVB-T and DVB-T2 performance in fixed terrestrial TV channels; Polak, L. ; Dept. of Radio Electron., Brno Univ. of Technol., Brno, Czech Republic ; Kratochvil, T.; 2012 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP);
- [5.13] Influence of Mobile Network Interfering Products on DVB-T/H Broadcasting Services ; Ladislav POLAK, Ondrej KALLER, Lukas KLOZAR, Jan PROKOPEC; Department of

Radio Electronics, Brno University of Technology, Sensor, Information and Communication Systems (SIX) Research Center, Brno, Czech Republic.

- [5.14] Influence of LTE uplink system on DVB-T system at different coexistence scenarios; Polak, L.; Dept. of Radio Electron., Brno Univ. of Technol., Brno, Czech Republic ; Plaisner, D. ; Kaller, O. ; Kratochvil, T.; 2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP).
- [5.15] Digital Video Broadcasting (DVB); Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television, European Telecommunications Standards Institute. ETSI EN 300 744 V1.6.2 (2015-10).
- [5.16] ETSI TR 101 290 V1.3.1 (2014-07) Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement guidelines for DVB systems.

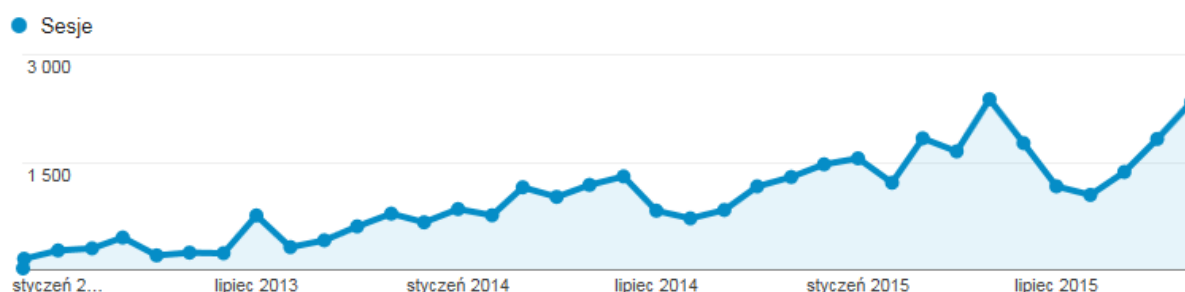
## 6 Rozszerzenie funkcjonalności serwisu [www.piast.edu.pl](http://www.piast.edu.pl)

### 6.1 Wprowadzenie i stan wyjściowy

Serwis [www.piast.edu.pl](http://www.piast.edu.pl) powstał jako część platformy informatyczna PIAST (Platforma Informatyczna Analiz Systemów Telekomunikacyjnych). Projekt ten zrealizowano w Pracowni Gospodarki i Inżynierii Widma Zakładu Kompatybilności Elektromagnetycznej Instytutu Łączności – PIB we Wrocławiu. Finansowany był przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (EFRR) w ramach działania 2.3 Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (POIG). Instytucją zarządzającą projektem było Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Celem projektu było rozwinięcie platformy informatycznej pod względem sprzętowym jak i programowym oraz wdrożenie nowych usług projektowania, optymalizacji i analiz kompatybilności sieci bezprzewodowych systemów telekomunikacyjnych i teleinformatycznych. Narzędzia zrealizowane w ramach projektu PIAST dają szerokie możliwości w zakresie analiz propagacyjnych obejmujących swym zasięgiem dowolne zakresy częstotliwości (od fal długich, średnich i krótkich poprzez fale UKF, VHF, UHF i zakresy milimetrowe) wraz z dodatkowymi możliwościami analiz wzajemnych zakłóceń między różnymi systemami radiowymi w tych samych i sąsiednich zakresach częstotliwości. Platforma obliczeniowa zawiera bazy danych obiektów radiowych pracujących oraz planowanych na terenie całego kraju. Są one utrzymywane i sukcesywnie aktualizowane w ramach prac realizowanych już od lat 80 ubiegłego wieku w Instytucie Łączności we Wrocławiu. Kompletność zawartości tych baz jest niezbędna do profesjonalnej oceny relacji kompatybilnościowych w ramach projektowania i oceny emisji sieci bezprzewodowych.

Zrealizowany projekt w latach 2010 - 2013 w sposób znaczący przyczynił się do rozwoju infrastruktury obliczeniowej Instytutu Łączności poprzez rozszerzenie portfolio aplikacji oraz dostarczanych usług, dzięki którym oferta komercyjna IŁ została znacznie wzbogacona. Inżynierowie pracujący w naszej placówce wykorzystując platformę PIAST realizują projekty sieci na terenie Polski. W ramach platformy zrealizowano również bezpłatne narzędzie umożliwiające zapoznanie się z inżynierią projektowania wyżej wspomnianych sieci. Dzięki współpracy Instytutu Łączności z Politechniką Wrocławską studenci tej uczelni korzystają z rozszerzonej wersji oprogramowania w ramach zajęć laboratoryjnych. Instytut Łączności przygotował również ofertę dla podmiotów komercyjnych, które poprzez zdalny dostęp do platformy obliczeniowej w ramach własnych skonfigurowanych kont mogą realizować analizy propagacyjne w zakresie podpisanej umowy.

Ze względu na ciągły rozwój sieci bezprzewodowych w ramach różnych technologii przesyłu, lecz w tym samym ograniczonym widmie radiowym, zauważa się ciągły wzrost zapotrzebowania na wykonywanie analiz propagacyjnych. Poza dużą liczbą projektów profesjonalnie przygotowanych przez inżynierów Instytutu Łączności, realizowanych przy wykorzystaniu platformy obliczeniowej PIAST, odnotowuje się systematyczny wzrost zainteresowania narzędziem w jego części udostępnianej przez Internet, zarówno przez użytkowników z Polski jak i tych, pracujących w innych krajach europejskich. Mimo to, że odbiorcą docelowym do tej pory był rynek krajowy, portal WWW jest również coraz częściej odwiedzany przez użytkowników z zagranicy. Na przestrzeni ostatnich trzech lat sesje użytkowników z krajów sąsiednich stanowiły 5 % wszystkich zrealizowanych sesji.



Rys.6. 1 Liczba sesji w okresie między 30.11.2012 r. a 30.11.2015 r.

## 6.2 Cel zadania

Powyższe dane wskazują na duży potencjał produktu, którego rozwój rozpoczęto w Instytucie Łączności. Wykazuje on duże możliwości biznesowe, a bezpośredni kontakt z podmiotami, przede wszystkim związanymi z branżą ICT obserwowane tendencje wzrostowe może w znaczny sposób zwielokrotnić. W związku z powyższym w ramach pracy statutowej wykonano wdrożenie nowych funkcjonalności umożliwiających podniesienie jakości oferty dla podmiotów i jednostek komercyjnych. Celem pracy było również dostosowanie platformy obliczeniowej do sprawniejszego administrowania wystawioną usługą.



### 6.3 Wykonanie i wprowadzone zmiany w aplikacji

Zaktualizowany serwis WWW podnosi wartość biznesową produktu. Nowy użytkownik otrzymuje aplikację dostępną z każdego miejsca na świecie poprzez sieć WWW. Dostęp ten umożliwił do tej pory wykonywanie takich obliczeń jak:

- wykonywanie rozkładów natężenia pola elektromagnetycznego - wykorzystując zbiór wskazanych modeli propagacyjnych, numeryczne modele terenu typu DEM/DTM, cyfrowe mapy parametrów elektrycznych, klimatycznych i atmosferycznych Ziemi i powietrza, sparametryzowane dane systemów i urządzeń radiowych,
- wyznaczanie stref Fresnela oraz profilu terenu przy wskazanym współczynniku zastępczego promienia Ziemi,
- wyznaczanie tłumienia dyfrakcyjnego ponad gładką Ziemią,
- wyznaczanie tłumienia dyfrakcyjnego na dwóch klinach,
- obliczenia strefy ochronnej - strefy wokół anteny, w której gęstość mocy pola elektromagnetycznego jest większa niż założony limit w zakresie częstotliwości 0,3 - 300 [GHz],
- obliczenia przy wykorzystaniu pakietu kalkulatorów inżynierskich oraz geograficznych.

Nowa wersja aplikacji oferuje dostęp do narzędzia wyznaczania rozkładów natężenia pola za pomocą modelu ITU-R P.1546-5 w najnowszej, zaktualizowanej wersji piątej tej metody. Wprowadza ona następujące istotne zmiany:

- usunięta została poprawka dla krótkich tras (krótszych niż 15 km) w obszarach miejskich i podmiejskich (Aneks 5, §10 w wersji 4 Zalecenia), która wynika z tłumienia przez przeszkody jakie stanowią budynki. W wersji tej dodano następujące poprawki:
- dodano poprawkę związaną z tłumieniem sygnału terminala nadawczego/stacji bazowej w przypadku, gdy w otoczeniu anteny tego terminala znajdują się przeszkody (Aneks 5, §10). Poprawka ta jest analogiczna do poprawki związanej z występowaniem przeszkód w otoczeniu anteny terminala odbiorczego (Aneks 5, §9),
- dodano poprawkę związaną z różnicą długości drogi pomiędzy antenami, wyznaczonej jako odległość horyzontalna między lokalizacjami anten nadawczej i odbiorczej, a długością trasy liczonej od środków wysokości zawieszenia anten (Aneks 5, §14).

Wprowadzono zasady taryfikacji obliczeń użytkowników komercyjnych. W ramach umowy użytkownicy wykonują analizy, które są odnotowywane i zliczane zgodnie z zasadami taryfikacji przyjętymi w zakupionej licencji. W ramach pracy statutowej zrealizowano narzędzie do odczytu danych i naliczania opłat. Dzięki tej funkcjonalności administrator serwisu na bieżąco korzysta z dostępu do danych bilingowych, umożliwiających odczyt raportów za pomocą dedykowanego narzędzia, bazującego na obecnie utworzonych aplikacjach CAV (Client Activity Viewer) – Piast oraz CAV - LinRad.

W ramach poprawy bezpieczeństwa oraz realizacji stabilnego rozwoju systemu wprowadzono dodatkowe procedury utrzymaniowe takie jak: określenie i wdrożenie formuły uruchamiania i przywracania funkcjonalności aplikacji WWW po wystąpieniu awarii, wprowadzenie procedury aktualizacji serwisu zapewniającej stałą kontrolę działania aplikacji wraz ze wspierającym ją dostępem monitorowania w sposób ciągły przez administratora systemu, wdrożenie automatycznego mechanizmu tworzącego kopie zapasowe systemu, którego zadaniem jest zabezpieczenie danych aplikacji WWW.

Dzięki rozwinięciu systemu administracja użytkowników odbywa się poprzez ich rejestrację, wskazywanie kluczy dostępowych oraz indywidualnych haseł, a także przypisanie ich do odpowiednich instytucji. Administrator obsługuje narzędzie do dodawania i przeglądania danych o instytucjach komercyjnych wraz z możliwością dodawania i usuwania użytkowników. Narzędzie umożliwia również przedstawianie zbiorczych raportów obliczeniowych dla użytkowników i instytucji wykorzystujących aplikację w celach komercyjnych. Wprowadzone zmiany objęły dostosowanie Front - end'u serwisu WWW do nowych wymagań użytkowych, który został zrealizowany w technologii ASP.NET, aktualizację schematu baz danych w systemie MS SQL Server w tym tabel, widoków oraz procedur składowych. Ponadto poddano aktualizacji logikę obsługi baz danych, jak i również części aplikacji Client Activity Viewer (CAV) rozszerzając zakres działania tej dedykowanej aplikacji.

Okno aplikacji CAV zawiera dane dotyczące aktywności użytkowników, którzy przeprowadzali analizy. Dane analiz zostały wyszczególnione w tabeli i uszeregowane w kolejności chronologicznej. Administrator ma do dyspozycji opcje filtrowania wpisów w zależności od instytucji realizujących analizy oraz w zakresie dat ich wykonania. Zaimplementowane funkcje dają możliwość uzyskania przez administratora pełnego obrazu realizowanego ruchu na platformie obliczeniowej.

Poniżej przedstawiono okno aktualnej aplikacji CAV.

WWW PIAST - Client Activity Viewer

Profile

Rozkłady

Rozliczanie usług

Instytucje komercyjne

Firma komercyjna z Wrocławia

Użytkownicy wybranej instytucji komercyjnej

Monika Nowak

Zakres czasu rozliczenia

1 stycznia 201431 grudnia 2014

Pobierz rozliczenie dla instytucji

Pobierz dane o analizach użytkownika

Ilość wykonanych analiz przez instytucję: 113

	Szerokość geograficzna	Długość geograficzna	Częstotliwość [MHz]	Wys. ant. nad. [m n.p.t.]	Data pierwszej analizy	Data ostatniej analizy	Liczba analiz
▶	53.876575	20.163086	470.000000	100.000000	2014-03-28 15:25	2014-03-28 15:25	1
	53.850658	16.482666	470.000000	100.000000	2014-03-28 15:27	2014-03-28 15:27	1
	53.328983	16.757324	470.000000	100.000000	2014-03-28 15:28	2014-03-28 15:28	1
	53.947758	16.295898	470.000000	100.000000	2014-04-04 14:40	2014-04-04 14:40	1
	53.793915	15.042084	470.000000	100.000000	2014-04-04 15:04	2014-04-04 15:04	1
	53.785801	17.888916	470.000000	100.000000	2014-04-04 15:08	2014-04-04 15:08	1
	53.802025	17.614258	470.000000	100.000000	2014-04-04 15:09	2014-04-04 15:09	1
	54.442650	17.592285	470.000000	100.000000	2014-04-04 15:11	2014-04-04 15:11	1
	54.381912	17.400024	470.000000	100.000000	2014-04-04 15:13	2014-04-04 15:13	1
	49.209591	20.115021	470.000000	100.000000	2014-04-04 15:15	2014-04-04 15:15	1
	53.302731	15.944336	470.000000	100.000000	2014-04-08 14:52	2014-04-08 14:52	1
	54.018822	17.724121	470.000000	100.000000	2014-04-08 16:22	2014-04-08 16:28	2
	54.295444	17.465942	470.000000	100.000000	2014-04-08 16:32	2014-04-08 16:32	1
	54.442650	17.185791	470.000000	100.000000	2014-04-10 11:11	2014-04-10 11:11	1
	54.183090	17.224243	470.000000	100.000000	2014-04-10 11:13	2014-04-10 11:13	1
	53.934826	18.015259	470.000000	100.000000	2014-04-10 11:15	2014-04-10 11:15	1
	53.766327	16.559570	470.000000	100.000000	2014-04-10 13:47	2014-04-10 13:47	1
	53.889526	16.823242	470.000000	100.000000	2014-04-10 13:48	2014-04-10 13:48	1
	54.340302	16.680420	470.000000	100.000000	2014-04-10 14:13	2014-04-10 14:13	1
	54.121967	17.943848	470.000000	100.000000	2014-04-10 14:16	2014-04-10 14:16	1
	54.378716	18.196533	470.000000	100.000000	2014-04-10 14:19	2014-04-10 14:19	1
	54.410694	20.283936	470.000000	100.000000	2014-04-10 14:32	2014-04-10 14:32	1
	54.397903	18.081177	470.000000	100.000000	2014-04-10 14:33	2014-04-10 14:33	1
	53.479626	17.367065	470.000000	100.000000	2014-04-10 14:34	2014-04-10 14:34	1
	53.125099	16.548584	470.000000	100.000000	2014-04-10 14:35	2014-04-10 14:35	1
	52.910305	14.807251	470.000000	100.000000	2014-04-10 15:40	2014-04-10 15:40	1
	54.070423	16.647461	470.000000	100.000000	2014-04-10 15:40	2014-04-10 15:40	1
	54.057014	16.669434	470.000000	100.000000	2014-04-10 15:43	2014-04-10 15:47	2
	54.185787	18.207520	470.000000	100.000000	2014-04-10 15:43	2014-04-10 15:43	1
	52.346291	20.624512	470.000000	100.000000	2014-04-10 15:44	2014-04-10 15:44	1
	50.426941	20.591553	470.000000	100.000000	2014-04-10 15:44	2014-04-10 15:47	2
	52.913090	15.416992	470.000000	100.000000	2014-04-10 15:47	2014-04-10 15:47	1
	53.772820	15.801514	470.000000	100.000000	2014-04-10 15:47	2014-04-10 15:47	1
	52.413891	16.317871	470.000000	100.000000	2014-04-10 15:49	2014-04-10 15:49	1

Rys.6. 2 Okno aplikacji Client Activity Viever

Wybierz język: [PL] [EN] [DE]  
LOG OUT Administrator

Projekt PIAST Narzędzia obliczeniowe Strefa wiedzy  
WERSJA 1.5.0.0

**ADMINISTRACJA: Lista instytucji (klienci komercyjni)**  
<< Powrót

Wybierz z listy nazwę klienta w celu edycji danych lub usunięcia konta.

