

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

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

*Raport Z21/21307016/130/2016*

WROCŁAW, grudzień 2016

## Metryka dokumentu

|                   |   |  |                      |      |
|-------------------|---|--|----------------------|------|
| Nr pracy          | : | Z-21 21307016  |                      |      |
| Nazwa pracy       | : | Nowe techniki bezprzewodowe zwiększające efektywność wykorzystywania widma radiowego                       |                      |      |
| Zleceniodawca     | : | Praca Statutowa  |                      |      |
| Data rozpoczęcia  | : | Styczeń 2016 r.  |                      |      |
| Data zakończenia  | : | Grudzień 2016 r.   |                      |      |
| Słowa kluczowe    | : | spectrum engineering, spectrum management, electromagnetic compatibility, Cognitive Radio, Ultra Wide Band |                      |      |
| Kierownik pracy   | : | dr inż. Dariusz Więcek   |                      |      |
| Kierownik Zadania |   | dr inż.  | Maciej Grzybowski    | Z-21 |
| Wykonawca pracy   |   | mgr inż.   | Rafał Michniewicz    | Z-21 |
| Kierownik Zadania |   | mgr inż.   | Daniel Niewiadomski  | Z-21 |
| 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-21 |
| Wykonawca pracy   |   |  | Michał Stajszyk      |      |

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

## SPIS TREŚCI

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>WPROWADZENIE .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>DOSTĘP DO WIDMA RADIOWEGO .....</b>   | <b>6</b>  |
| 2.1      | DOSTĘP DO WIDMA RADIOWEGO .....  | 7         |
| 2.2      | REDEFINICJA INŻYNIERII WIDMA RADIOWEGO I EMC? .....  | 12        |
| <b>3</b> | <b>REGULACJE DOTYCZĄCE TECHNIK ULTRASZEROKOPASMOWYCH (UWB) OBOWIĄZUJĄCE W EUROPIE.....</b> | <b>18</b> |
| <b>4</b> | <b>POMIARY KOMPATYBILNOŚCI TRANSMISJI UWB.....</b>   | <b>43</b> |
| 4.1      | PORÓWNANIE WYMAGAŃ EUROPEJSKICH I AMERYKAŃSKICH UWB.....                                   | 44        |
| 4.2      | BADANIE URZĄDZENIA WIRELESS USB BELKIN .....   | 46        |
| 4.3      | WYKORZYSTANE STANOWISKO BADAWCZE .....   | 47        |
| 4.4      | WYNIKI POMIARÓW WSPÓŁCZYNNIKA OCHRONNEGO I OMÓWIENIE POMIARÓW .....                        | 48        |
| 4.5      | WNIOSKI I PODSUMOWANIE.....  | 54        |
| <b>5</b> | <b>DEMONSTRATOR PLATFORMY DETEKCJI WIDMA RADIOWEGO.....</b>                                | <b>55</b> |
| 5.1      | WPROWADZENIE .....   | 55        |
| 5.2      | ARCHITEKTURA.....  | 57        |
| 5.3      | JEDNOSTKA POMIAROWA.....   | 58        |
| 5.4      | SERWER DANYCH I SERWIS PREZENTACJI DANYCH .....  | 62        |
| 5.5      | POMIAR POZIOMU MOCY W KANAŁE RADIOWYM - KALIBRACJA .....                                   | 63        |
| 5.6      | WERYFIKACJA LABORATORYJNA.....   | 71        |
| 5.7      | WERYFIKACJA POŁOWA .....   | 75        |
| 5.8      | WNIOSKI .....  | 77        |
| <b>6</b> | <b>PODSUMOWANIE .....</b>  | <b>79</b> |

# 1 Wprowadzenie

Transmisja bezprzewodowa staje się dziś jednym z najważniejszych sposobów teletransmisji, stała się jednym z najważniejszych o ile nie najważniejszym środkiem współczesnej komunikacji, teletransmisji, radiodyfuzji i transmisji danych. Liczba abonentów telefonii komórkowej w Polsce wielokrotnie przewyższa już liczbę abonentów telefonii stacjonarnej, także liczba abonentów usług bezprzewodowego dostępu do Internetu oferowanych przez operatorów komórkowych przekracza w Polsce liczbę usług dostępu stacjonarnego<sup>1</sup>. Użytkownicy smartfonów i tabletów używają powszechnie transmisji bezprzewodowej zarówno do rozmów głosowych jak i dostępu do różnorodnych usług internetowych. Widmo radiowe staje się bardzo cennym zasobem w aktywach wszystkich operatorów telekomunikacyjnych. Skutkuje to bardzo wysokimi cenami w przypadku sprzedaży przez Państwo praw dostępu do widma radiowego. W zakończonej pod koniec 2015r. aukcji częstotliwości z pasma 790-862 MHz za uzyskanie praw do 50 MHz (2x25 MHz) widma radiowego uzyskano kwotę wpływu do budżetu równą łącznie 8,64 mld zł (5 licencji na 15 lat każda 2x5 MHz). Powoduje to wzrost znaczenia prac badawczych i rozwojowych w obszarze nowych technik wykorzystywania i zwiększania efektywności wykorzystania widma radiowego. Oczekuje się też zmian aktualnego paradygmatu regulacji widma radiowego realizowanego zasadniczo w sposób statyczny (przydzielanie praw do jego wykorzystania prowadzona jest w sposób administracyjny przez Tabele, Decyzje, Pozwolenia), w kierunku nowych rozwiązań dynamicznych i bazujących na rozwiązaniach technicznych tj. Cognitive Radio (radio kognitywne), Open Spectrum Access (bezlencyjny, otwarty dostęp do widma), Ultra Wide Band (dostęp szerokopasmowy niezakłócający obecnych użytkowników).