- Testowa Instytucja Komercyjna 1 [Lista użytkowników] [Dodaj użytkownika]
- Testowa Instytucja Komercyjna 2 [Lista użytkowników] [Dodaj użytkownika]
- Testowa Instytucja Komercyjna 3 [Lista użytkowników] [Dodaj użytkownika]
- Testowa Instytucja Komercyjna 4 [Lista użytkowników] [Dodaj użytkownika]

**Narzędzia obliczeniowe**  
Wyznaczanie profilu terenu  
Wyznaczanie stref oddechowych  
Dyfrakcja na Ziemi sferycznej  
Dyfrakcja na dwóch klinach  
Model propagacji ITU-R P.1546  
Model propagacji Modified Hata  
Kalkulatory inżynierskie  
Kalkulatory geograficzne

**Wyznaczanie profilu terenu**  
Prace identyfikacyjne Instytutu Łączności  
Publikacje naukowe Instytutu Łączności

**Projekt PIAST**  
Instytut Łączności  
Kontakt

INNOWACYJNA GOSPODARKA  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI  
UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI FUNDUSZ ROZWOJU REGIONALNEGO

Platforma informacyjna do celów analiz propagacyjnych, kompatybilności elektromagnetycznej i optymalizacji sieci bezprzewodowych systemów telekomunikacyjnych i teleinformatycznych jest współfinansowana przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Działania 2.3 Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Rys.6.3 Okno panelu administratora aplikacji PIAST

## 6.4 Podsumowanie

Obecna wersja aplikacji umożliwia stworzenie oferty dla klienta zainteresowanego tworzeniem projektów sieciowych we własnym zakresie przy wykorzystaniu profesjonalnych narzędzi, dostosowanych do panujących norm technicznych i prawnych. Dzięki wprowadzonym zmianom klient, korzystający z usługi ma do dyspozycji narzędzie, dzięki któremu wykonuje samodzielnie analizy propagacyjne, za których realizację Instytut Łączności może czerpać zyski. Rozwiązanie takie nie angażuje bezpośrednio inżynierów - planistów pracujących w IŁ, a wprowadzony system bilingowy rejestruje działania klientów i umożliwia obliczanie opłat za korzystanie z narzędzia w ramach zatwierdzonej licencji. Nowa wersja aplikacji zapewnia klientom szerszy wachlarz usług w tym dostęp do analiz przy wykorzystaniu najnowszej wersji modelu propagacyjnego ITU-R. P.1546-5. Jest on dostępny dla użytkowników biznesowych, z dostępem edukacyjnym jak i osób korzystających z wersji darmowej aplikacji. Nowa wersja kierowana jest przede wszystkim do użytkowników biznesowych, którzy otrzymują nowe dodatkowe, bardziej spersonalizowane funkcjonalności. Administrator systemu zostaje wyposażony w profesjonalne narzędzie do rejestracji i kontroli wykorzystania wystawionej usługi komercyjnej.

Aplikacja WWW wraz z platformą obliczeniową PIAST będzie nadal wspierana i rozwijana przez Instytut Łączności tak, aby stanowiła atrakcyjną ofertę dla klientów komercyjnych oraz przyczyniała się do lepszego zrozumienia zasad organizacji sieci przez młodych naukowców.

## 7 Zakończenie

Prowadzone prace badawcze w zakresie nowych technik zwiększenia efektywności wykorzystywania widma radiowego wpisują się a aktualne trendy badawcze w tej dziedzinie prowadzone na świecie i są jednymi z pierwszych w kraju. Na przykład analizy zajętości widma pasm telewizyjnych w Polsce pod kątem wykorzystywania tych pasm do celów transmisji w systemach radia kognitywnego oraz praktyczne testy tego typu transmisji są pionierskie zarówno w skali krajowej jak i regionalnej. Autorzy planują przedstawiać te wyniki na forum krajowym i międzynarodowym, np. w trakcie współorganizowanych (razem z innymi ośrodkami krajów grupy wszechradzkiej) przez zespół IŁ-PIB planowanych Warsztatów na temat Gospodarki i Inżynierii Widma Radiowego w ramach międzynarodowej Konferencji EMC Europe 2016 w roku 2016. Ze względu na wzrastające znaczenie systemów bezprzewodowych wyniki pracy służyć będą też Administracji i stanowić będą podstawy do dalszej współpracy z urzędami (MC, UKE, KRRiT) w tym obszarze. Niewykluczone, że w obliczu zbliżających się możliwości komercyjnego wykorzystywania tego typu systemów, nawiązana zostanie w tej dziedzinie także współpraca z podmiotami komercyjnymi. Niezależnie od podejmowania takich działań, prace badawcze w tak ważnym obszarze współczesnej łączności, jakim jest dziedzina efektywnych sposobów wykorzystywania widma radiowego, będą musiały być kontynuowane i rozwijane. Wymusi to zarówno presja podmiotów biznesowych jak i Administracji i szeroko rozumianej gospodarki cyfrowej oraz zainteresowania badawcze wykonawców niniejszej pracy.

## 8 Załącznik 1

# On Radio Frequency Spectrum Management

Ryszard Struzak<sup>1</sup>, Terje Tjelta<sup>2</sup> and José P. Borrego<sup>3</sup>

<sup>1</sup> EMC Department  
National Institute of Telecommunications (NIT)  
Swojczycka 38, 51-501 Wrocław, Poland  
[www.itl.waw.pl](http://www.itl.waw.pl)  
Tel: +48 71 372 88 68; +48 71 3699842  
E-mail: [r.struzak@ieee.org](mailto:r.struzak@ieee.org)

<sup>2</sup> Telenor  
Snaroyveien 30, 1331 Fornebu, Norway  
[www.telenor.com](http://www.telenor.com)  
Tel: +47 67890000  
E-mail: [terje.tjelta@telenor.com](mailto:terje.tjelta@telenor.com)

<sup>3</sup> Spectrum Management Department  
ANACOM  
Alto do Paimao, 2730-216 Barcarena, Portugal  
[www.anacom.pt](http://www.anacom.pt)  
Tel: +351 214348500  
E-mail: [jose.borrego@anacom.pt](mailto:jose.borrego@anacom.pt)

## Abstract

This article review condenses lessons learned from uses of radio-frequency (RF) spectrum on national and international scales and its main purpose is to stimulate the debate on how to allow new wireless systems to operate and reduce the chronic apparent shortage of RF spectrum. It aims at better understanding the mechanisms behind spectrum management and their pertinence to the public interest. The main contributions are:

- Considering RF spectrum management as a construct that structures radio services and, at the same time, distributes wealth and power;
- Highlighting major doctrines of RF spectrum management;
- Promoting spectrum management directly by its users;
- Promoting cooperation and transparency.

The paper is divided into several parts, which include the evolution of spectrum exploitation, a foreseeable future by taking a closer look at major dilemmas and challenges, and it ends featuring general comments and conclusions.

## 1. Introduction

*"There is no more spectrum available"* - stated Herbert Hoover, the US Secretary of Commerce, in 1925. Since then, the statement has been heard, each time when a new wireless service has been proposed. That shortage of spectrum has been felt as a factor delaying social and economic development of the society. Various proposals have been put forward to solve the problem, but no satisfactory solution has been found yet. The laws of physics impose absolute limits. The progress in science and engineering bring us closer to these limits while the administrative means impose additional restrictions. The latter result from our choices, more or less deliberate. Better policy and organization could augment the outcome drawn from what is physically possible. For all communications between fixed points, for example, cables could be used instead of unguided radio waves, which would leave them for mobile applications; satellite networks could similarly take over from terrestrial ones. Better propagation and system models could lead to more efficient spectrum use. Or, we could replace inefficient signal



coding and data compression technologies by better ones. The Regional Radio Conference (RRC) on terrestrial broadcasting held in Geneva in 2004/2006, is a good example. The participating countries have decided there to move from the analog to digital television by June 2015, which frees a significant part of electromagnetic spectrum for other uses. According to Martin Cooper, a pioneer of mobile radio, large segments of the radio–frequency spectrum are underutilized due to outdated ideas and practices that are still followed [1]. Other professionals have shared his opinion.

Science and engineering make the spectrum potentially usable, but its real use depends on local legal, regulatory and financial and perhaps also other factors. Diplomats, lawyers, economists, and engineers gather every few years to review and improve the intergovernmental treaties that regulate the uses of radio waves. Traditionally, when doing that they strictly observe the consensus principle. The consensus requirement assures that the majority cannot impose regulations that would harm any vital interests of a single country. Consequently, with unbalanced representation the conference results might be biased. That could put some spectrum user groups not represented at the conference in an inconvenient situation that may last for decades. The nearest such an event, the World Radio Conference, will be held in Geneva, Switzerland, from 2 to 27 November 2015 [2]. Like at previous such conferences, URSI will certainly participate as an observer, i.e. with no voting right, but individual URSI scientists could participate and vote, if they are members of national delegations.

As the target readers of this review are all those interested in radio and spectrum management mechanisms, but do not participate actively in it, this paper draws heavily from the authors' earlier publications, lectures, and discussions at spectrum management working groups they chaired in URSI and in other bodies like the International Telecommunication Union (ITU); the opinions expressed here are, however, the authors' personal opinions.

## 2. Spectrum Exploitation

This part deals with key ideas and practices inherited from the past. It starts with the genesis of state intervention, national spectrum management, and intergovernmental collaboration. For the national management the USA is taken as an example. Next, the mechanism of international regulations in the framework of International Telecommunication Union is reviewed shortly. The role of scientific research is outlined, as is the cooperation with URSI and other organizations.

### 2.1 Unregulated Commons

Radio is associated with the names of James Clerk Maxwell, Heinrich Hertz, and Alexander Popov. None of them marketed his discovery; they were motivated by scientific curiosity only. The first radio company in the world was the Wireless Telegraph & Signal Company founded by Guglielmo Marconi in Great Britain in 1897. It started with wireless telegraphs for navies. Since then, the military needs have continued to be the major force behind the technological progress of wireless sector, whose extraordinary success continues until today. Marconi marked the birth of a new industry that began transforming the Industrial Society into the future Knowledge Society. We all take part in that process, whether we want it or not, having only minuscule influence on it and a very vague idea where it will bring us ultimately. The way we use the spectrum can accelerate that process, or slow it down.

Marconi's company offered equipment and services. The spectrum efficiency of his spark-gap transmitters was very low. Their emissions occupied almost the entire usable then radio spectrum over large geographic areas (e.g. some 250 million square kilometers), yet carried only about single bits every few seconds. The earth's surface could accommodate only a few such transmissions at a time. To avoid interference, the operators invented the rule of *"listen before transmit"*, which has been adapted many years later in some local area wireless computer networking systems such as Aloha and Wi-Fi. This latter, which is presently very popular, is based on the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.11 standards. The radiofrequency spectrum was dealt with as a natural commons for free use by everybody, just as the air to breath. Commons refers to resources that are not owned privately and are accessible to all members of the society. They can include everything from natural resources and common land to computer software. When commonly held property is transformed into private property this process is known as *"enclosure"* or *"privatization"*.

Marconi patented his wireless telegraph to assure him monopoly and to block other companies to develop similar devices and services. However, his monopoly did not last for long and new companies were appearing in the market. They all did choose to compete instead of cooperate and the competition was fierce. To strengthen his position, Marconi tried various means. He was in good relationship with the ruling class in Italy and so was his spouse in Great Britain and his opponents accused him of bribery of highest governmental officials to get lucrative governmental contracts. The accusations led to political scandal in Great Britain, known widely as *"Marconi scandal"*, but Marconi did not lose much. It was the first known corruption case in radio business.

To force people to use his services and devices, Marconi did order his radio operators to ignore messages sent using the competitors' devices, in spite of the fact that in maritime emergencies the consequences could be tragic. With no regulations, it was quite normal and in accordance with the concept of free competition and Darwinian doctrine of survival of the fittest. One of Marconi's competitors was Karl Ferdinand Braun (who shared with Marconi the 1909 Nobel Prize in Physics). Braun was associated with the German Telefunken Company. Defending the company's interests, the German government intervened to break down the Marconi's monopoly once and forever. Not without effect was the personal experience of a family member of the German Emperor, whose courtesy radio telegram to the US President was rejected by a Marconi's operator, simply because it was sent from a German-made device. Certainly, there were numerous similar cases, but none did touch directly such high personalities. They initiated the international radio regulatory activities that continue until now. As a consequence of the incident a preparatory radio conference was called in Berlin in 1903, just six years after Marconi opened his company. The focus was on the maritime services, interconnections and financial settlements. Interconnectivity does not happen by itself, since it is not in the incumbent's interest to share the income with competitors.

## 2.2 First Intergovernmental Agreements

The proposed regulations included two important obligations. First, to receive and process emergency radio messages, no matter what their origin. Second, to watch continuously for distress signals. These proposals turned out to be impossible to adopt at the conference and the delegations decided to come back to them at the next conference at the same place three years later. The Berlin 1906 conference (1) allocated two frequency bands (around 0.5 and 1 MHz) for public correspondence, (2) founded the International Radiotelegraph Union (IRU) and (3) signed the International Radiotelegraph Convention. By setting the rules on how the electromagnetic spectrum is to be used, the signatories declared de facto its collective ownership, but other independent nations could join acquiring the same rights. Specific spectrum uses were to be registered and the IRU Bern Office recording the ship stations in operation (known as the "Bern List").

However, an inherent conflict appeared at the conference between private interests and public interests. Marconi succeeded in ensuring the governments of Great Britain and Italy to oppose the convention in order to defend his Company's interests. The regulations had to wait six more years until the following conference in London. The losses due to the delay have never been evaluated. It was the only case of direct governmental protection of a specific company at radio conferences [3] that the authors have found in official documents. If similar cases happened, they were made outside of the conference rooms.

International treaties are part of a worldwide game that governments agree to play. Consensus is an inevitable ingredient, as there are few things able to force a state. Conference negotiations aim at balancing conflicting interests, and large companies have a strong say there. The Berlin controversies had to wait until the 1912 London conference. Not without effect on the approval was the famous Titanic disaster, which did happen just three months before the conference and could have been avoided if an agreement were in place. This luxury ship sank with some 1500 passengers after colliding with an iceberg during her maiden voyage. Distress signals were sent by radio immediately, but none of the ships that responded were near enough to reach her before she sank. But a nearby ship that could assist, the Californian, failed because her radio operator switched his radio off after the daylong watch and the message did not get through [4]. The Titanic disaster did touch, directly or indirectly, many most wealthy and influential people of the time. They were shocked by the story, and so were the general public; numerous books and films have kept the memory of that tragedy alive until today. Certainly the disaster contributed to the approval of the regulations proposed six years earlier.

To improve the coordination of uses made of radio spectrum the IRU has been transformed into the present International Telecommunication Union (ITU), without major changes of the basic philosophy and regulations agreed earlier. ITU is the UN Agency for Information and Communication Technologies (ICT) with the total membership counting over 190 Member States and some 700 private companies from around the world. It consists of three Sectors: Radiocommunication, Standardization and Development. The Radiocommunication Sector (ITU-R) coordinates radiocommunication services and the international management of the radio-frequency spectrum and satellite orbits. It also develops common technical standards and recommendations and maintains Radio Regulations and the Master International Frequency Register (MIFR). The Radio Regulations is a binding international treaty setting out the allocation of frequency bands to different radio services. It also sets technical parameters to be observed by radio stations and procedures for the notification and international coordination of specific frequencies assigned to the stations by Administrations, as well as other procedures and operational provisions. Radio Regulations are set and modified by consensus of all the Member countries at radio conferences; more details are given in sections below.

## 2.3 National Spectrum Management

National spectrum management and international treaties regulating spectrum exploitation were born at about the same time. Since the very beginning they have been closely interrelated; modifications of one of them induce in turn a series of consequential changes in the other. However, while the international use of spectrum require collective consensus of all Member States, every State is fully sovereign to regulate its national uses as long as it does not touch other country's interests. Consequently, if a station wants its use of radio frequency to be internationally recognized, it must be notified in the ITU Master International Frequency Register. The notification process includes verification whether or not the station's parameters agree with the radio regulations and plans in force; ITU charges only for the nominal cost of work. In 1963 the governments extended the concept of spectrum commons to include artificial satellites. Since then, the orbital parameters and frequencies of satellites are notified in MIFR.

In practice, the governments translate the Radio Regulations into their national regulations and assign portions of the spectrum resources among their subjects. Most have introduced the obligatory national spectrum licensing associated with a spectrum fee system, in spite of the fact that no country pays for the spectrum. Indeed the fees can be seen as an extra tax imposed on the spectrum users to feed the governmental budget and development plans in sectors that may be far away from telecommunications. Details may differ from country to country. The license offers rights to exploit a specified band of frequencies under specified conditions and for a specified time, which can be, and most often is, extended over the following years, which makes the license quasi-permanent. In some countries the license is transferable, which makes it not different much from an ownership certificate. The ways in which the licenses have been issued also differ from country to country and may change with time. Issuing a license, a government can (and often does) control who, how, where and when uses the spectrum, and for what purpose, which is often criticized; we will come back to that in a later section.

Traditionally, the license is awarded on the basis of seniority (the "first come - first served" rule), by comparative hearings, called also "beauty contests" (could be also by lottery). The first one is simplest to manage, automate, and control. The second one is based on merits: a jury representing diverse entities considers all the proposals, compares their relative merits, and grants the license to the most valued one. If the process is open to public with an elected independent jury, the process is known as "beauty contest". Otherwise it is often named the "command and control" approach. It is more complex and more time-consuming than the previous procedure, and the "merits" and "values" are often vaguely defined. However, it is the only way to take into account social consequences of the licensing decision. Distributing the licenses via lottery has not found supporters. Another way is privatization or auctioning, discussed in a following section.

### 2.3.1 The FCC Example

This section deals with the US Federal Communication Commission (FCC) for two reasons. First, FCC is one of the oldest and most experienced radio regulatory agencies in the world. Second, a number of countries have drawn heavily from its experience, as did the international spectrum management. The World War I accelerated the development of radio technology and the global center of radio industry moved to the USA after the war. New services appeared; the one developing most dynamically was broadcasting. It has proved its usefulness in commerce (advertisement) and in politics. It has become a strong force in modern society, often abused to manipulate the public opinion. A growing number of transmitters soon resulted in mutual interference that lowered both the quality of transmissions and profits. In their rivalry for listeners, the operators were increasing the signal power radiated, which led to the power race, more interference and more litigation. The era of spectrum plenty ended. A new era of spectrum scarcity has begun; it was just at that time Herbert Hoover declared the lack of spectrum, as quoted in the introduction. All those interested agreed that free market cannot solve the problem and governmental intervention was necessary. In 1926 a special governmental agency, the Federal Radio Commission (FRC), was created to regulate the spectrum uses. The FRC was transformed later into the present Federal Communications Commission (FCC), which exists now. It deals with commercial radio, television, wire, satellite and cable *"as the public interest, convenience, or necessity"* require.

There are five independent Commissioners of equal power, who direct the FCC, which is a rather unique structure; in other agencies there is typically one director only. Every candidate is proposed by the US president and confirmed by the Congress; the president also nominates the chairperson. None of the Commissioners can have a financial interest in any Commission-related business, but each is required to be thoroughly familiar with the radio sector. Only three of them may be members of the same political party. They have to act in a fully transparent manner. Supposedly, the US legislator set all these precautions to assure the FCC decisions are impartial, fair and free of political or commercial influences. In spite of that, some FCC decisions were criticized as being biased. Critical voices were also heard when it was disclosed that the FCC chairman nominated in 2013 worked earlier as a lobbyist for the cable and wireless industry. FCC alone employs about 1900 persons and

spends some US\$350 million a year. These resources are needed to manage commercial applications of the spectrum. They do not cover the governmental spectrum uses that are managed by the National Telecommunication and Information Agency (NTIA). Their homepage lists also the Interdepartmental Radio Advisory Committee, which helps to coordinate all activities related to spectrum use in the country. [5]

## 2.4 Spectrum Management Evolution

### 2.4.1 Global and Regional Spectrum Management

The two Berlin conferences marked the end of the era of unregulated spectrum commons and the beginning of spectrum regulation. Garrett Hardin, a prominent American ecologist, has shown many years later, that any *unregulated* commons is unsustainable by its very nature [6] and his famous saying “*tragedy of commons*” has often been misused in spectrum-related discussions. The spectrum has become the natural public goods (commons) belonging to the whole humanity, represented by the sovereign governments - parties to the Convention. It was in accordance with the ideas of Henry George, an influential American economist, writer, and politician. George held that people could own and trade what they create, but things found in nature should belong to all. The States have agreed that they are the sole sovereign deciding (together) on how the spectrum is to be used: each state shall have a free access to it; it shall not be traded, but its uses shall be regulated.

The World War I did freeze the international cooperation and accelerated the development of radio technology at the same time. The first radio conference after the war was held in Washington DC in 1927, just after the FCC was created in the USA. Many famous scientists participated, including Edward V. Appleton, the future laureate of the 1947 Nobel Prize in Physics. The Washington Conference updated the international spectrum management system. It reviewed the Radio Regulations, defined a number of new radio services, allocated a specific frequency band to each and extended the regulated frequency range up to 60 MHz. Similarly, the World War II again did freeze the collaboration, and did accelerate the development of radio technology. Just after the war the Allied Countries have imposed a new international deal aimed at “*lasting international peace, justice, collaboration and mutual trust*”. The United Nations Organization was created and ITU became straight away its specialized agency. The 1947 Conference held in Atlantic City has again extended the amount of regulated spectrum and introduced new allocations.

Among others, the non-telecommunication use of radio frequency energy has been recognized there. Specific radio bands were reserved for industrial, scientific, medical and domestic uses. Since then the power industry has developed enormously. Collecting solar power in outer space and transporting it to the earth surface using microwaves has been proposed decades ago. Wireless powering reappeared in relation to powering of drones, electric cars, and Internet of Things. The present tiny ISM frequency bands may be insufficient for such new applications and additional bands may be necessary. Second, ISM bands have now successfully been used for new telecommunication systems such as Wi-Fi and similar systems. New powering systems operating in these bands create a serious potential threat to them.

Technology development has continued; the following conferences were adapting the regulations to the changing reality. The 1959 radio conference accepted the idea of “*passive services*”. Until then a service had to transmit radio waves to be qualified as such; those who only received signals had been outside the ambit of Radio Regulations. Excluded were, for instance, radio astronomy, remote sensing of the Earth etc. The regulations began to differentiate between the *physical use of spectrum*, when a frequency band and part of space is “filled in” with RF energy, and the administrative use, when it is reserved for the signal reception, or for a future use. The first Conference for Space Communications was held in 1963, just six years after the Soviet Union launched the first artificial satellite of the Earth. It extended the ITU-regulated commons over the Outer Space and Geostationary Satellite Orbit. New space services have been defined, new spectrum allocations made, satellite positions assigned and Radio Regulations updated. The Outer Space Treaty entered into force in 1967. It states explicitly that the outer space is “*not subject to national appropriation by claim of sovereignty, by means of use or occupation, or by any other means*”, like the spectrum earlier. In 1992, spectrum allocations for the Global Mobile Personal Communications by Satellite (GMPCS) have been made. It opened new possibilities, unimagined earlier and not explored yet in full. It has also removed significantly the pressure on the terrestrial spectrum, but increased further disproportions existing among the ITU Member States at the same time. As previously, the electromagnetic spectrum and satellite orbits are managed collectively by all the ITU Member States on behalf and for the benefit of all the people of the world; further information can be found in [7] and the ITU Internet home page.

The radio conferences are practical means to manage the spectrum. They may be world-wide or regional, general or specialized. The general conferences are authorized to deal with virtually all aspects of spectrum use.



The specialized ones dealt with particular services and/or particular portions of the spectrum. The regional conferences are held to solve specific spectrum use problems within particular geographic regions. Some Radiocommunication Conferences are convened to negotiate and agree international frequency plans for specific application, geographical regions, and frequency bands, which are subject to a priori planning. They are organized regularly and when needed. The participants in the Conferences are official governmental delegations of the ITU Member Countries, each having one voice. The Conferences are also open to intergovernmental organizations and the specialized agencies of the United Nations. Non-governmental entities authorized by their countries are admitted too (since 1993).

## 2.4.2 Worldwide and Regional Radio Conferences

Radio Conferences worldwide and regional serve as the fundament of global spectrum management in the framework of ITU. As they all are similar, we present here only one: the Regional Radio Conference (RRC) Geneva 2004/2006, which has opened a new era in global management of spectrum for digital broadcasting. It was called to coordinate the deployment of some 70500 transmitting stations in 118 countries. Two conditions were imposed: (1) no more than 448 MHz of spectrum should be used and (2) the plan should assure the conflict-free operation of the stations, without causing or suffering unacceptable interference as much as practicable. The conference was split in two sessions, the first held in 2004 and the second in 2006. The preparations took six years. At the first session the participating countries agreed upon the principles, technical characteristics and working methods. Then each country defined its requirements during the inter-sessional period. The requirements were submitted to the second session for iterative adjustments, if necessary. Over 1000 delegates worked hard for five weeks at formal sessions, working groups and private meetings. The success was possible thanks to the good will and high competence of the participants, as well as the exemplary cooperation between the ITU Secretariat, the European Broadcasting Union (EBU) and the European Organization for Nuclear Research (CERN). The iterative planning was largely automated based on the software developed by EBU. Two computer networks were used. One was the ITU distributed system of some 100 personal computers. The other was the CERN Grid infrastructure with a few hundred dedicated computers. The outcome was the new treaty replacing the earlier agreements concerning analogue broadcasting plans that existed since 1961 for Europe and since 1989 for Africa [8]. Figure 1 is a photo of the plan for digital television in printed version (over 2000 A4 pages) and in electronic-readable version on CD. With this plan, a significant part of electromagnetic spectrum has been made open for other uses, the well-known "Digital Dividend" [9]. Not all countries did participate in the conference; some question the spectrum planning idea in general; see a section below for reasons.



Figure 1. Photo of the Plan TV GE 06 - CD and printed versions.  
(Courtesy of the National Institute of Telecommunications, Poland)

## 2.4.3 Radio Regulations Board

Consecutive ITU radio conferences are usually separated by a period of a few years; if an urgent international problem arises in time between them, it is the Radio Regulations Board (RRB) that decides what to

do until the nearest conference. It is the only ITU body authorized to decide which party is right and which one is wrong, in an objective and fully transparent procedure. During the conferences, the board members participate in their advisory capacity. This section describes how RRB has evolved.

Each Radio Conference makes Radio Regulations more detailed and more difficult to interpret and to implement. From a few pages in 1906, their volume increased to more than 1000 pages, not counting numerous frequency plans and agreements published separately. Probably the largest changes introduced by a single conference took place at the 1947 Atlantic City Conference. To assist the Members in practical implementation of these changes, the conference created the International Frequency Registration Board (IFRB), which years later has become the present Radio Regulations Board (RRB). It was modeled after the FCC, discussed in a previous section. The Board members are elected by all the Member States at the Plenipotentiary Conference and have to act independently and serve as *“custodians of an international public trust”*. They must be *“thoroughly qualified by technical training in the field of radio and possessing practical experience in the assignment and utilization of frequencies”*. Interestingly, such qualifications are required in regard to the Board members only; the other elected ITU officials could be lawyers, managers, etc. with no technical training at all. The Board’s decisions have been ultimate; only the Member States could change them. In spite of several revisions of the ITU basic documents, the substance of these provisions has not been changed until now. Traditionally, the Board works in full transparency, with the documentation of each case open to all ITU Members interested. Recently, however, a party requested its case to be considered behind closed-door, referring to its trade secrets, but the board rejected that request.

The Board was envisioned *“as something of a cross between the Federal Communication Commission and the International Court of Justice”* to solve urgent intergovernmental conflicts that appear during the periods between the conferences [10]. In reality, it never achieved any status comparable to the Court of Justice. The major reason was the failure of Member States to allow the Board to perform all of its function as intergovernmental arbitrator on the frequency uses; seemingly it was not in the best interest of largest corporations. The 1965 Montreux Plenipotentiary Conference might even have abolished the Board completely, had it not been supported strongly by the developing countries, as Codding noted. These countries considered the Board as a neutral body capable to assist in protecting their interests in conflicts with foreign companies. The Board has survived, but its size and importance was reduced, and the pressure of some countries to get rid of it continued. In 1994 the full-time Board has been replaced by part-time Board and its Secretariat has been merged with the CCIR Secretariat into one Radiocommunication Bureau.

## 2.4.4 CCIR Supporting Studies

The success of the Geneva 2004/2006 conference was possible thanks to earlier careful studies in EBU and elsewhere. Indeed, it has early been realized that negotiations at the Radio Conferences require a lot of background scientific and engineering knowledge. With this in mind, the 1927 Washington conference has created a special organ within ITU, the International Radio Consultative Committee (CCIR) and its Study Groups. The aim was to facilitate the conferences by separating discussions on the well-defined engineering issues from political and economic negotiations. The Member Countries were defining questions to be studied (voluntarily) and the results of these studies were submitted to the conference. They were also published independently in the form of famous CCIR Green Books, Recommendations, Reports and Handbooks. The CCIR studies contributed significantly to the diffusion of the progress in radio science and engineering.

The spectrum scarcity problem had to wait until the CCIR General Assembly New Delhi 1970 had created the Study Group on Spectrum Management and Monitoring. The Assembly elected the first author (R.S.) as its Vice-Chair; he served at that function until he became a CCIR official in 1985. CCIR contributed to the development of Spectrum Engineering, Frequency Planning, Electromagnetic Compatibility and related disciplines. In 1994 CCIR became a part of the ITU-R Sector and ceased to exist as a separate organ, but the Study Groups and working methods continue until now. Their publications have enjoyed great popularity, as have computer programs [11-12]. More recently, in parallel to Study Groups, the ITU have organized a series of open seminars and conferences devoted to specific problems of current interest, e.g. the Kaleidoscope Events. That collaboration proved to be extremely useful, in spite of some limitations discussed in a further section below.