Podjęte w ostatnich latach w Instytucie Łączności prace badawcze i regulacyjne w tej dziedzinie bazują głównie w oparciu o systemy radia kognitywnego<sup>2</sup>, są w dużej części pionierskie w kraju, obecnie nie ma jeszcze np. działających praktycznie w Polsce sieci

---

<sup>1</sup> Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego w Polsce w 2015 roku, UKE, 2016

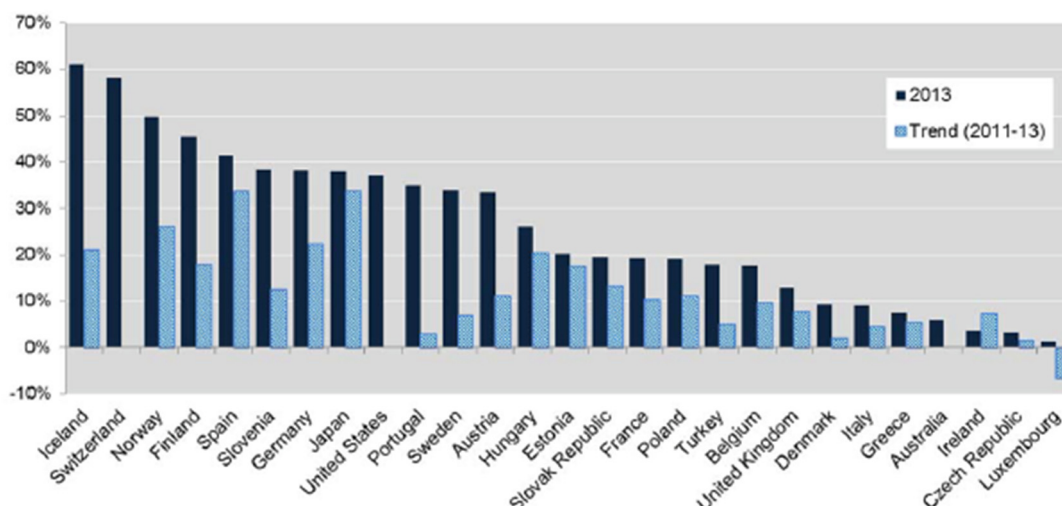
<sup>2</sup> Cognitive Radio Policy and Regulation, Springer International Publishing, Switzerland, 2014, TV White Spaces. A pragmatic approach, ICTP-The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy, 2013

komercyjnych wykorzystujących tego typu dostęp. Prace podjęte w latach poprzednich rozwijano w kierunku praktycznych rozwiązań detekcji widma radiowego systemów radia kognitywnego, a także podjęto temat dostępu ultraszerokopasmowego dostępu do widma radiowego jako rokujący również nadzieję na jego efektywniejsze i praktyczne wykorzystanie. W kolejnych rozdziałach przedstawiono podstawowe problemy związane ze współużytkowaniem widma radiowego, zasady regulacyjne obowiązujące techniki ultraszerokopasmowe UWB, testy transmisji i kompatybilności praktycznego rozwiązania systemu UWB oraz opracowanie i testy praktycznych układów detekcji widma radiowego pasm VHF i UHF z wykorzystaniem opracowanej aplikacji umożliwiającej transmisję do bazy danych oraz ich wizualizację.

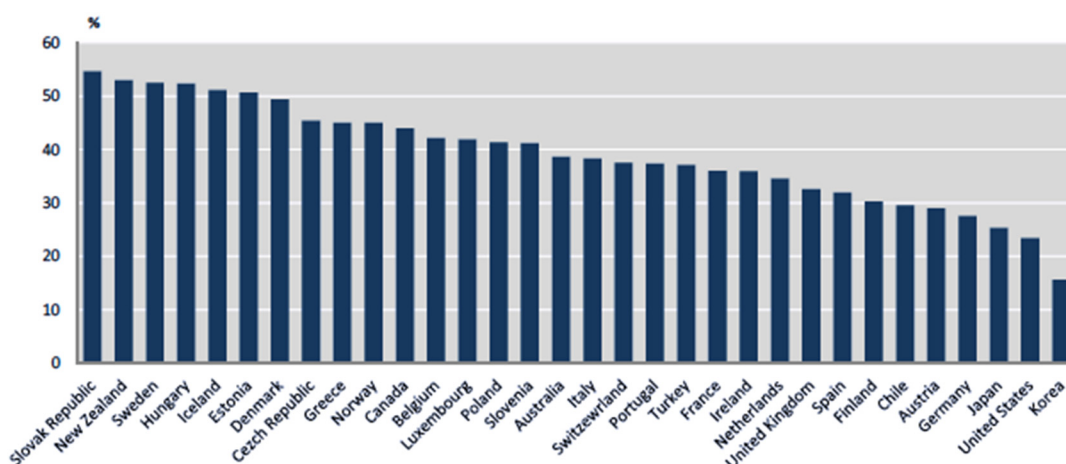
## 2 Dostęp do widma radiowego

Od dłuższego czasu obserwuje się stały wzrost konwergencji stałych (przewodowych) i mobilnych (bezprowadowych) technik transmisji. Dla przykładu, rysunek 1 przedstawia procentowy udział łączy stałych i mobilnych w wybranych krajach w roku 2013 oraz trend obserwowany w latach 2011 – 2013.

Jak widać na rysunku, w Polsce blisko instalacji domowych posiada podwójny dostęp, podczas gdy np. w Islandii wynosi on ponad 80%. Wzrost w latach 2011 – 2013 przekracza w Polsce 10%. Najwyższy wzrost (ponad 30%) zaobserwowano w Hiszpanii i Japonii. W wielu krajach (Australia, Austria, Finlandia, Italia) ponad 25% wszystkich gospodarstw domowych ma dostęp do Internetu wyłącznie za pośrednictwem sieci bezprzewodowej.



Rysunek 1. Procentowy udział łączy stałych i mobilnych (WiFi) gospodarstwach domowych w wybranych krajach OECD. (Źródło: [1]).