## 2.4.5 URSI Contribution

The CCIR/ITU Study Groups have drawn heavily from the knowledge brought voluntarily by other organizations and individuals. Richard Kirby, then the CCIR Director, noted:



*“Even in the earliest days of radio, some of the best scientific minds were challenged by the problem of sharing the radio frequency spectrum among different users.” [13]*

The International Union of Radio Science (URSI) has been one of the first such organizations. The first URSI General Assembly held in Brussels, on July, 1922 [14], and URSI has been born under the patronage of the Belgian King Leopold II. As the possessor of the Belgian Congo, he was materially interested in having inexpensive communication means with (and within) his colony. At that time with no satellites, only the terrestrial radio could offer such a communications, and URSI contributed greatly in progressing radio science and in removing obstacles on the way to global radio services. The Second General Assembly of URSI and the ITU radio conference Washington 1927 were organized jointly and URSI took active part in the creation of CCIR. Many URSI scientists have been involved, contributing to the development of radio science and its applications, and to strengthening the role of science in intergovernmental agreements. Since then, a number of URSI reports have been approved by CCIR and used by ITU Members without modifications.

The collaboration was most effective when Balthazar Van der Pol, the URSI Vice-President (1934 - 1950) and Honorary President (1952 - 1959) served also as the CCIR Director (1949 - 1956). The URSI General Assembly, Tel Aviv 1987, after the CCIR presentation [15], has created the Working Group on Spectrum Management in Commission E, with the first author (R.S.) as its first chair. However he had to withdraw soon, because it *“could create potential conflicts”* between CCIR and URSI, according to legal ITU advisors, as URSI is a non-governmental entity, while CCIR/ITU was an intergovernmental organization. With time, some URSI scientists have also lost their initial enthusiasm (except for radio astronomers and remote-sensing specialists) and the group was temporarily inactive. Some wonder if it could be related to changes in the funding mechanism of research projects and in an increased role of big companies, which are more interested in competition and exclusive spectrum use rather than in sharing it with others. The working group on spectrum was re-established at the URSI General Assembly in 2005.

## 2.4.6 Other Contributions

URSI was not alone; numerous scientific and R&D laboratories (governmental and private) from around the world, have been supporting the CCIR/ITU-R Study Groups. Their contribution to the spectrum management cannot be overvalued; they are too many to be all listed here. The Institute of Radio Engineers (IRE), established in 1912, is one of the oldest. In 1963, it transformed into the Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), the world's largest professional association for advancement of technology, according to their declaration. Among scientists, it is known not only through its numerous publications and conferences, but also through its fellow's program of professional recognition; the first IEEE Fellow was Jonathan Zenneck, a German physicist, famous from his works on radio wave propagation over the Earth surface in the 1900s. The IRE Professional Group on Communications Systems (PGCS) was organized in 1952. Five years later the group on Radio Frequency Interference (PGRFI) was created. Later, they became the present IEEE Communication Society (ComSoc) and the IEEE Electromagnetic Compatibility Society (EMSC), respectively. They are ones of the first organizations calling the attention on the spectrum scarcity problems and have played a major role in shaping the spectrum management. Their reports are the definitive works representing the collective wisdom of some of the most distinguished leaders in science and engineering [16-18]. Recent IEEE activities in that area are coordinated by the IEEE Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN) committee, among others. The spectrum utilization issues were also debated at the IEEE sponsored symposia around the globe, e.g. the International Wroclaw Symposium and EMC Zurich Symposium, organized since 1972, currently, EMC Europe Symposia.

A lot of improvements in spectrum management came as a result of DARPA, MITRE and NATO projects [19-20]. In Europe, studies of the European Broadcasting Union (EBU) have been highly valued and often served as basis for Radio Conferences; as it was in the case of RRC Geneva 2004/2006, mentioned earlier. Many had seen the UK Radiocommunication Agency (now OFCOM) with its cooperating R&D university teams as one of the world leaders in spectrum management and engineering [21]. More recently the European Commission (EC) with European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT) and its European Communications Office (ECO) have been working successfully towards improved spectrum use, creating various groups and committees (e.g. the Radio Spectrum Policy Group – RSPG, and the Radio Spectrum Committee - RSC) and supporting specialized symposia and conferences. These studies are in close association with the ITU studies, and most of their results are freely available via Internet.

## 2.4.7 National Spectrum Management

Since the nineties, in addition to traditional administrative spectrum licensing, auctions have become popular national methodology believed to also create incentives for effective utilization of spectrum as well as revenue

for the governments. Figure 2 shows the spectrum price (in Euros per MHz per capita) observed at auctions in various countries in the years 2006 to 2011. The amount paid in the auctions was covered in consumer bills, as no company would operate to lose money. In India it was the highest, some three thousand times higher than in the Netherlands; if related to the average income per capita, the difference would be even greater.

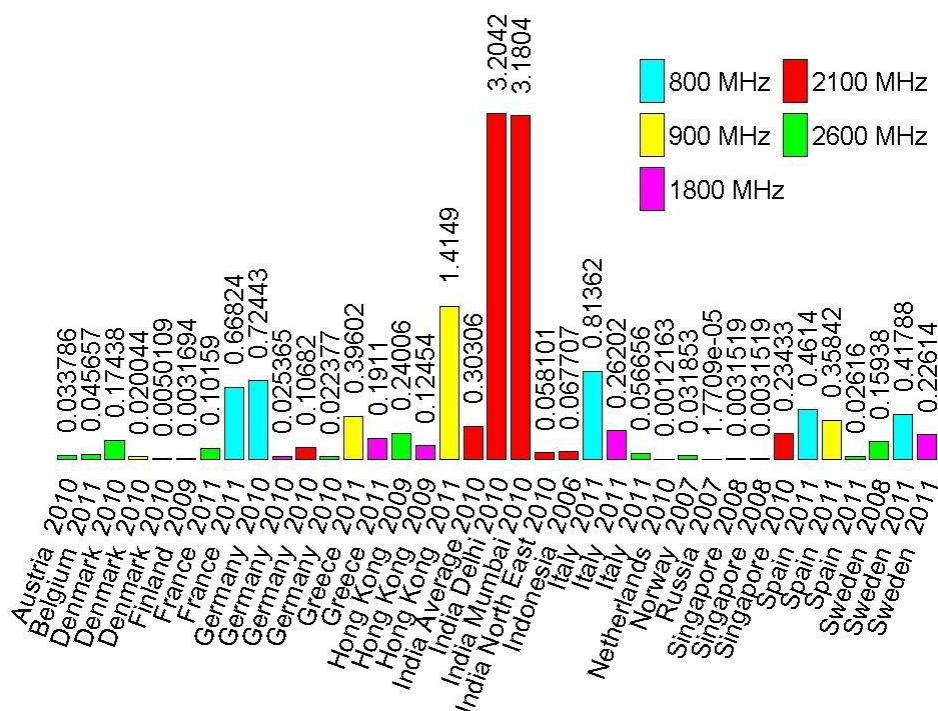


Figure 2. Auction prices given in EUR/MHz/Population. Source: [22].

(Note: Paired spectrum. EUR/MHz/Pop based on historical exchange rates when the different auctions were worked out. When calculating EUR/MHz/Pop the sum of uplink and downlink bandwidth is taken into account. In auctions where paired/unpaired spectrum was sold in bundles, amount of paired spectrum is used.)

## 2.5 Regulated RF Spectrum

This section is a short summary of major practical results of common studies and collaborative negotiations within the ITU framework. Historically, ITU has divided the world in three regions, as shown in Figure 3, for the purposes of managing the global radio spectrum and in order to avoid harmful interference between systems. Each region has specific allocation plans, by considering regionally harmonized bands, which take into account regional standards and peculiar aspects of the respective markets.

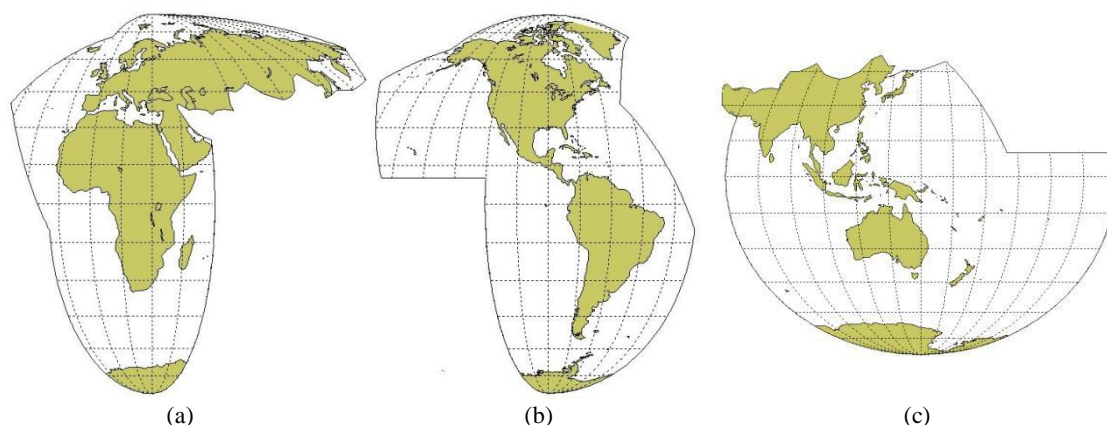


Figure 3. ITU map of regions.  
(a) Region 1. (b) Region 2. (c) Region 3.

Region 1 comprises Europe, Africa, the Middle East, the former Soviet Union and Mongolia. Region 2 covers the Americas, Greenland and some Pacific Islands. Region 3 contains most of non-former Soviet-Union Asia, and most of Oceania. The ITU Members have been dealing the regulated frequency bands as often as they found it useful, according to the above three regions.

Radio Conferences change Radio Regulations, extending often the spectrum limits as shown in Figure 4. The 2015 World Radio Conference will discuss its possible further extensions.

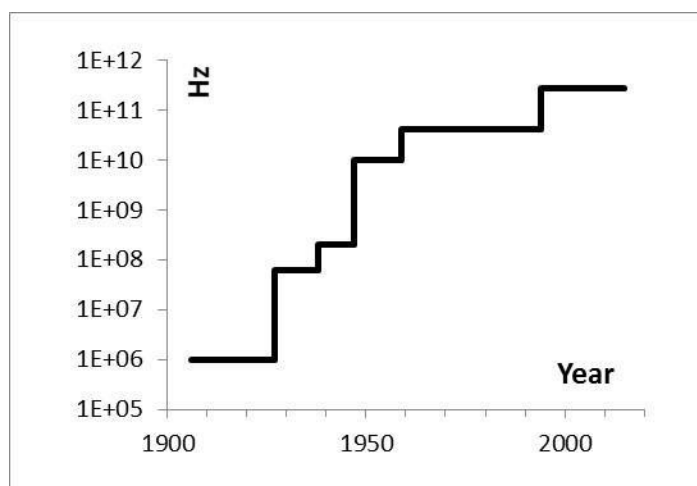


Figure 4. Maximum frequency allocated in Radio Regulations by Radio Conferences in years 1906 - 2015.  
(Note: The complete lists of the ITU conferences can be found at [23].)

The total volume of regulated spectrum has been approximately doubling every 30 months or so, as Cooper, quoted earlier, calculated. He added:

*"Since 1901, (...) spectral efficiency in telephone communications has improved by a factor of about one trillion. Since 1948, it has improved a million times over. And when introduced in 1983, cellular communications immediately offered a ten-fold increase in spectrum capacity - by transmitting in 30 MHz of spectrum what would have taken 300 MHz to transmit with the previous generation of technology. Today's cellular systems are better than 100 times more efficient than the mobile telephones of the 1980s."*

It should be noted here that radio wave propagation effects make some frequency bands unsuitable for specific applications. The total regulated spectrum is divided into small pieces each allocated to a specific service or use such as terrestrial, or space services; fixed, or mobile services; industrial, medical, domestic and scientific applications, generally the same in all Regions. Some details may, however, differ from country to country and from region to region, which obstructs the free movement of devices (e.g. mobile phones) and international

exchange. Figure 5 shows, for example, the current national allocations for Portugal.

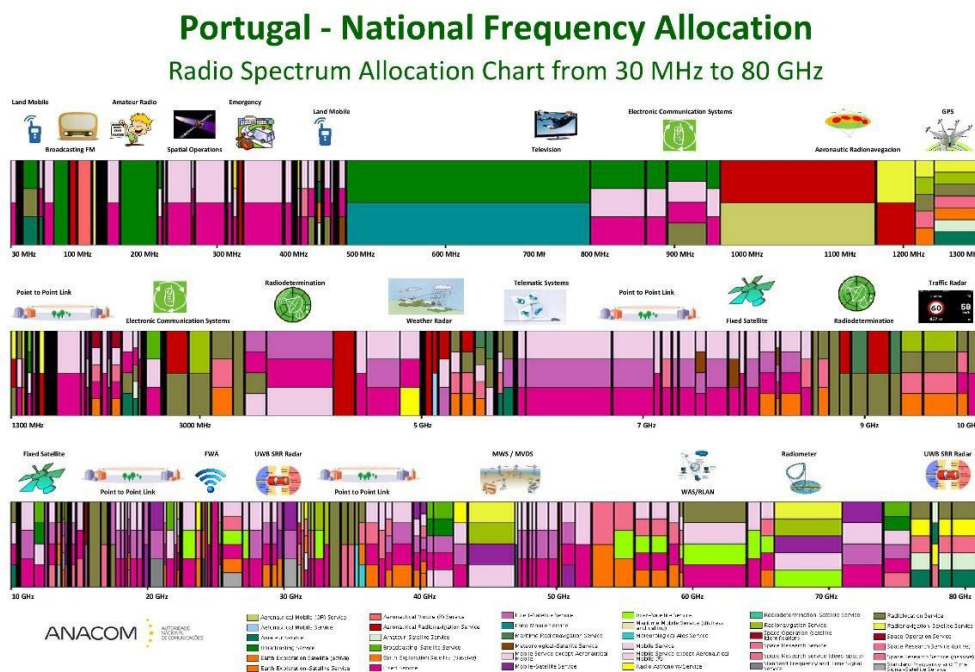


Figure 5. National spectrum allocation in Portugal. (Courtesy of ANACOM)

### 3. Spectrum Management Trends

This part focuses on foreseeable perspectives of spectrum management. Radio services [24] increase in popularity. This has been a steady trend since the radio was first invented. So does the demand for access to radio frequencies. One traditional way of meeting the demand is to go for increasingly higher and not yet explored radio frequencies and to develop more efficient methods for spectrum utilization. Concerning management of spectrum these also develop as described in previous sections. Spectrum management in the future will be a mixture of current practice of today with an emphasis on improving efficient spectrum utilization. There are several multi-disciplinary factors that play important roles. These comprise the physics of electromagnetic waves and their propagation, technology for spectrum utilization and handling interference, market mechanisms for access to spectrum, and regulatory regimes.

Future spectrum management must take all these into considerations through good understanding of physics, technology and economics in developing the rules for the actors involved. Furthermore spectrum efficiency must be taken into account addressing the wanted benefit from our collective utilization of radio spectrum. There is no single metric that can be used in this respect [25], and therefore technical, economic, and societal judgment apply. In the following the article is organized in subsections on spectrum management through administrative, trade and free access to the resources.



### 3.1 Administrative Assignment

In a way there must be some administrative rules irrespective of spectrum management method used. By assigning exclusive rights to use spectrum at a frequency and in an area the national spectrum authority gives a user great freedom within the set of constraints that come with the right. No-one else can deploy the same spectrum in this area. The rights are often given for many years to allow sustainable business to be established or continued. Although this describes current spectrum management in many situations, it will most likely continue this way in foreseeable future for large part of the spectrum.

Within some services there is an increasing concern of spectrum scarcity. In particular, mobile data is growing so fast that many operators will be looking for new spectrum resources. Of course, the scarcity also leads to innovation such that the same amount of spectrum can be used for more traffic and more terminals. Furthermore, often many applicants wish to establish business and this becomes itself an incentive to make good use of often highly costly access rights. The authorities must look for improved methods of assigning frequencies rights. One example is to use graph theoretic methods in assigning frequency for radio links in popular bands [26] contrasting the usually simplistic methods used for assigning today. The study indeed indicates a potential of getting noticeable more out of the spectrum and suggest a closer interdisciplinary collaboration between experts of radio-wave propagation and frequency assignments.

Although often all spectrum of interest is already allocated for some service types and even assigned to users, measurements shows that only a limited part is utilized at given location and time, see for example [27] indicating an overall utilization of 11.2 % in Hull, UK, of bands ranging from 180 MHz to 2700 MHz. This type of observations, among other aspects, have motivated a development of cognitive radio equipment that can take advantage of the frequency blocks and time slot when no-one else is using it. From the spectrum management side this needs development of rules that at one side motivates equipment vendors to develop suitable technology and the other side operators to invest in the technology.

The broad area is dynamic spectrum sharing, as different to traditional long-term spectrum sharing for different services such a fixed terrestrial and fixed satellite links. There are several methods of shorter-term more dynamic sharing that are put for forward. At a political level sharing seems to be pushed believing that this will lead to far better spectrum utilization [28] suggesting to identify beneficial sharing opportunities in licensed and license-exempt bands, making sufficient license-exempt band spectrum available for wireless innovation, and define common paths to sharing based on contractual arrangements.

New spectrum sharing techniques can be sorted in two groups [29-30], one dynamic spectrum sharing utilizing parts or “holes” of spectrum with limited spectrum rights and a more protected form called authorized shared access, licensed shared access, or priority access. These methods span a gradually decreasing degree of control from exclusive rights to opportunistic dynamic shared access.

### 3.2 Spectrum Trading

The economics of spectrum management cover many parts where some are tightly linked and are of command and control regimes under an administrative spectrum management regime and at the other end the spectrum access is a free-market item [31]. However, for services such as mobile communications spectrum is largely treated as property, following on from suggestions by Coase [32]. Spectrum authorities organize auctions for allocation of frequency blocks, rather than other methods as contest or lottery.

The spectrum auctions have evolved since first used 20 years ago. The goal should be high degree of spectrum efficiency, and not maximum revenue from the auction, since the first will create greater revenues in the long run. Cramton suggests combinatorial clock auction as much better than simultaneous ascending auction, and will as well enable technology-neutral approach if wanted [33].

In a free market controlled spectrum management a spectrum property system must be defined [34] such as time for utilization, area where it is valid, and spectrum identified. These rights must be exchangeable. An example deploying cognitive radio is given for micro-trading of spectrum rights for mobile service operations in bands on a secondary basis [35], e.g. in broadcast bands utilizing opportunistically non-used by primary user spectrum “holes” called “white spaces”.

Game theoretical approaches have been suggested to effectively take advantage of the shared spectrum regimes [36]. Intelligence in next-generation networks with the concepts of equilibrium will enable fair optimum spectrum utilization. These ideas are still in early phases and more research is needed.

An idea of a fully free spectrum utilization for any type of network is suggested for the future mobile and wireless system [37]. The marketplace takes over and services are delivered by virtual operators. The value chain

consists of the various elements such as spectrum, radio access network, value added services, and so on, with the different actors and not a single mobile network operator.

### 3.3 Free Access

The wireless local area network (WLAN) in the form of Wi-Fi has become a great success. A significant part of the broadband traffic from a large number of terminals will go over Wi-Fi for at least part of the route. This happens in spite of the radio systems has no guaranties for satisfactory access to the spectrum at 2.4 GHz or 5 GHz. Therefore, it is not strange that the so-called “commons” spectrum is thought of as a future solution and more should be allocated for commons. In commons specific rules apply, and no management is needed. A rule can simply be just to limit the radiated power to a maximum. However, as such it is not really free use as someone has to set the rules and control regime [38].

A radical suggestion has been proposed to allow anyone to transit anywhere and anytime as long as it does not cause interference that cannot be dealt with by the other user [39]. The proposal is to create something called “supercommons” where technology manages both wanted and unwanted signals without other management.

## 4. Challenges and Dilemmas

The ITU spectrum management based on intergovernmental negotiations at radio conferences has matured since the first meetings in Berlin; previous sections outlined the way it has evolved and may evolve further. During the century it has assured the phenomenal progress in all the fields that depend on applications of ICT and specifically wireless. The history of radio has proved the ITU radio conferences to be practical: no other field of human activity noted a comparable progress rate. ITU made it possible to communicate seamlessly around the globe and assure benefits of scale. The mechanism is not ideal, but it has been the only one possible; the only one the all the ITU Member Countries could accept. Nevertheless it has been criticized by the private sector and by civil society activists, by developed countries and those developing; they all doubt if that mechanism serves fairly to all members of the society. To complete this review, this part offers a closer look at some of these critical comments raised by various parties at various occasions.

A fundamental issue for instance is the difference in the spectrum treatment nationally and internationally. Internationally it is offered for use for free and with no quotas or licenses, with only basic operational restrictions imposed on its use globally and regionally. Nationally, however, it as a sellable, rentable, or licensable commodity (except for tiny ISM bands that are license exempted). The idea of spectrum sharing contradicts the concept of exclusive spectrum use. The license exempting negates the licensing. Free competition rules out regulations. Dynamic spectrum management goes against spectrum plans, which in turn excludes the ad-hoc spectrum allocations. The idea of transparency negates the trade secret principle.

All these ideas seem to follow the Cartesian approach, in which a complex problem is broken down into smaller and simpler bits, each for a specific partial problem analyzed separately. The spectrum scarcity is a complex issue. It cannot be fully understood in terms of its individual component parts, disregarding complex interactions among them and with the rest of the surrounding world. It involves a combination of engineering, economic, political and social issues that cannot be solved separately [40]. A holistic approach is needed, treating the problem as a whole within its full context. There is a striking similarity between the radio frequency spectrum and environmental problems. Concept of *supernetwork* may be helpful here. Anna Nagurney [41] defines it as a network that is above and beyond the classic networks (informational, financial, social, etc.), including complex interactions among them, both visible and hidden. She classifies the supernetworks as “*system-optimized*” or “*user-optimized*”. Equally well they could be named “*investor-profit-optimized*” and “*customer-benefit-optimized*”.

### 4.1 Representativeness

Some private sector representatives note that problems considered at the ITU radio conferences are in reality those of competing companies. Direct negotiations between those interested, without involvement of third parties, would be cheaper, easier and quicker, and the results would be better for all, they say; governmental interventions distort the competition. On the other hand some civil society activists accuse governments for representing only interests of largest companies. They say such companies have quite different interests than small companies and individuals, which are the weaker part of society in each country. Similarly, some delegates from developing



countries believe their negotiation position is weaker and their interests are not taken into account, as they should be. At intergovernmental forums large enterprises lobby national delegations to adopt their views as the country's position. Small companies and citizens usually are lacking resources to do so. Often they are unable even to properly formulate, justify, and convey their views, or to predict all the consequences of the proposals just negotiated. This section sums them up.

### 4.1.1 Developing Regions

The ITU Member States differ in population, wealth, knowledge, and in many other aspects; similar disparities among regions and social groups exist in each country. They have different potentials, needs and lobbying powers [42]. Radio spectrum negotiations imply a lot of difficult work to be done before and during the negotiations. Documents for consideration may count hundreds and thousands of statements, proposals and counter-proposals, each being a complex mixture of technical and legal issues. Some of them may require an immediate reaction during the meeting, as even a small oversight may have consequences difficult to correct later. Multiple committees and ad-hoc groups at the conference often working in parallel create serious problems for small delegations unable to participate in more than one group at a time. The following excerpt from the Bogota Declaration describes problems seen by some delegates:

*"The Treaty (...) cannot be considered as a final answer to the problem of the exploration and use of outer space, even less when the international community is questioning all the terms of international law which were elaborated when the developing countries could not count on adequate scientific advice and were thus not able to observe and evaluate the omissions, contradictions and consequences of the proposals which were prepared with great ability by the industrialized powers for their own benefit."* [43]

The declaration, published by a group of a few Equatorial States feeling being misled, voices the opinion of a larger group of countries that are only partially familiar with the newest achievements of science and technology and feel to be outside of the closed "club of rich". The consensus idea is great under the assumption of a common interest, common understanding, and good will of all the negotiators. Study Groups, mentioned earlier, aim at reaching that, but unfortunately, not all Members can participate in their studies for various reasons. With this in mind, long ago conference preparatory meetings were proposed [44-45], where the future delegates could familiarize well in advance with problems to be negotiated. That makes the preparations for Radio Conferences almost a continuing occupation that not all companies or even countries can bear easily. Proposals to facilitate it by wider ITU's automation [46], which would close it to medium access control (MAC) known from computer technology are not very popular; automates are still too simplistic now. They cannot completely substitute humans at the negotiations; moreover, they could make some informal deals and secret agreements difficult, if not impossible.

Wireless technologies eliminate the need of expensive cable networks, and their wide use would reduce the disparity among countries and improve connection with social groups in poor, underdeveloped, or remote regions. Unfortunately, the scarcity of free spectrum is a serious obstacle. The world is now in the midst of a major debate about the public policy goals. The issue has been discussed at the United Nations, World Summit on Information Society, the UNESCO-ITU Broadband Commission for Digital Development and at other forums. They all set up the universal broadband connectivity as an essential element of sustainable development. A series of steps have already been made in to make them more popular. However, in spite of the progress made, the "digital divide" has not disappeared. Figure 6 shows that it increased from about some 20-percentage points in 2007 up to 70 percentage points in 2014, and that the trend continues.

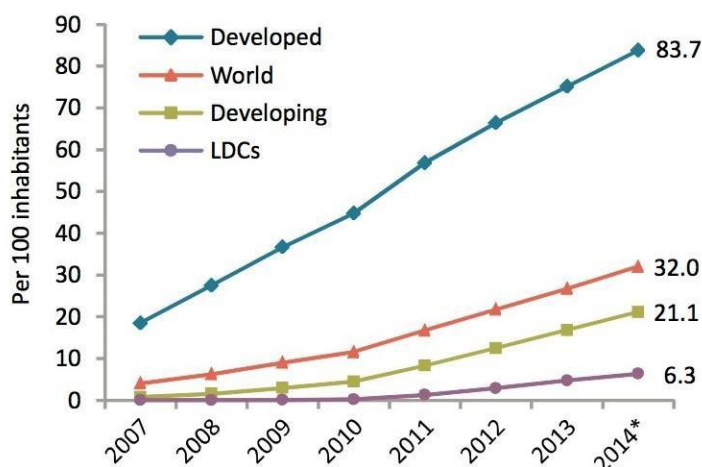


Figure 6. Active mobile broadband subscriptions by level of development, 2007-2014 (\*=Estimate). Source: [47].

Generally, growth of telecommunication services can be described by logistic functions, which indicate that in some cases the divide could not be reduced or could be chaotic [48-49]. The diverging lines of the Figure 6 send a strong message: the goal to eliminate the digital divide is physically unrealizable, or our approach to it is inefficient and needs a substantial review.

### 4.1.2 Civil Society

Ideally, a government operates diligently and represents interests of all citizens in a just way. Unfortunately, not always it is the case; not every government is seen by all the citizens as trustworthy. To force honesty, civil society activists demand more transparency. They demand the right to see the documents and negotiations to be sure that there is no difference between what the government declares publicly and what it does behind closed doors, hoping it would limit corruption. In some countries it appeared to be impossible and they do not consent to allow civil society observers at ITU negotiations. Recently, however, under the public pressure, ITU has decided to provide free online access to ITU-R recommendations and some other documents to the general public. Providing such an access to all input and output documents of all ITU conferences (postulated since long, among others by the first author when he served at the ITU headquarters) was questioned. The argument is that it would cause potential harm to private or public interests that could outweigh the benefits of accessibility.

Civil society activists want also to bring a variety of views and expertise that relate to ITU activities, such as expansion, development and adoption of ICTs, sustainable development, access to knowledge, consumer rights, social justice and human rights. More and more often one hears critics that profit-oriented needs dominate those non-profit like health-care, education, science, etc., not mentioning the communication cost for ordinary citizens.

### 4.1.3 Science Interests

Observational radio astronomy explores extremely weak electromagnetic radiations coming from the Universe. Similarly do space research, remote earth exploration, and some other sciences. Man-made radiations, intentional or spurious, no matter, can falsify the observations or make them useless. Unfortunately their intensity increases from year to year. The 1992 UNESCO conference [50] appealed to all intergovernmental organizations to amplify efforts toward protecting the future of such research. One of the ways to do so is improving the transparency of governmental decisions at all levels, including voting at radio conferences. We mentioned earlier the votes of two delegations at the first Berlin conference that delayed the solution of communications at high seas until the Titanic disaster; it is the only case the authors found noted in conference documents since the Marconi times. If there were other such cases, they were outside of conferences. Unfortunately, bribery has been in the limelight from time to time, and according to Brian Robinson, Chair of the "Scientific Committee on Frequency Allocations for Radio Astronomy and Space Science", shortly designated as IUCAF, the following note was included in his report:

*"IUCAF members had to evolve from being starry-eyed astronomers as they encountered a world of politics, lobbying, entertainment, threats, espionage and bribery. On one occasion, an offer (in Geneva) of two million dollars in cash "to shut up" proved no match for dedication to the joys and excitement of twentieth century astrophysics." [51]*

The note mirrors relations existing within some countries rather than characterizes the ITU radio conferences.

## 4.2 Spectrum Planning

Plans introduce predictability valued by many; the participants in the TV planning conference Geneva 2004/2006 consider their plan as a great success. Planning is also the only way to reserve a portion of the resource when it could not be shared after a faster competitor takes it. A position in the geostationary satellite orbit is a good example here as the total number of them is physically limited. However, the spectrum planning has been criticized and this section explains why.

A frequency plan is understood as a table, or generally, a function that assigns appropriate static characteristics to each of the radio stations at hand. Examples are: the operating frequency, power radiated, antenna location, height and radiation-pattern, polarization, service area, etc. In frequency plans, specific frequency bands are reserved a priori for particular applications well in advance of their real use. Individual regions may have various allotment plans for specific services (e.g., broadcasting), within their respective areas.

The plans make a one-time distribution of the spectrum resource on the basis of the expected or declared needs of all parties interested. Critics of planning approach indicate that it is inflexible and freezes technological progress. Indeed, the progress is very fast, and implementation of the plan may last several years. Technology known at the time of creation of the plan may be obsolete at the time of its implementation. Another difficulty is the impossibility to predict future requirements with a needed degree of accuracy, and plans based on unrealistic data have no value. Next, radio spectrum is available at no cost at international planning conferences, and there is no mechanism to limit the requirements, except for a general appeal for minimizing its use; there are no accepted or objective criteria for evaluating each country's stated needs and there are no quotas on the amount of spectrum assigned to each country. In fact, the individual country itself may have no idea of its needs over the time period for which the plan is to be constructed. It is thus not surprising that each country has an incentive to overstate its requirements rather than underestimate. Under these circumstances, it is easy to make a case that the plans are not only difficult to construct, but when constructed will lead to a waste of spectrum and orbit, as noted by Glen O. Robinson of the Virginia School of Law, a former FCC Commissioner [18].