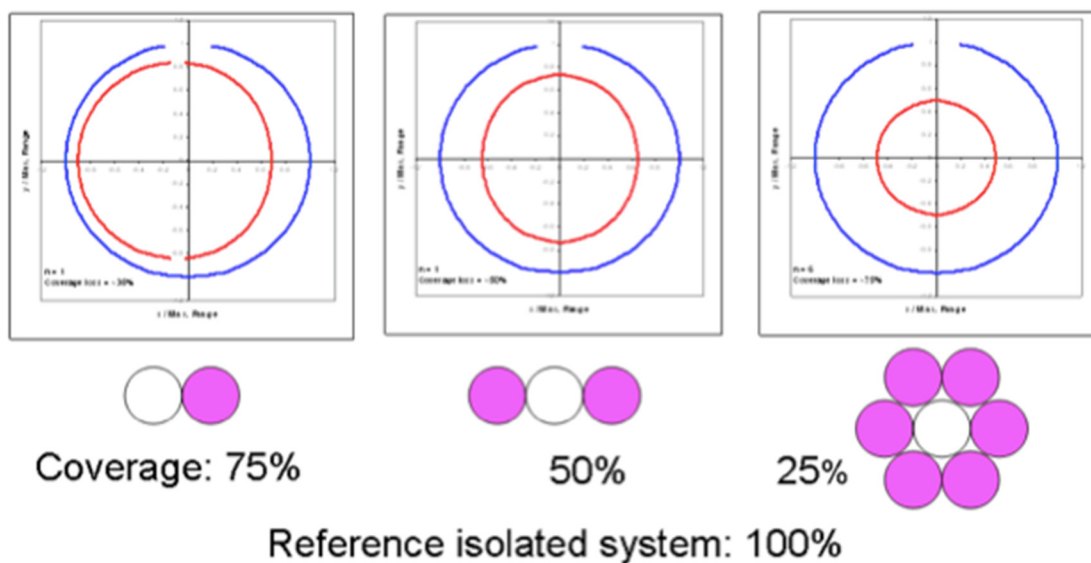
Rysunek 2. Procentowy udział dodatkowych usług via Internet w wybranych krajach OECD.

Rysunek 2 ilustruje z kolei popularność dodatkowych usług takich jak np. V&V (voice and video) lub telewizja internetowa. W Polsce wynosi on ok. 40%; najwyższe (ok. 55%) odnotowano w Słowacji. Zadziwiający wzrost popularności smartfonów, tabletów i podobnych urządzeń radiowych obserwowane w ostatnich latach spowodował zwiększone zapotrzebowanie na częstotliwości. Wzrasta szczególnie zainteresowanie powiększeniem efektywności wykorzystania widma radiowego i ułatwieniem dostępu do niego (*Spectrum Access*), ponieważ ograniczony dostęp do widma powoduje opóźnienia w rozpowszechnianiu usług bezprzewodowych i rozwoju e-Gospodarki. Coraz większą rolę odgrywa tu kwestia dostępu do widma radiowego [2]. Istotnym elementem jest tu inżynieria widma (*Spectrum Engineering*) jako jeden z podstawowych sposobów zwiększenia i ułatwienia dostępu do widma. Do problemu tego wrócimy jeszcze w części końcowej.

## 2.1 Dostęp do widma radiowego

Znana początkowo jako technika przydziału częstotliwości (*Frequency Assignment*) inżynieria widma powstała w początkach ubiegłego stulecia i rozwinęła się około połowy XX wieku. Podstawowym problemem było wówczas planowanie częstotliwości w stacjonarnych sieciach radiofonicznych oraz quasi-stacjonarnych sieciach radiokomunikacji wojskowej. W latach osiemdziesiątych, kiedy zaczęła się rozwijać telefonia komórkowa, szczególnym zainteresowaniem cieszył się problem wielokrotnego wykorzystania częstotliwości w sieciach komórkowych ze stacjonarnymi stacjami bazowymi (*Frequency Reuse*). Sprawę ilustruje rysunek 3, który przedstawia wyniki symulacji efektów rozwoju sieci komórkowej, który polega

na kolejnym dodawaniu do danej stacji (referencyjnej) jednej, dwóch, lub sześciu identycznych stacji bazowych. Dla uproszczenia, założono anteny dookólne i idealne warunki propagacji w wolnej przestrzeni, co daje obszar zasięgu odosobnionej stacji w formie kołowej. Rysunek ilustruje efekty wzajemnych oddziaływań systemów pracujących w tym samym zakresie częstotliwości niezależnie od systemu GPS, WiFi, LTE itd. Przy tym poziomie abstrakcji, rysunki ilustrują częstotliwościach, przy których decyduje bezpośrednia widoczność.

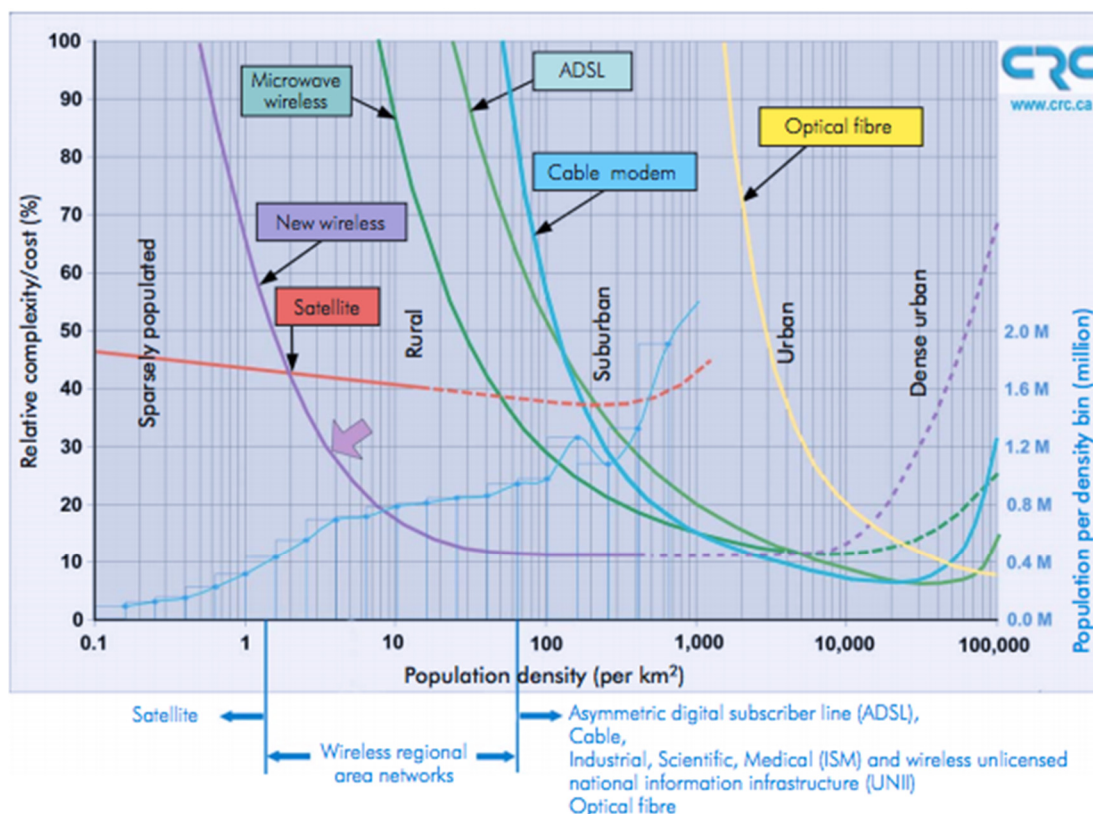


*Rysunek 3. Ilustracja efektów dodawania do stacji referencyjnej (oznaczonej białym kółkiem) dodatkowych identycznych stacji (o tych samych parametrach i tej samej częstotliwości - oznaczonych czerwonymi kółkami) na jej zasięg i obszar pokrycia (coverage). Okrąg niebieski reprezentuje granice zasięgu stacji odosobnionej (zasięg ograniczony szumem termicznym, bez wpływu zakłóceń zewnętrznych). Okręgi czerwone reprezentują granice zasięgu po uwzględnieniu efektów zakłóceń interferencyjnych spowodowanych przez dodatkowe stacje (źródło: opracowanie własne).*

Jak widać na rysunku, dodanie kolejnych stacji w tym samym zakresie częstotliwości powoduje utratę 75%, 50% lub 25% powierzchni obszaru pokrycia. Podobnie zmniejszeniu ulega maksymalny wypadkowy zasięg sieci: jest to różnica długości promieni do punktów niebieskich i czerwonych. Bardziej ogólne wyniki teoretyczne można znaleźć m.in. w pracach



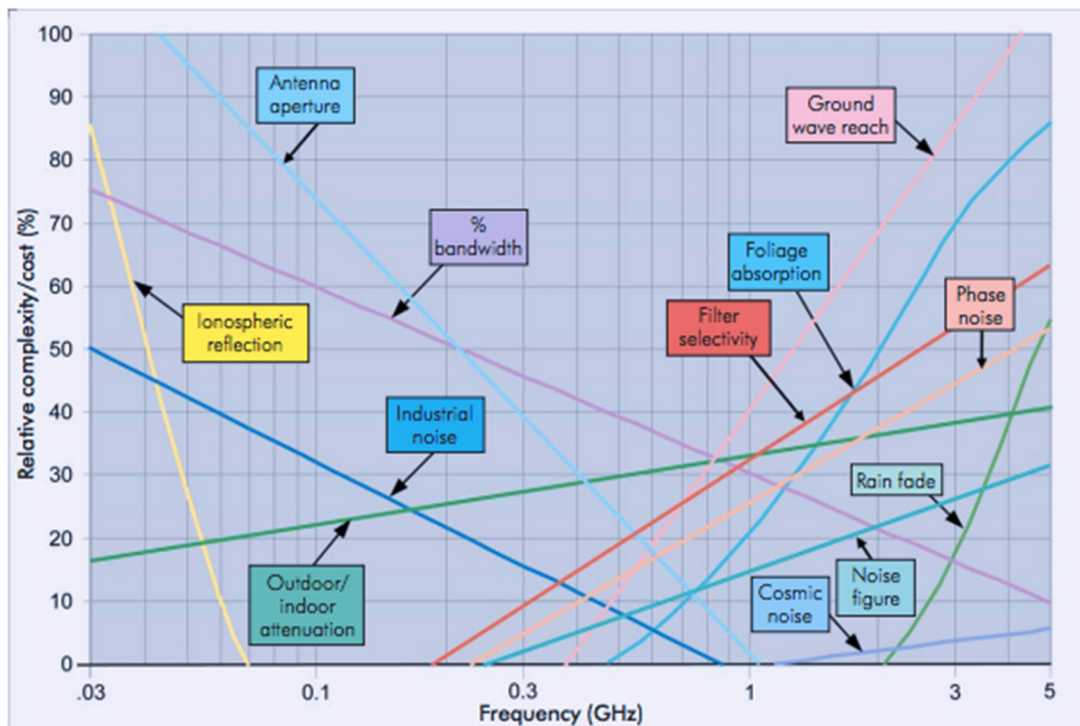
sponsorowanych przez szereg lat przez rząd Wielkiej Brytanii (*Radiocommunications Agency*) [3][4]. Zjawiska te powodują konieczność poszukiwania dla sąsiednich stacji innych częstotliwości, które nie będą miały wpływu degradującego zasięg wypadkowy danej stacji w tak istotny sposób.



Rysunek 4. Szacowany koszt i złożoność szerokopasmowego dostępu przy wykorzystaniu różnych technologii, w zależności od gęstości zaludnienia. (Źródło: [5])

Na rysunku 4 zestawiono względne koszty kilku różnych technologii przewodowych i bezprzewodowych, co do których zebrano wystarczające doświadczenia praktyczne. W rejonach o największej gęstości zaludnienia najtańsze rozwiązania to kabel światłowodowy, który jednak wyklucza możliwość realizacji usług mobilnych. W rejonach najsłabiej zaludnionych najtańsza jest technika satelitarna. Jednak systemy satelitarne wprowadzają spore opóźnienia i nie nadają się do niektórych zastosowań takich jak np. błyskawiczne transakcje giełdowe czy gry online. Nie zostały pokazane sieci typu Piko-cel i Femto-cel [6] [7]. Nie są też wyszczególnione konstelacje nisko-orbitujących satelitów (LEO) oraz stratosferycznych platform HAP (*High Altitude Platforms*) [8], [9]. Oddzielną kategorię tworzą zastosowanie typu autonomiczne

pojazdy (*Self Driving Cars*), które budzą ostatnio duże zainteresowanie.



Rysunek 5. Czynniki, które należy uwzględnić przy wyborze częstotliwości dla szerokopasmowych systemów dostępu radiowego.

Rysunek 5 przedstawia najważniejsze czynniki, jakie inżynieria widma radiowego bierze pod uwagę przy planowaniu systemów. Podobnie jak na rysunku 4, oś pionowa wykresu reprezentuje względny koszt i stopień skomplikowania a oś pozioma – częstotliwości od 300 MHz do 1 GHz. Pokazuje on przybliżoną zależność głównych czynników fizycznych od częstotliwości: tłumienie i zaniki fali elektromagnetycznej, szумы radiowe naturalne i przemysłowe, rozmiary anten.