### 4.2.1 Emergency Communications

The 1912 London Conference has resolved the problem of emergency communication at high seas, but left open other problems for more than eighty years. In 1995, Hans Zimmermann of the UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA) described the issue as follows:

*"If anywhere on the ocean a vessel with a crew of one is in distress, all related communications have absolute priority and are free of charge. (...). The necessity for absolute priority of distress signals has been recognized worldwide since the 14 of April 1912, when the "Titanic" hit an iceberg. However when, after earthquake, some 10000 persons are trapped under the debris of buildings and houses, any customs official can prevent the arriving rescue teams from outside the affected country from entering this country with walkie-talkies. And another official might easily prevent the teams from using their communications equipment, unless they first obtain a license from a national telecommunication authority whose building may just have collapsed in the earthquake. Also, if a team is, by chance, nevertheless able to use its satellite terminal, they are three months later presented with telephone bills for tens of thousands of dollars. Such is the sad experience of those who provide international humanitarian assistance in the age of information super highways." [52]*

The problem was known for long and its solution was known too; missing has been the willingness to make practical steps. Or, there were insurmountable differences in the hierarchies of values, or in conflicting interests of large corporations. Many tragic disasters had to happen until, under the pressure of general public, the governments agreed to remove interstate obstacles to quick deployment of communication means during emergencies. The Chernobyl Nuclear Power Plant 1986 disaster is an example. Long time passed until the *Convention on the Provision of Telecommunication Resources for Disaster Mitigation and Relief Operations* was signed in Tampere, in 1998 [53]. Although the convention has removed major legal obstacles, physical and organizational barriers have remained. The emergency communications is still far away from what is needed and what is technically possible, as indicated in the 2000 OCHA evaluation report [54]. To discharge the OCHA duties, the report proposed a global emergency communication infrastructure accessible to all, from any place at

any time. The proposed infrastructure would be based on a constellation of low-orbiting satellites continuously accessible like the GPS. In spite of the fifteen years that have passed since its publication, no public discussion about its possible implementation even started.

## 4.3 Monopoly

Monopoly means a lack of economic competition to produce the good or service, a lack of viable substitute goods, and a high profit. In most countries monopoly is against the law, except for the state monopoly. In many countries, however, *legal monopoly* is approved by the state, if it is justified by the need to provide an incentive to invest in a risky venture, or for other reasons, e.g. to enrich an interest group. Intellectual Property Rights (IPR) such as copyright, trademark, patent, industrial design rights, and trade secrets are examples of such government granted monopolies. This section sums up some comments on the topic.

### 4.3.1 AT&T Example

While breaking of the Marconi's monopoly took a decade or so, the AT&T's (and its subsidiaries, the Bell System) monopoly was operating in the USA for more than a century: from 1875 until 1984. There were six thousand independent (wired) telephone companies in the US serving three million subscribers. However subscribers to different companies could not call each other because the competing companies refused connections. The AT&T monopoly solved the problem. AT&T was granted the status of "*regulated natural monopoly*", obliged to provide *universal, end-to-end integrated, efficient and inexpensive telecommunication services*. The doctrine of natural monopoly says that the regulation is the most appropriate substitute for the competitive marketplace *provided it is independent, intelligent, considerate, thorough and just*. Due to economies of scale, grouping of like activities in a single company could assure in many cases a better and more efficient service to the public than a number of separate mutually competing companies could offer.

AT&T used its unique position and wealth to create the Bell Laboratories in 1925, which became one of the best and largest telecommunication research laboratories in the world. They have developed radio astronomy, the transistor, the laser, the charge-coupled device (CCD), the operating system UNIX, the programming languages C, S and C++, information theory and many other things. Seven Nobel Prizes have been awarded for works completed at Bell Laboratories. Being a regulated monopoly, Bell Labs were largely insulated from market pressures. That allowed them to develop the culture that venerated quality and excellence within a non-competitive framework of innovation and practicability. In 1984 AT&T ended to operate as a monopolist, and most of the former Bell Labs have been scaled down, or shut down entirely. The divestiture was not welcomed with everybody, as one can read in the AT&T history:

*"(...) the global telecommunications industry entered an era of unprecedented chaos and instability – marked by oversupply, fraud, a complicated regulatory environment and nonstop pricing pressures. Combined, these forces led to an industry meltdown in which numerous bankruptcies, defaults and business failures occurred; investors lost billions and countless workers in the communications sector lost their jobs."* [55]

Other critics pointed out fragmentation and repetition of efforts and lot of energy and resources lost in mutual fights. Another comment underlined that after the divestiture no company could create and maintain a research laboratory of comparable scale and quality. The reason is high costs and risk of research confronted with smaller income (due to divided market) and uncertain future (due to competition). Some hundred years after breaking the Marconi's monopoly, the OECD states:

*"Limited spectrum and increasing demand for data services mean that mobile networks will strive to offload traffic to fixed networks. (...) The challenge for regulator is that, regardless of the technology used, many parts of the OECD look likely to face monopolies or duopolies for fixed networks. Wireless can provide competition, but spectrum availability will always limit that are not a constraint for fibre."* [56]

### 4.3.2 Intellectual Property Right

Intellectual Property Right (IPR) has two sides. One is the interest of the right's owner. Another side is the interests of the rest. It helps in protecting monopoly from competition, with the society paying often for it. Take smartphones for example. The last few years noted over 140 patent disputes on the alone, with the litigation costs running up to US\$3 million per suit. Just two companies, Apple and Samsung, were disputing over US\$2 billion



in patent-related damages compensations [57-59]. Armstrong and his colleagues estimated patent royalties on a hypothetical US\$400 smartphone to be in excess of US\$120, which almost equals the cost of device's components. The costs of the disputes may reduce the profitability and incentives to invest and compete. Most of patent disputes are sterile and not in the best interest of the society. They absorb time and money that could instead be better used on improving the products or lowering their price. IPR plays an important societal role that exceeds largely the commercial interests of a single company; with the present practices "*only lawyers win in patent wars*", as Popelka put it shortly [60].

### 4.3.3 Spectrum Privatization

Guaranteed exclusivity in the use of a band of spectrum is a form of monopoly. It can be granted through privatization or licensing. The former offers the owner the maximal freedom in the spectrum use. From the access viewpoint, the licensed exclusivity does not differ much from spectrum ownership. The influence of large corporations has been growing, and so has been the pressure to privatize the spectrum and free it from any regulations as much as possible. The ultimate goal is to replace the spectrum commons by private spectrum [61] and the licensing by free competition, known also as *survival-of-the-fittest doctrine*. The doctrine says that the strong should see their wealth and power increase while the weak should see their wealth and power decrease, disappearing at the end. It implies taking out some form of collective ownership and handing over to private owners, if possible. David Bollier, a popular promoter of public interests, compared the private appropriation of collectively owned resources to the movement to enclose common lands in England. The process started there in the XVI century and now most of previously common land belongs to individuals that in total count less than 0.1% of the population [62-64]. Its more recent variant is known as *free-market environmentalism*.

More and more countries grant exclusive licenses to highest bidders and open the secondary spectrum markets. Seeking the maximum possible return on the investment dollar is a strong motivating force, but it threatens other important values. Not everybody accepts that rush for profit should be the only, or the most important, driving force in life. Many prophets and philosophers have since long indicated its negative effects. Recently even major economists noticed that problem [65]. If not restricted by rules of tradition, religion, law, ethics, rational moderation, or by other factors, excessive greed may easily destruct the social order and lead to crimes and wars.

#### Spectrum Ownership Doctrine

Except for radio waves of natural origin, radio frequencies are inherent characteristics of radio devices; the latter cannot exist or operate without the former. The ownership of a device extends logically over the RF waves radiated or received by it; the spectrum ownership concept interrupts that connection. Named by Robert Matheson [66] "*flexible spectrum use*" the concept ignores also electromagnetic interactions and the inherent dynamics of radio signal environment. The doctrine bases on two simple rules. One assures the owner's rights: "*Transmit within signal power restrictions inside your licensed electro-space region*", while the other protects the neighbor's rights: "*Keep your signals below 'X' outside that region*". It exploits an apparent analogy between land ownership and spectrum ownership over the specific service region. When you own a walled garden, you can arrange it at will as long as you remain within the walls. However, with the spectrum it is not as simple as it might look at first glance, because it is impossible to determine the "walls" of spectrum property with any precision.

One has to realize that the unguided wave propagation laws do not allow for any abrupt change of signal power. Simple *borderlines* between the inside and outside at the edge of the service region are physically unrealizable in free space; a finite-size *buffer region* separates neighboring service regions. That buffer region must be sterile - none of the neighbors can extend his/her radio services there, unless special precautions are applied; careful coordination of geographic distance, signal power density, frequency, time, or coding might be necessary. Second, the flexible spectrum use doctrine is static and neglects the impact of changing environment, which can change [67-68] without the owner's consent or even knowledge.

Without freezing firmly the future signal environment, e.g. through strict spectrum planning, such uncertainties reduce the secondary spectrum marked to nil. That fact calls into question the very concept of private spectrum and its flexible use for active services, not mentioning the more difficult case of the property of frequencies used for passive services. Laws of physics say firmly that in a dense signal environment no freedom exists in the use of spectrum. While the idea of privately owned spectrum makes sense in case of isolated radio systems, it is physically unrealizable where the spectrum is congested. With proper spectrum management, the probability of such interactions is analyzed before issuing the license and kept at an acceptable level.

## 4.4 Spectrum Market

Spectrum market is not a new idea; the thought of selling spectrum rights was put forward for the first time at the 1906 Berlin conference. The Russian delegation suggested a kind of transit fees for radio waves propagating over the country's territory. Some fifty years later Ronald Coase of FCC suggested in 1959 property rights and spectrum market as a more efficient method of allocating the spectrum to users. (He was the laureate of the 1991 Nobel Memorial Prize in Economic Sciences, for his works on the transaction costs and property rights). Then Equatorial countries, in their *Bogota Declaration*, mentioned earlier, claimed that the satellites located above their territories should pay a kind of *parking fees*. In 1995, Richard Butler, then the ITU Secretary General, put forward that positions of orbiting satellites be traded and the income used to finance the ITU activities. He did that when some ITU Member States failed to pay their contributions; with no cash, he would be forced to close the operations and fire the staff. The Member States preferred rather to pay the contributions than to rent orbital positions or shut down ITU. None of the privatization ideas have been accepted till now at the international forum. The majority of ITU Member States firmly supported the commons character of the radio spectrum and satellite orbits.

Spectrum auctioning has been practiced in a number of countries. For governments it has become attractive because it solves the access rights to spectrum in cases where too many are interested and also provides money inflow to the budget. However, the FCC Commissioners, like many other experts, long opposed the idea of spectrum market, so it had to wait some thirty years for its first implementation. Interestingly, it did happen in New Zealand and not in the USA, as one could expect. NZ has introduced in 1989 spectrum auctions for tradable leases up to 20 years. However, many are against spectrum auctions. Earl Holliman, the US Army Spectrum Manager, wrote:

*"We hear a lot about auctions. The auction approach does not stimulate technology towards more efficient frequency uses. It lets a successful bidder only get richer and pushes the smaller operator back".*

For companies, auctions involve large uncertainties and high risks: the expected and needed profits for planned operations might never come true. For customers it may mean an increase of price of services. Huge amounts have been paid for frequency bands that were never used [69-70]. Some auctions seemingly are used to block the competitors rather than to put the spectrum into use. Auctions have been claimed to be corruption-immune, but several scandals have shown the opposite, the 2010 spectrum scam in India, quoted earlier, being an example.

Some economists do not believe in the efficiency of free market. For instance Joseph Stiglitz, the laureate of the 2001 Nobel Memorial Prize in Economic Sciences, says it is only under exceptional circumstances the markets can be efficient. He writes:

*"For more than 20 years, economists were enthralled by so-called 'rational expectations' models which assumed that all participants have the same (if not perfect) information and act perfectly rationally, that markets are perfectly efficient, that unemployment never exists (...) and where there is never any credit rationing. That such models prevailed, especially in America's graduate schools, despite evidence to the contrary, bears testimony to a triumph of ideology over science. Unfortunately, students of these graduate programmes now act as policymakers in many countries, and are trying to implement programmes based on the ideas that have come to be called market fundamentalism" [71].*

Of similar opinions are numerous other authors, such as e.g. Eli M. Noam, Samuel A. Simon, Joseph H. Weber or Yohai Benkler. Most surprisingly, George Soros, a famous billionaire, joined other critics, writing: *"Although I have made a fortune in the financial markets, I now fear that the untrammelled intensification of laissez-faire capitalism and the spread of market values into all areas of life is endangering our open and democratic society" [72].*

The UN has called special summit to consider, among other problems, the *Fundamental Defects of the Free Market System* [73]. The 2011 Washington Declaration on intellectual property and the public interest clearly stated:

*"Markets alone cannot be relied upon to achieve a just allocation of information goods - that is, one that promotes the full range of human values at stake in intellectual property systems. This is clear, for example, from recent experiences in the areas of public health and education, where intellectual property has complicated progress toward meeting these basic public needs." [74]*

It would indicate that IPR protecting practices should be seen from a wider socio-economic viewpoint, taking into account the society as a whole: not only those who benefit now, but also those who pay or loose in a longer perspective.

Many worry that privatization, if introduced widely, would be incapable to assure the balanced sustainable socio-economic development; that government and corporate surveillance would increase without limits; that the



free flow of content we are now proud of would stop; that intellectual property rights would extend into the interminable past. The uncertainty results from our dilemmas on the hierarchy of values. Erich Fromm, a German philosopher, put it shortly: *“to have, or to be?”* - a basic question to which everybody has its own answer. Spectrum trading also offers opportunities to the benefit of both operators and the served society, when spectrum can be more effectively utilized in an area or a market.

### 4.4.1 Competition

In opinion of many experts the progress in mobile and broadband communications and generally in radio applications we enjoy today would not have developed at the pace we got them, if there were no competition. It may not be so easy to prove generally, but for many the cost of the communication services has not increased the latest decades, rather the opposite relatively to the daily spending for living and become much more affordable [75]. Furthermore, ICT services have become much more important, highly beneficial and even absolute necessary for a well-functioning society.

But other cases show that competition may not serve the society well, as illustrated by the following example. When serving in the ITU headquarters, the first author organized the CCIR library of spectrum management software offered freely by ITU Members. It could be copied and used at no cost by all those interested. It was functioning well, but a problem appeared when the program for practical planning low-power (local) TV stations was offered [76]. It was then one of few programs using digital terrain models and inexpensive personal computers. It generated great interest among small and medium enterprises both in developed and in developing countries. Its user-interface was in Polish, and it was proposed to translate it into English and other ITU official languages, which would make it more useful in many countries. However, few delegates representing private business were against, arguing: *“it would kill our business”*. As no required consensus was reached, the proposal was not approved. In addition, as a consequence, there is no such free software provided by ITU today.

With the consensus rule a single company can easily block other enterprises, but opposite cases also happened. One can learn from the FCC home page, for instance, that Edwin Armstrong, an American inventor, proposed his frequency modulation system in 1935, but companies, in the United States, afraid that it would reduce their profits blocked it for some twenty five years, until 1960's. Similarly, for more than a decade, blocked were civilian applications of spread spectrum technology. More recently, the promising Low Earth Orbit (LEO) [77] and High Altitude Platforms (HAP) [78] technologies were blocked; the majority blames the general crisis for that, but some suspect the competing companies to contribute significantly to that. More recently FCC stated it had to protect consumers from mobile broadband providers' commercial practices masquerading as *“reasonable network management”*. Working hand in hand with citizens FCC is setting *“strong rules that protect consumers from past and future tactics that threaten the Open Internet”* and promote *“more broadband, better broadband, and open broadband networks”*. The providers hold all the tools necessary to deceive consumers, degrade content, or disfavor the content that they don't like. Some companies make practical use of them, keeping third-party applications within a carrier-controlled *“walled garden”* like in the early days of electrical communications. That practice ended when Internet Protocol (IP) created the opportunity to leap the wall, but FCC has continued to hear concerns about other broadband provider practices involving blocking or degrading third-party applications.

## 4.5 Spectrum Sharing

The privatization pressure provoked countermovement and revival of interest in spectrum commons and cooperatives. One of the most respected researchers in that area was Elinor Ostrom, a US economist and the only woman who won the Nobel Memorial Prize in Economic Sciences (in 2009), for *“her analysis of economic governance, especially the commons”*. Her studies have indicated that the commons are sustainable if they are well managed, best by their owners' themselves. Interestingly, that principle has intuitively been practicing on the global scale by ITU Members since the 1906, well before the Ostrom's studies. More recently, the principle was extended over the users of Wi-Fi and similar technologies, which became the most popular use of spectrum commons. In 2013, for instance, more Internet traffic was carried over Wi-Fi than via any other path, resulting in some US\$222 billion in Value Added to the U.S. economy alone [79]. That evidences the practicability of spectrum sharing and numerous benefits in comparison with the exclusive (private or licensed) spectrum, including lower access cost. Note that there has always been a part of the wealth kept in common, example being public roads and parks. Since the very beginning the spectrum access has been free for each and any government -- what many civil society activists expect is an extension of that practice over individual spectrum users, without any governmental brokerage.

The US President's Council of Advisors on Science and Technology (PCAST) has suggested a three-tier *“dynamic sharing”* Spectrum Access System (SAS) making spectrum sharing the norm. Under the SAS, Federal

primary systems would receive the highest priority and protection from harmful interference; secondary licensees would register deployments and receive some quality of service protections, possibly in exchange for fees; and General Authorized Access users would be allowed opportunistic access to unoccupied spectrum (when no Primary or Secondary Access users are using a given frequency band in a specific geographical area or time period) [80]. The NTIA has already identified a total of 960 MHz of federal spectrum as candidates for sharing using that approach. The European Commission is considering similar sharing possibilities based on contracts between the users. This is seen as a natural extension of the previous spectrum policies: licensed access allowing operators to offer a predicted quality of service, and license-exempt access fostering widespread contributions to innovation and fast-paced investment in emerging technologies [81]. However, incumbent commercial or Government users may be reluctant to give up their exclusive rights to individual spectrum bands, concerned about already made or planned long term investments in communication networks including access to spectrum. Yet technology is being developed and deployed to allow for such sharing by new entrants without risking interference to the incumbents' systems. A number of countries have pursued regulations or trials that enable license-exempt, Wi-Fi-like devices to access vacant spectrum in the television broadcast bands ("white spaces"). These are expected to improve Internet access, facilitate the delivery of government services, establish communication channels in the wake of earthquakes, typhoons, etc.

## 4.6 Other Issues

Since the very beginning scientists have worked on issues that have extended our knowledge about the Universe and made our lives easier, safer and richer. There is a wealth of literature on the benefits radio waves have brought to humanity. But that progress has brought also negative effects. The perception of electromagnetic waves has been changing. From an abstract concept it morphed to a tradable commodity and from a scientific curiosity to an apparatus of indoctrination, a weapon in physical conflicts and a tool for criminals. In addition to the unknown long-term biological side effects of man-generated electromagnetic waves there are also other sources of worrying. Like the health, they only indirectly relate to spectrum use. Discussing them in detail clearly exceeds the volume of this article, so we only mention here some, which we believe is needed to better understand the role and complexity of spectrum management.

### 4.6.1 Orbital Debris

Since 1957, after the launch of the first Earth artificial satellite, the near-Earth environment has served as a gigantic rubbish collector. Orbital debris (named also space debris) is a collection of man-made objects launched into space and left there with no purpose after their mission ended. They are dead satellites and their fragments, upper stages of rockets and their fragments, and other abandoned objects. The total number of these objects is counted in the millions of pieces, increasing with every new launch of a space object and with each new satellite explosion and fragmentation accidental or due to anti-satellite tests in outer space. They all are orbiting with hyper velocities of few to dozens of kilometers per second and can damage operating satellites and space vehicles. For comparison, the velocity of a bullet fired from the famous AK 101 Kalashnikov rifle is less than one kilometer per second. The threat of impact damages is of a growing concern. Medium size objects (0.1-10 cm in diameter) are the greatest challenge because they are not easily tracked and have kinetic energy high enough to cause a catastrophic damage. For instance, a particle with a mass of 10 gram moving 10 km/s has the kinetic energy comparable to a 1 ton car running on a highway at the speed of 100 km/h. Penetration even of a small particle through a critical component, such as the flight computer or propellant tank, can result in loss of the spacecraft. If a 10 cm object of 1 kg mass collides with a typical spacecraft bus, over one million fragments of 1 mm in size and larger can be created, according to the NASA. Such a collision results in formation of a debris cloud, which poses a magnified impact risk to any other spacecraft in the orbital vicinity. Mutual collisions can multiply their number further. Encounters with clouds of smaller particles can also be devastating for future missions. For instance the solar panels of Hubble Space Telescope (launched in 1990 and remaining in operation) have been replaced several times because of damages caused by tiny objects. They also may efficiently block scientific observations of some regions in the sky.

A few countries do radar, optical, and infrared surveillance of space for security reasons. The smallest tractable objects are of about 10 cm in diameter at low altitudes and about one meter at the geostationary orbit. Some space debris could escape towards other celestial bodies, burn in the atmosphere, or fall on the Earth. To do so, however, their velocity must change. What slows them and forces them to fall down is the air drag, but it

decreases with altitude. At high altitudes it is negligible, which implies long time of orbiting in space. Table 1 lists expected orbital lifetimes for selected circular orbits.

Table 1. Circular orbits lifetimes. Source: [82]

Orbit altitude (km)	Lifetime
200	1-4 days
600	25-30 years
1000	2000 years
2000	20'000 years
36 000 (GSO)	Indefinite

At the geostationary (GSO) altitude, no effective natural removal mechanism exists, except for solar radiation pressure. Practically, objects located in the geostationary orbit would remain in its vicinity indefinitely, if not moved at the end of mission. Orbital debris is a good illustration of the CC-PP (Communize Costs-Privatize Profits) behavior of satellite companies described first by Hardin, mentioned earlier. Some of the objects launched are sent back to the Earth, especially after the invention of re-utilizable space vehicles, but the creation rate of debris has outpaced the removal rate. Maintaining the current design and operational practices could ultimately render some regions in space useless and even dangerous.

## 4.6.2 Issues to Watch

The future of radio applications may not be as wonderful as it could be and as most people would like it to be. Technological progress is often driven by military programs that aim at improving ways the enemies are destroyed, or the allies are protected. However, many by-products of these programs find later civilian applications making our life easier, healthier, and pleasanter. Unfortunately, a military invention might become accessible also to criminals, or a government might use it against their own citizens; the latter practice ends often in a government overthrow or revolution.

### Propaganda

Radio as a wartime propaganda tool became popular during World War II (later it was supplemented by television). Wireless can bring all the persuasive power to millions of people at relatively low cost, ignoring national borders and front lines. But its power was demonstrated earlier, in 1938 in the USA, after airing “*The War of the Worlds*”, an innocent episode of radio drama series. Orson Wells presented it so realistically, that the radio transmission was taken as real news and caused mass panic difficult to manage. Since then radio and television have become major advertising means. But they also serve as efficient *propaganda* and *brainwashing* tools in political/ ideological campaigns. Later, mobile phones, SMS and online social networking services like *Twitter* and *Facebook* have similarly affected the social life and activity of people, starting from the election campaigns in the USA to social protests like Occupy Wall Street or the Arab Spring of 2010. The unprecedented easiness and scale of manipulating public opinion wirelessly worries many. The *Arab Spring* protests transformed into revolutions that overthrow a few governments. It explains why so many other governments want to control the access to radio waves and to the information they carry.

### Espionage, Cyber Attacks and Jamming

The fear of war, criminal acts, or losing power pushes governments not only to license the access to spectrum, but also to develop intelligence, eavesdropping and surveillance, which is relatively easy in case of wireless communications. However, they may also be used against the citizens’ right to privacy. Some years ago, the European Parliament initiated the investigation into the ECHELON system [83], created to monitor the military and diplomatic communications of the Soviet Union and its allies during the Cold War. With time, it had evolved becoming allegedly a global system for the interception of any communications over the globe, including private and commercial. Another worrying issue is massive surveying people out. According to the press, there is one surveillance camera for every eleven people in Great Britain. Even more worrying issue is using radio waves for criminal attacks and secret wars in the cyberspace [84]. Real data from that area are published rarely, but its scale could be judged from the expenses incurred. According to the press, the defense cyberspace budget 2015 includes US\$5 billion in the USA alone; other countries may spend proportionally.

Jamming was widely used during the World War II and the Cold War. Later, unintended interference were noted often, for instance deliberate jamming of telecommunications satellites was observed and increased between

2009 and 2012. In several circumstances, France raised this issue to the Radio Regulations Board. Several European countries also submitted a proposal to WRC-12 on this issue, which led to an evolution of the Radio Regulations that gave more weight to the issue of deliberate interference.

### 4.6.3 Power from Space

New, cheap, and environmentally friendly energy sources are now sought in several countries. The world's population is expected to reach 10 billion people by the year 2050, and the present energy sources will be insufficient to satisfy its needs, according to current projections. Among various ideas, the Space Solar Power (SSP) concept has been studied. URSI has published in 2007 a comprehensive report on the topic [85]. Among additional possible SPS applications the report lists sending energy from spacecraft to spacecraft, bringing energy to remote areas on the globe that are difficult to otherwise access, or providing energy to the dark side of the moon. The report stressed that URSI does not unanimously advocate SPS. Within URSI there are both advocates of SPS and voices of concern and severe reservation.

The SPS studies started in the USA, during the oil crisis of the seventies, aiming at limiting the dependence of national economy on foreign oil. In 1974, a patent was granted for a solar power satellite, to collect power from the sun in space and then transmit it down using the microwave beam to the Earth for use. One of the more recent SPS systems considered huge (~10 km<sup>2</sup>) arrays of photovoltaic cells placed in an Earth orbit, or on the Moon to convert the sunlight into electricity. Such arrays would be unaffected by cloud cover, atmospheric dust or by the Earth's twelve-hours day-night cycle. To reduce the necessary area of costly solar arrays, sunlight could be additionally concentrated using giant mirrors. The incident Sun radiation would be converted into electricity using photovoltaic process. Another part that would manifest itself as heat could also be converted into electricity using thermoelectric devices. These would serve as thermal pumps removing heat from the photovoltaic panels and lowering their temperature.

The electricity would then be converted to microwaves and beamed by composite space antenna (~6 km<sup>2</sup>) towards a huge Earth antenna (~12 km<sup>2</sup>). The space antenna would assure pointing accuracy of about 0.0005°, which means ~300 m pointing error on the Earth surface. The terrestrial antenna would contain a large number of receiving antennas combined with rectifiers and filters (called a rectenna) that would convert the microwave power into electrical current injected into the power network. To limit the health danger, the receiving antenna would be located in the desert or in mountains far away from densely populated areas. The size of the microwave beam could be large enough to keep the power density within the safe limits.

A space solar power system using today's technology could generate energy at a higher cost than the current market price. One estimates that it would take 15 to 25 years of further research to nullify that difference. In 2001, Japan announced that they plan to launch a giant solar power station by 2040; preparatory studies are also undertaken in European Union and in the United States. There are many questions to be solved. The URSI report quoted earlier lists for instance the following:

*What is the impact of SPS electromagnetic emissions – both intended and unwanted (harmonics of the microwave frequency, unexpected and harmful radiation resulting from malfunctions) at microwave frequencies and other related frequencies – on telecommunications, remote sensing, navigation satellite systems, and radio-astronomical observations? What actions can be taken to suppress this unwanted emission? Constraints imposed by the Radio Regulations of the International Telecommunication Union must be taken into account.*

However, more important questions remain to be solved before SPS could be operating, e.g. health and environmental problems not solved yet. Others indicate that it is potentially double application technology: a SSP station could easily be converted into a dangerous weapon. Space weapons using solar energy are not a new idea. In times of the World War II, some German scientists were speculating the use of gigantic mirrors that could concentrate solar energy to set fire to enemy's cities, manufactures, crop fields, etc. during the war time. High power microwave beams could make similar damages. Between the wars, the SPS mirrors could be used to control local weather conditions over a selected region. The size, complexity, environmental hazard, and cost of an SSP undertaking are daunting challenges

## 5. Concluding Remarks

This paper has reviewed basic issues of radio frequency spectrum use. It has showed how deeply our current concepts are rooted in the past and how often they are dictated by short-term benefits of few. It has summarized arguments and lessons learned since the invention of radio, which could be usable in current debates



on how to reduce the chronic apparent shortage of RF spectrum. It has highlighted major doctrines focusing on a better understanding how the spectrum management mechanisms are associated with public interest and distribution of information, knowledge, wealth and power. It points up similarities between spectrum conservation and environmental protection. The paper promotes cooperation, transparency and direct involvement of spectrum users into its management process. It focuses on issues that could be improved through good will, negotiations and consensus without requiring extra resources, in principle.

The fundamental question whether it is better to privatize the spectrum or to keep it as a regulated commons, to sell it, or to distribute it freely, will probably be open for decades. Many have hoped since long that science and engineering will solve the spectrum scarcity problem. Science and engineering are universal, independent of nationality, ideological convictions, or political orientation, which makes joint efforts much easier than in any other field. History shows, however, the opposite: the spectrum scarcity increases with the progress made in science and engineering. Many have anticipated such an approach to spectrum management could be as useful as it has been found to be in military. However, negotiations and lobbying will probably continue as the basis for spectrum management for long. Human motivations and ways of thinking have not changed much since the invention of radio and most probably will not change in the foreseeable future, shaping the spectrum use. The reason is that society is not uniform. It is composed of groups, each having different worldviews, interests, needs, and powers. What is best for one group is not necessarily good for the others. The dominant group usually tries to use all possible means and ways to keep the benefits it acquired as long as possible.

The ITU negotiation system has evolved during 150 years and each radio conference makes it better, but it is still not ideal; some its weaknesses have been indicated in sections above. Notwithstanding, the history of radio has evidenced that in spite of the threat of supporting some particular interests [22], it has been serving well the humanity, not mentioning that it has been the only one acceptable. That is an optimistic view. Even more optimistic remark is that the ITU system is not static; it is a dynamic and self-healing system (even if it recommends now static spectrum allocations). The more people understand better spectrum management mechanism, the more chances it will be improved at a future conference. Various forums exist within and outside ITU to discuss and understand better problems accompanying the uses of radio spectrum, not only the positive but also negative ones; not only seen from a narrow engineering or economic viewpoint, but also from a wider perspective. They try to call attention to the need of limiting the negative effects before they develop in full. Should the voice of radio scientists be heard there? ITU has not solved yet the spectrum scarcity problem definitely, like the whole humanity has not solved problems of hunger, health, and many other ones. According to Hardin, quoted earlier, the scarcity problem cannot be solved ultimately by technical means only, without involving the system of human values and ideas; Mahatma Gandhi, the famous Indian leader, put it shortly as follows:

*“There is enough on the earth to meet everybody’s need but not sufficient to meet anybody’s greed”.*

## 6. Acknowledgments

The authors would like to thank their directors and colleagues in the National Institute of Telecommunications, Telenor and ANACOM, respectively, for their support to the present work.