Nie uwzględnia on jednak wszystkich czynników fizycznych, których nie sposób pokazać na tym rysunku, z uwagi na przyjęte współrzędne i ich zakres. Należą do nich:

- wzajemne zakłócenia między urządzeniami/ systemami radiowymi (które z kolei zależą od ilości urządzeń oraz od ich gęstości i rozmieszczenia przestrzennego, jak pokazano wcześniej na rysunku 3),
- częstotliwości wyższych od 5 GHz, które stają się coraz bardziej popularne,

- odbicia i wielotorowość fali elektromagnetycznej, a także czas przejścia i zmiany fazy fali elektromagnetycznej, oraz inne efekty środowiska propagacyjnego takie jak np. efekty przeszkód na trasie propagacji (budynki, góry), efekty klimatyczne (w przypadku łączności naziemnej), lub jonosferyczne (w przypadku łączności satelitarnej i kosmicznej).

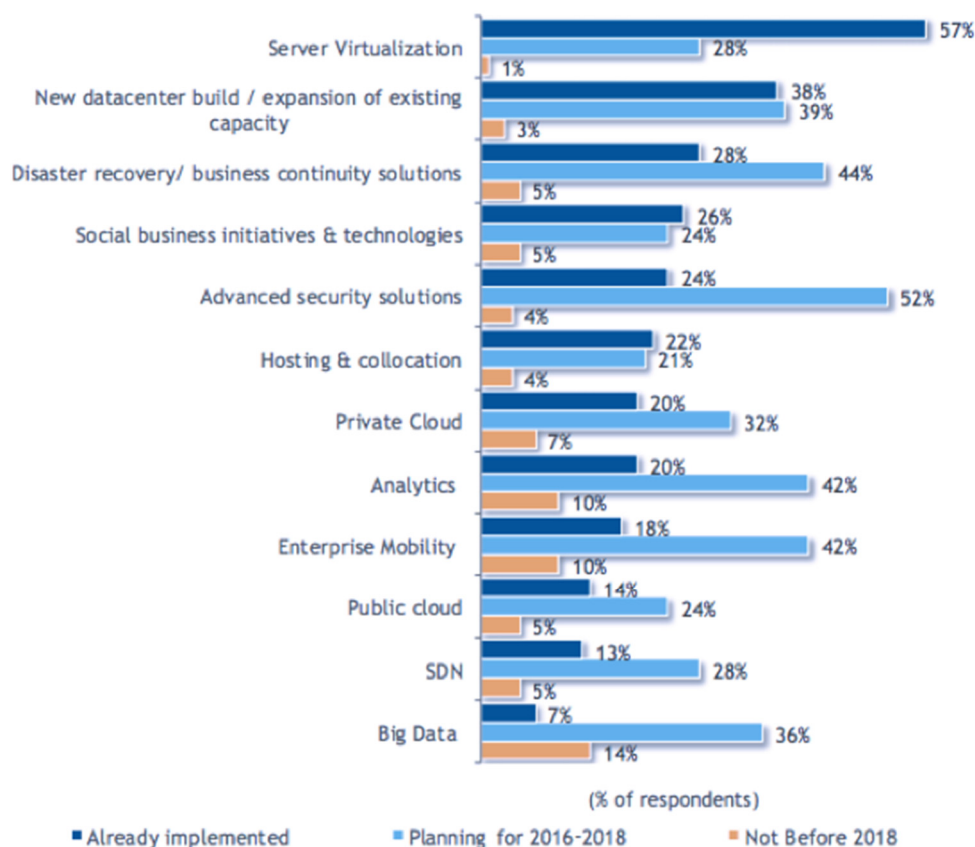
W miarę rozwoju wiedzy i technologii, powstają nowe koncepcje usług i sieci telekomunikacyjnych. Przykładem służyć tu mogą obecnie “usługi sąsiedzkie” (*Proximity Services*), polegające na bezpośredniej wymianie sygnałów między sąsiednimi urządzeniami (*Device-to-Device, D2D*). Zalety takiego rozwiązania to m.in. lepsze wykorzystanie widma radiowego, zmniejszone zużycie mocy, dodatkowe usługi. Oczekuje się, że urządzenia D2D będą wykorzystywać nowo-opracowany protokół, lub istniejący standard WLAN. Podstawowa zaleta takiego rozwiązania ujawnia się w przypadkach klęsk żywiołowych (powódź, pożar), awarii, czy ataków terrorystycznych, kiedy zcentralizowane sieci komórkowe a czasem nawet bezpieczeństwa publicznego nie działają lub nie są dostępne [10].

Można spodziewać się dalszego rozpowszechnienia znanych wcześniej rozwiązań wykorzystujących współpracę wielu inteligentnych urządzeń takich jak np. inteligentne i adaptacyjne anteny czy systemy transmisji wieloantenowej (*smart antenna arrays, adaptive antenna arrays, MIMO systems, czy massive MIMO*), które mogą wchodzić w skład bardziej złożonych systemów radia programowalnego SDR (*Software Defined Radio*) i kognitywnego CR (*Cognitive Radio*). Ewolucja bezprzewodowych sieci telekomunikacyjnych w kierunku Piątej Generacji (5G) ma miejsce pod presją wielkich operatorów i producentów sprzętu. W miarę czasu obserwuje się także uogólnianie koncepcji. Np., po radiu programowalnym „SDR” pojawia się także sieć programowalna „SDN - Software-Defined Network” i sieć rekonfigurowalna (*Reconfigurable Network*). Ewolucja ta jest najlepiej widoczna w pracach międzynarodowych organizacji standaryzacyjnych i w raportach wielkich korporacji.

Rysunek 6 przedstawia dla przykładu nakłady organizacji rządowych na wdrażania innowacji w ICT. Badania wykonała w 2016 r. firma IDC dla Hewlett Packard Enterprise. Innowacje pojawiają się ciągle, między innymi w miarę odtajniania wyników prac specjalnych prowadzonych dla wojska ale ich sukces zależy głównie od aspektów biznesowych: oczekiwanych nakładów, zysków i strat kapitałowych. W ślad za nowościami technologicznymi idą nie tylko nowe zastosowania i nowe modele biznesowe w sektorze ICT, lecz również innowacje w inżynierii widma. Przykładem służyć może koncepcja białych przestrzeni „White

Space” [11].

### Government Digital Technology Investments



Source: IDC CIO Survey 2016

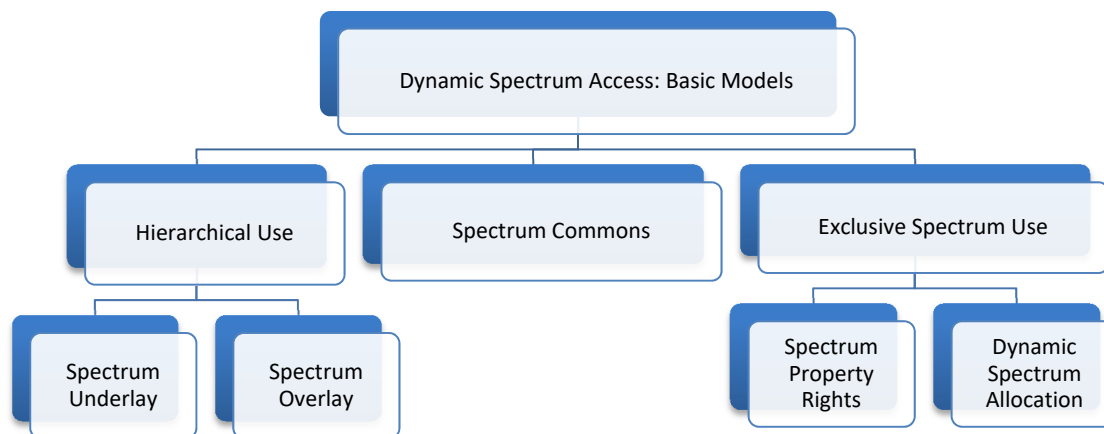
Rysunek 6. Stan rządowych inwestycji w innowacje w dziedzinie ICT w 2016 r. Pokazane są trzy fazy: innowacje w większości wdrożone, wdrożenia oczekiwane przed 2018 r. oraz wdrożenia oczekiwane po 2018 r. (Źródło: [12], fig 5.)

## 2.2 Redefinicja inżynierii widma radiowego i EMC?

Popularne obecnie metody i narzędzia inżynierii widma powstawały w okresie ponad 110 lat. Powstawały one pod presją z jednej strony rozwoju technologii radiowych, a z drugiej - regulacji międzynarodowych tj. traktatu międzynarodowego ITU „Regulamin Radiokomunikacyjny”. Obydwa te czynniki zmieniają się wraz z rozwojem wiedzy i presji rynku. Z tych dwu, regulacje zależą też od aktualnie dominujących doktryn politycznych,

ekonomicznych i ideologicznych. Obecne regulacje, krajowe i międzynarodowe, bazują na ustalonej statycznej klasyfikacji usług i sieci oraz na przeznaczonych dla nich zbiorze określonych pasm częstotliwości. Obecne programy szkolenia inżynierów, tak jak i praktyki biur i pracowni projektowych stosuje powszechnie klasyczne metody i narzędzia inżynierii widma, które bazują na takim statycznym planie zagospodarowania widma radiowego, znanym jako Tablica Przydziałów Częstotliwości (publikowana w Polsce w Dzienniku Ustaw jako rozporządzenie Rady Ministrów i na stronie internetowej UKE).

Takie podejście stoi jednak w rażącej sprzeczności z opisanymi wyżej nowymi trendami i nowymi możliwościami technicznymi. Dynamiczne zarządzanie wykorzystaniem widma radiowego budzi ostatnio coraz większe zainteresowanie. Jego ogólne zasady są przedstawione na rysunku 7.



Rysunek 7. Podstawowe modele dynamicznego dostępu do widma. [13]

Nasuwa się więc pytanie, czy nie jesteśmy obecnie świadkami redefinicji gospodarki widma, inżynierii widma i kompatybilności elektromagnetycznej w wyniku postępów wiedzy i technologii? Chodzi o to, że przy daleko posuniętej automatyzacji elementy inżynierii widma radiowego istniejące w interfejsie radiowym systemu mogą zostać zintegrowane z systemem zarządzającym dostępem do systemu (media access protocol), który realizuje np. jeden z wariantów modelu z rys. 7. Dyskusje w tej sprawie trwają: na przykład IEEE organizuje co najmniej piętnaście otwartych konferencji w celu wszechstronnego przedyskutowania problemów związanych z ewolucją sieci 5G. [14] Wcześniej problem te były dyskutowane w ramach prac Departamentu Obrony Stanów Zjednoczonych; wnioski z tych dyskusji zostały opublikowane w pewnym zakresie, oczywiście. [15]. Nowe zastosowania zależą od dostępu do

widma i identyfikują wagę tej dziedziny w rozwoju technik telekomunikacyjnych i rozwoju gospodarczym krajów:

*„Today, spectrum, more than ever, is identified by policy makers as a key asset to support growth in the Digital Economy. [...] All national broadband plans in OECD countries have as a key feature the use of wireless technologies to complement fixed networks and as such put an emphasis on the availability of spectrum resources.” [16]*

Ten dostęp z kolei zależy w sposób krytyczny od inżynierii widma radiowego i kompatybilności elektromagnetycznej. Tymczasem względna ilość prac na ten temat w porównaniu z latami ubiegłymi wydaje się mniejsza. Być może wiąże się to z hamującym wpływem regulacji, które w sposób istotny ograniczają pole poszukiwań. Z drugiej strony może to być efekt tradycyjnego rozdziału inżynierii widma od inżynierii oprogramowania. Podczas gdy pierwsza należy do świata fizycznego fal radiowych i oddziaływań elektromagnetycznych (hardware), druga należy do świata wirtualnego (software).