## 7. References

1. M. Cooper, "The Myth of Spectrum Scarcity", <http://dynallic.com/2010/03/the-myth-of-spectrum-scarcity-position-paper-by-martin-cooper-march-2010/>, March 2010 (accessed September 2015).
2. ITU-R, "World Radiocommunication Conference 2015 (WRC-15)", <http://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2015/Pages/default.aspx>, (accessed September 2015).
3. F. Donaldson, "The Marconi Scandal", *Bloomsbury Reader*, 2013 (ISBN: 9781448205851).
4. G. Havoc, "The Titanic's Role in Radio Reform", *IEEE Spectrum*, April 15, 2012, pp. 4-6.
5. National Telecommunications & Information Administration (NTIA), United States Department of Commerce, *Spectrum Management*, <http://www.ntia.doc.gov/category/spectrum-management> (accessed April 2015).
6. Garrett Hardin, "The Tragedy of the Commons", *Science*, Vol. 162, December 1968, pp. 1243–1248.
7. S. Radicella, "Introduction to International Radio Regulations", *ICTP 2003*, ISBN 92-95003-23-3, <http://publications.ictp.it/lms/vol16.html>.
8. T. O'Leary, E. Puigrefagut and W. Sami, "GE 06 - Overview of the Second Session (RRC-06)", *EBU Technical Review*, [https://tech.ebu.ch/docs/techreview/trev\\_308-rrc-06.pdf](https://tech.ebu.ch/docs/techreview/trev_308-rrc-06.pdf), October 2006, pp. 1-20 (accessed November 2014).
9. E. Pietrosemoli and M. Zennaro, "TV White Spaces - A Pragmatic Approach", *ICTP 2013*, ISBN 978-9295003-50-7, <http://wireless.ictp.it/tvws/book/> (accessed 21 September 2014).
10. G. A. Coddling Jr., "International Constraints on the Use of Telecommunications", *Telecommunications - An Interdisciplinary Text*, L. Lewin (Ed.) - Artech House, ISBN 0-89006-140-8, 1984.
11. R. Struzak, "Software for Radio Frequency Spectrum Engineering", *Information Bulletin of URSI*, No. 262, September 1992, pp. 41-48.
12. R. Struzak and K. Olms, "Frequency Management and Software for Spectrum Engineering for Personal Computers", *Telecommunication Journal*, April 1993, pp. 168-174.
13. W. Rotkiewicz, "Electromagnetic Compatibility in Radio Engineering", *Elsevier*, 1982, ISBN 0-444-99722-9.
14. URSI, "History of URSI", [http://www.ursi.org/en/ursi\\_history.asp](http://www.ursi.org/en/ursi_history.asp), (accessed September 2015).
15. R. Struzak and R. C. Kirby, "On Radio Spectrum, Competition and Collaboration", *Proceedings of the 17<sup>th</sup> General Assembly of the URSI*, (ITU/CCIR presentation), Tel-Aviv, 24<sup>th</sup> September – 2<sup>nd</sup> October 1987.
16. JTAC IRE – RTMA, "Radio Spectrum Conservation", Report of the JTAC IRE – RTMA, *Mc Graw-Hill Book Co.*, 1952, Library of Congress Nr. 52-9444.
17. JTAC IEEE and EIA, "Spectrum Engineering - The Key to Progress", Report of the JTAC IEEE and EIA, *IEEE*, 1968, Library of Congress Nr. 68-8567.
18. F. Matos, "Spectrum Management and Engineering", *IEEE Press*, 1985, ISBN 0-87942-189-4.
19. W. G. Duff, "Electromagnetic Compatibility in Telecommunications", *Interference Control Technologies*, 1988, ISBN 0-944916-07-4.



20. J. A. Stine and D. L. Portigal, "Spectrum 101 - An Introduction to Spectrum Management", *MITRE Technical Report*, March 2004.
21. R. Leese and S. Hurley, "Methods and Algorithms for Radio Channel Assignment", *Oxford University Press*, 2002, ISBN 0 19 850314 8.
22. T. Tjelta and R. Struzak, "Spectrum management overview", *URSI Radio Science Bulletin*, 340, 2012-3, pp 25-28.
23. ITU, History of ITU Portal, "Complete List of Radio Conferences", <http://www.itu.int/en/history/Pages/CompleteListOfRadioConferences.aspx>, (accessed May 2015).
24. ITU, "Radio Regulations", Edition of 2012, [http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-s/oth/02/02/S02020000244501PDFE.PDF](http://www.itu.int/dms_pub/itu-s/oth/02/02/S02020000244501PDFE.PDF), (accessed September 2015).
25. P. Rysavy, "Challenges and considerations in defining spectrum efficiency", *Proceedings of the IEEE*, 102, 3, March 2014, pp. 386-392.
26. I. Flood and M. Allen, "Equipment selection heuristic for microwave fixed links", *Radio Science*, 49, August 2014, pp. 630-64.
27. M. Mehdawi, N. Riley, K. Paulson, A. Fanan, and M. Ammar, "Spectrum occupancy survey in Hull-UK for cognitive radio applications: measurement & analysis", *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2, 4, April 2013, pp. 231-236.
28. European Commission, "Promoting the shared use of radio spectrum resources in the internal market", *Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions*, COM(2012) 478 final, Brussels, 3 September 2012.
29. J. M. Chapin and W. H. Lehr, "The path to market success for dynamic spectrum access technology", *IEEE Communications Magazine*, May 2007, pp. 96-103.
30. W. Lehr (chair), "Towards more efficient spectrum management", *MIT Communications Futures Program White Paper*, March 2014.
31. M. Falch and R. Tadayoni, "Economic versus technical approaches to frequency management", *Telecommunications Policy*, 28, 2004, pp. 197-211.
32. R. H. Coase, "The Federal Communication Commission", *Law & Economics*, II, October 1959, pp. 1-40.
33. P. Cramton, "Spectrum auction design", *Review of Industrial Organization*, 42, 2, March 2013, 161-190.
34. A. S. De Vany, R. E. Eckert, C. J. Meyers, D. J. O'Hara and R. C. Scott, "A property system for market allocation of the electromagnetic spectrum: a legal-economic-engineering study", *Stanford Law Review*, 21, 6, June 1969, pp. 1499-1561.
35. R. MacKenzie, K. Briggs, P. Grønsund, P. H. Lehne, "Spectrum micro-trading for mobile operators", *IEEE Wireless Communications*, December 2013, pp. 6-13.
36. Z. Ji and K. J. R. Liu, "Dynamic spectrum sharing: a game theoretical overview", *IEEE Communications Magazine*, May 2014, pp. 88-94.
37. L. Doyle, J. Kibilda, T. K. Forde and L. Da Silva, "Spectrum without bounds, networks without borders", *Proceedings of the IEEE*, 102,3, March 2014, pp. 351-365.
38. J. Brito, "The spectrum commons in theory and practise", *Stan. Tech. L. Rev.*, 1, 2007.
39. K. Werbach, "Supercommons: toward a unified theory of wireless communication", *Texas Law Review*, 82, 2004, pp. 863-963.

40. R. Struzak, "Spectrum Management: Key Issues", *Pacific Telecommunications Review*, September 1996, No. 1 pp. 2-11.
41. A. Nagurney, *Supernetworks* in M.G.C. Resende and P.M. Pardalos (eds.), "Handbook of Optimization in Telecommunications", Springer 2006; ISBN-10: 0-387-30662-5; pp. 1073-1119.
42. T. Harbert, "Internet Giants Adopt New Lobbying Tactics", *IEEE Spectrum*, October 2012, <http://spectrum.ieee.org/telecom/internet/internet-giants-adopt-new-lobbying-tactics> (accessed March 2013).
43. Bogota Declaration of 1976: "Declaration of the First Meeting of Equatorial Countries", [http://www.jaxa.jp/library/space\\_law/chapter\\_2/2-2-1-2\\_e.html](http://www.jaxa.jp/library/space_law/chapter_2/2-2-1-2_e.html)
44. R. Struzak, "CCIR Preparations for WARC'92", *URSI Information Bulletin*, No. 259, December 1991, pp. 50-57.
45. R. Struzak, M. Hunt and A. Nalbandian, "CCIR Preparations for World Administrative Radio Conference WARC '92", *Telecommunication Journal*, February 1992, pp. 56-59.
46. R. Struzak, "On Future Information System for Management of Radio Frequency Spectrum Resource", *Telecommunication Journal*, November 1993, pp. 429-437.
47. ITU, "Executive Summary", *Measuring the Information Society Report 2014*, 2014.
48. R. Struzak, "Broadband Internet in EU countries: limits to growth", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 48, Issue 4, 2010, pp. 52-5.
49. R. Struzak, "Diffusion of Broadband Services: An Empirical Study", *IEEE Communications Magazine*, Volume 50, Issue 8, 2012, pp. 128-134.
50. D. McNally, "The Vanishing Universe", *Cambridge University Press*, 1994, ISBN 0 521 450209.
51. B. Robinson, "Frequency Allocations - The First Forty Years", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 37, 1999, pp. 65-96.
52. H. Zimmermann, "The vital role of telecommunications in disaster relief and mitigation", *Emergency Telecommunications DHA Issues*, Focus Series No. 2; UN, 1995, pp. 3-5.
53. A. Rahrig, "Love Thy Neighbor: The Tampere Convention as Global Legislation", *Indiana Journal of Global Legal Studies*, Vol. 17, Issue 2, January 2010.
54. R. Struzak, "Evaluation of the OCHA (DRB) Project on Emergency Telecommunications with and in the Field", United Nations, New York and Geneva, July 2000, Rev. 1 (September 2000).
55. AT&T, "A Brief History: The Bell System", <http://www.corp.att.com/history/history3.html> (accessed February 2013).
56. OECD, "Report OECD Communications Outlook 2013", DOI: 10.1787/comms\_outlook-2013-en, [http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/oecd/science-and-technology/oecd-communications-outlook-2013\\_comms\\_outlook-2013-en](http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/oecd/science-and-technology/oecd-communications-outlook-2013_comms_outlook-2013-en)
57. C. Guglielmo, "The Apple vs. Samsung Patent Dispute: 20-Talking Points", <http://www.forbes.com/sites/connieguglielmo/2012/08/21/the-apple-vs-samsung-patent-dispute-20-talking-points/>

58. J. P. Kesan and G. G. Ball, "How Are Patent Cases Resolved? An Empirical Examination of the Adjudication and Settlement of Patent Disputes", *Washington University Law Review* 2006, Vol. 84, No. 2, pp. 237-312.
59. A. Armstrong, J. J. Mueller and T. D. Syrett, "The Smartphone Royalty Stack", [http://www.wilmerhale.com/uploadedFiles/Shared\\_Content/Editorial/Publications/Documents/The-Smartphone-Royalty-Stack-Armstrong-Mueller-Syrett.pdf](http://www.wilmerhale.com/uploadedFiles/Shared_Content/Editorial/Publications/Documents/The-Smartphone-Royalty-Stack-Armstrong-Mueller-Syrett.pdf) (accessed July 2014).
60. L. Popelka, "Only Lawyers Win in Patent Wars", <http://www.businessweek.com/articles/2012-04-24/patent-wars-lawyers-are-the-only-winners> (accessed December 2014).
61. B. Marcus, "The Spectrum Should be Private Property: The Economics, History and Future of Wireless Technology", *Mises Daily*, *Ludvig von Mises Institute*, 2004.
62. D. Bollier, "Reclaiming the Commons. Why we need to protect our public resources from private encroachment", <http://bostonreview.net/BR27.3/bollier.html#>\* (accessed May 2013).
63. D. Bollier, "Silent Theft: The Private Plunder of Our Common Wealth", *New York Routledge*, 2002.
64. S. Fairlie, "A Short History of Enclosure in Britain", *The Land*, Issue 7, summer 2009, <http://www.thelandmagazine.org.uk/articles/short-history-enclosure-britain> (accessed June 2014).
65. J. Helliwell, R. Layard and J. Sachs, "World Happiness Report 2013".
66. R.J. Matheson, "Flexible Spectrum Use Rights. Tutorial.", *International Symposium on Advance Radio Technologies (ISART) 2005*.
67. R. Struzak, "Flexible Spectrum Use and Laws of Physics", *ITU-FUB Workshop: Market Mechanisms for Spectrum Management*, Geneva, 22-23 January 2007.
68. R. Struzak, "On Spectrum Congestion and Capacity of Radio Links", *Annals of Operation Research* 2001, Vol. 107, 2001, pp. 339-347.
69. BBC News, 19 December, 2002, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/2591993.stm>, (accessed May 2015).
70. D. Daniel Sokol, "The European Mobile 3G UMTS Process: Lessons from the Spectrum Auctions and Beauty Contests", *Virginia Journal of Law and Technology*, University of Virginia, Fall 2001, VA. J.L. & TECH. 17, <http://www.vjolt.net/vol6/issue3/v6i3-a17-Sokol.html>, (accessed May 2015).
71. J. Stiglitz, "The Price of Inequality: How Today's Divided Society Endangers Our Future", *W.W. Norton & Co.*, 2013, ISBN-10: 0393345068.
72. G. Soros, "The Capitalist Threat", *The Atlantic Monthly*, February 1997, pp. 45-58.
73. United Nations Conference on the World Financial and Economic Crisis and Its Impact on Development, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 8-11 July 2013.
74. The Washington Declaration on Intellectual Property and the Public Interest Adopted at American University Washington College of Law, Washington D.C., August 27, 2011.
75. ITU, "ICT services getting more affordable worldwide", *ITU Newsroom, Press Release*, [https://www.itu.int/net/pressoffice/press\\_releases/2011/15.aspx#.VVBS5O901aQ](https://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2011/15.aspx#.VVBS5O901aQ), (accessed May 2015).
76. R. Struzak, "Microcomputer Modeling, Analysis and Planning in Terrestrial Television Broadcasting", *Telecommunication Journal*, Vol. 59-X/1992, pp. 453, 459 – 492 (see also: <http://www.piast.edu.pl/>).
77. R. Struzak, "Internet in the Sky: T1 Tests have Started...", *ITU News*, Nr. 6/98, pp. 22-26.
78. R. Struzak, "Mobile Telecommunications via Stratosphere", *Intercomms - International Communications*

- Project*, 2003, <http://www.intercomms.net/AUG03/docs/features.php> (accessed November 2014).
79. S. Forge, C. Blackman and R. Horwitz, "Perspectives on the Value of Shared Spectrum Access", *Final Report for the European Commission*, SCF Associates, DTI, GNKS-Consult, ICEGEC and RAND Europe, 2012.
  80. M. Gorenberg, "A Modern Approach to Maximizing Spectrum Utility and Economic Value", N. Kroes (ed), *Digital Minds for a New Europe*, [http://ec.europa.eu/commission\\_2010-2014/kroes/en/content/digital-minds-new-europe](http://ec.europa.eu/commission_2010-2014/kroes/en/content/digital-minds-new-europe), (accessed November 2014).
  81. Radio Spectrum Policy Group, "Report on Collective Use of Spectrum (CUS) and other spectrum sharing approaches", RSPG11-392 Final, November 2011.
  82. W. Flury, "The Space Debris Environment of the Earth", in D. McNally, "The Vanishing Universe", *Cambridge University Press*, 1994.
  83. G. Schmid, "On the existence of a global system for the interception of private and commercial communications - ECHELON interception system", *European Parliament: Temporary Committee on the ECHELON Interception System*, 2001/2098(INI).
  84. S. Rehman, "Estonia's Lessons in Cyberwarfare", *US News*, January 14, 2013.
  85. URSI, "White Paper on Solar Power Satellite (SPS) Systems", *Report of the URSI Inter-Commission Working Group on SPS*, <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/SPS/WPReportStd.pdf>, (accessed May 2015).