R. T. Pennock np. zaproponował zastosowanie algorytmu ewolucyjnego [17], który, jak się wydaje, może odpowiadać nowym potrzebom inżynierii widma i możliwościom sprzętowym:

*GIVEN the initial solution (generation), goal, evolution rules, constraints, and terminating criteria:*

*1. REPEAT*

- a. Compute the fitness values of current generation of individuals in current environment and store it in the fitness vector*
- b. Select individual(s) from the current population using the selection criteria and current fitness vector*
- c. Mutate the selected individual(s) and produce the next solution (generation)*

*2. UNTIL the terminating criteria are met.*

Algorytm ten nie został jeszcze sprawdzony w praktyce. Bazuje on na wyborze opartym na wiedzy o systemie i jego środowisku. Śledzi on system i jego otoczenie i reaguje odpowiednio. Optymizacja polega na identyfikacji „złych” elementów systemu (krok 2b) oraz ich poprawy (2c). Kolejne przybliżenie rozwiązania jest lepsze od poprzedniego, co prowadzi w końcu do rozwiązania optymalnego, lub wykazuje jego brak. Podejście to przypomina ogólną metodę optyimizacji znaną jako LS (local search), którą np. zastosowano wcześniej do wyboru

częstotliwości [18] ale tutaj chodzi o wybór także innych parametrów systemu, nie tylko częstotliwości.

Wprowadzenie inteligentnych systemów bezprzewodowych wymaga integracji tych dwu światów tak aby stały się praktyczne: identyfikacja otoczenia, lokalizacja jego elementów, gromadzenie, analiza i wykorzystanie danych, predykcja i zapobieganie niepożądanym efektom, zastosowanie wymogów lokalnych i regulaminu radiokomunikacyjnego, rekonfiguracja systemu, współpraca z innymi elementami, koordynacja, itd. Wymaga to wykonywania wielkiej liczby obliczeń w czasie rzeczywistym. W tym celu może okazać się też potrzebne przejście z CPU (central processing unit & serial computing) do GPU (graphic processing unit & parallel computing) [19]. Może być potrzebne wykorzystanie elementów opracowanych i sprawdzonych w innych programach, takich jak np. „Big Data”, „Cloud Computing” , „Artificial Intelligence”, „Cyber-Security”, „Internet of Things” itp.

Systemy bezprzewodowe zamieniają się w wyspecjalizowane systemy komputerowe, żyjące własnym życiem – roboty komunikacyjne, które przyszłości w mogą zmienić całkowicie rozwinięte społeczeństwo, jakie znamy obecnie. Jednym z efektów jakich można się spodziewać jest automatyzacja inżynierii widma, początkowo w ograniczonym zakresie a następnie rozszerzająca się na coraz większe obszary łączności bezprzewodowej. W tej dziedzinie podstawowymi technikami będzie Cognitive Radio (CR) jako technika umożliwiająca w inteligentny sposób analizę i ocenę istniejącego środowiska radiowego a następnie na tej podstawie podejmowana jest decyzja o transmisji lub jej wstrzymaniu w danym zakresie widma radiowego czy techniki ultraszerokopasmowe (UWB), w których sygnał radiowy ze względu na niski poziom, zbliżony do szumu lub niższy od poziomu szumu, nie będzie powodował zakłóceń do innych systemów zapewniając przy tym wystarczającą przepustowość (zasadniczo ze względu na moce i konieczność ochrony innych systemów na stosunkowo krótkich odległościach). W niniejszej pracy wykonano badania dotyczące obu tych rodzajów technik: przeanalizowano i dokonano pomiarów systemu ultraszerokopasmowego UWB i oceniono jego odporność na zakłócenia w środowisku radiowym a także wykonano badania detekcji widma radiowego w pasmach VHF i UHF służące do przyszłych zastosowań technik radia kognitywnego CR. Wyniki przedstawiono w kolejnych rozdziałach.

## **Literatura do Rozdziału 2:**

[1] Digital Convergence And Beyond; OECD Digital Economy Papers, OECD 2016 No. 251

- [2] R. Strużak, T. Tjelstam, J.P. Borrego: On Radio-Frequency Spectrum Management; URSI Radio Science Bulletin 2015, no. 354, pp. 11–34; Reprinted in Journal of Telecommunication and Information Technology, Nr. 3/2016, str. 1 – 23.
- [3] R. Leese, S. Hurley: Methods and Algorithms for Radio Channel Assignment; Oxford University Press 2002; ISBN 0 19 850314 8.
- [4] J. Pahl: Interference Analysis: Modelling Radio Systems for Spectrum Management; Wiley 2016, ISBN 9781119065289
- [5] G. Gérald Chouinard: Bringing broadband access to rural and remote areas – Canadian Experience; ITU News Magazine No.3/2006
- [6] J. Zhang Z. Xiao X. Zhang E. Liu: Two-Tier Femto-Macro Wireless Networks: Technical Issues and Future Trends; URSI Radio Science Bulletin No 345 (June 2013), p. 51 – 63
- [7] J. Gavan, U. Mahlab: Nanocells Intrasytem Interference Realistic Worst Case Analysis for Personal Communication Scenarios; ACES Journal, vol. 15 No. 3, Nov. 2000, pp. 135 – 151.
- [8] R. Struzak: Mobile telecommunications via stratosphere; Intercomms - International Communications Project, 2003, <http://www.intercomms.net>
- [9] J. Gavan, D. Grace, R. Struzak: Introduction to the Special Section on High-Altitude Platforms; Radio Science Bulletin 334 - September 2010; [http://www.ursi.org/files/RSBissues/RSB\\_334\\_2010\\_09.pdf](http://www.ursi.org/files/RSBissues/RSB_334_2010_09.pdf)
- [10] M. Gundlach: Overview of D2D Proximity Services Standardization in 3GPP LTE; European Conference on Networks and Communications, Bologna, Italy, 2014-06-23, Workshop on Radio Access and Spectrum.
- [11] R. Struzak, D. Wiecek: Regulatory Issues for TVWhite Spaces; in E.Pietrosemoli, M.Zennaro (eds.): TV White Spaces. A Pragmatic Approach; pp. 19 – 35 ICTP - Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics/ICT4D Lab.
- [12] R. Rajan, P. Black, K. Chinta, R. Y. Clarke: Future Cities: Time to Smarten Up; IDC OPINION, July 2016



[13] Meng-Lin Ku, Jia-Chin Lin: Cognitive Radio and Interference Management. Technology and Strategy: IGI Global, 2013, ISBN 978-1-4666-2007-0.

[14] [www.5gsummit.org](http://www.5gsummit.org)

[15] G.E. Parnell, C.M. Crain, A.L. Hiebert: Spectrum Management and Electromagnetic Compatibility Issues in the Department of Defense; RAND Note N-3352-C31, 1991

[16] “New Approaches to Spectrum Management”, OECD Digital Economy Papers, No. 235, OECD Publishing, 2014, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/5jz44fnq066c-en>.

[17] R. T. Pennock: Models, simulations, instantiations, and evidence: the case of digital evolution; Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, vol. 19, No. 1, March 2007, p.29-42

[18] K. I. Aardal et al. in: *Models and solution techniques for frequency assignment problems*; Annales Operation Research (2007) 153: pp. 79–129, DOI 10.1007/s10479-007-0178-0;

[19] J. Wroński: Zastosowanie obliczeń równoległych w planowaniu naziemnych sieci radiowych; Praca doktorska; Politechnika Wrocławska, 2013

### **3 Regulacje dotyczące technik ultraszerokopasmowych (UWB) obowiązujące w Europie**

Regulacje odnoszące się do urządzeń ultraszerokopasmowych (Ultra-Wide-Band, UWB) mogą nosić charakter techniczny oraz prawny. Mają na celu maksymalizację korzyści z wykorzystywania urządzeń UWB a w szczególności maksymalizację efektywnego wykorzystania widma częstotliwości radiowych przy zapewnieniu kompatybilności elektromagnetycznej z innymi urządzeniami oraz zapewnić efekt korzyści skali wprowadzenia tych urządzeń. W tym celu w Europie opracowane zostały odpowiednie decyzje Komisji Europejskiej oraz decyzje i sprawozdania CEPT a także normy techniczne na te urządzenia opracowane w ETSI. Potrzeba regulacji odnoszących się do urządzeń UWB bardzo mocno jest artykułowana przez Komisję Europejską, która w swoim dokumencie [1] stwierdza m.in., że „Technologia ultraszerokopasmowa (ang. Ultra-Wide Band, „UWB”), charakteryzująca się zwykle bardzo niskim poziomem mocy promieniowanej w bardzo szerokim paśmie częstotliwości radiowych, może zapewnić szereg zastosowań w łączności, pomiarach, lokalizacji, medycynie, nadzorze i obrazowaniu, z korzyścią dla wielu obszarów wspólnotowej polityki, w tym dla polityki w zakresie społeczeństwa informacyjnego i rynku wewnętrznego. W związku z tym ważne jest określenie warunków regulacyjnych, które będą sprzyjać rozwojowi ekonomicznie opłacalnych rynków zastosowań technologii UWB w miarę pojawiania się możliwości rynkowych.” Natomiast w sprawozdaniu [2] poprzez urządzenia UWB rozumiane są takie urządzenia, które zajmują względne pasmo równe 20% i więcej w stosunku do częstotliwości środkowej albo bezwzględne pasmo 500 MHz i więcej. Urządzenia te generują relatywnie małą moc średnią z możliwie dużym stosunkiem mocy szczytowej do średniej (z tego względu istotne są moce szczytowa i średnia). Regulacje stosuje się do następujących urządzeń UWB:

- aplikacje medyczne,
- aplikacje komunikacyjne dla indywidualnych klientów,
- aplikacje motoryzacyjne,
- konsumenckie i przemysłowe aplikacje budowlane,
- systemy radarowe do penetracji gruntu,

- przemysłowe wskaźniki poziomu cieczy,
- systemy łączności cyfrowej,
- bezprzewodowe sieci o wysokiej przepływności, itp.

Wg [2] podzielić je można na trzy grupy:

Grupa 1. Komunikacyjne i pomiarowe systemy UWB, w składzie:

- aplikacje transmisji danych dla klientów indywidualnych i biznesowych, np.:
  - rozrywki domowej i sieci domowe (wewnętrzne, o dużej gęstości i średnio-niskim wykorzystaniu);
  - interfejsy multimedialne telefonów komórkowych, (zewnętrzne i wewnętrzne, o dużej gęstości i średnim wykorzystaniu);
  - bezprzewodowe sieci osobiste (Wireless Personal Area Networks, WPAN - wewnętrzne, hot-spoty, z wykorzystaniem niskim do średniego);
  - lokalne sieci bezprzewodowe (Wireless Local Area Networks, WLAN – np. podobne do RLAN o zwiększonej pojemności, wewnętrzne, hot-spoty, o wysokim wykorzystaniu);
- połączone systemy transmisji danych i pomiarowe, np. urządzenia pomiarowe i rejestrujące położenie (zewnętrzne i wewnętrzne, o niskiej gęstości rozmieszczenia, o niskim wykorzystaniu).

Grupa 2. Systemy obrazowe UWB (zewnętrzne i wewnętrzne, o niskiej gęstości rozmieszczenia, o wykorzystaniu niskim do wysokiego, możliwe aplikacje bezpieczeństwa), w tym:

- radary penetracji gruntu (Ground Penetrating Radars, GPRs);
- obrazowanie wewnątrz ścian;
- obrazowanie poprzez ściany;
- obrazowanie medyczne;
- urządzenia nadzoru i kontroli;
- przemysłowe wskaźniki poziomu cieczy.

Grupa 3. Radary motoryzacyjne, w tym typu:

- pojazd-pojazd (Vehicle-to-vehicle, V2V);
- pojazd-infrastruktura (Vehicle-to-infrastructure, V2X).

Stosowanie w praktyce urządzeń UWB wiąże się z wieloma problemami wynikającymi z tego, że pomimo używania przez nie stosunkowo niewielkich mocy, wykorzystują one z reguły

bardzo szerokie pasmo częstotliwości, co sprzyja możliwościom zakłócania innych urządzeń (systemów). Z tego względu należało określić podstawowe parametry urządzeń UWB umożliwiające opracowanie norm zharmonizowanych w skali europejskiej.

Pierwsze tego typu parametry określone zostały przez CEPT w decyzji [3] na podstawie wyników badań kompatybilnościowych przedstawionych w sprawozdaniu [2]. Ustalono tam szczegółowo maksymalne moce promieniowane izotropowo (e.i.r.p.) przez urządzenia UWB pracujące na częstotliwościach poniżej 10,6 GHz. Powyżej 10,6 GHz przyjęto ogólne ograniczenie. Wartości tych mocy przedstawione są w tab. 1. (Zakłada się przy tym, że nie są stosowane żadne techniki ograniczania zakłóceń).

Tab. 1. Ograniczenia maksymalnej e.i.r.p. urządzeń UWB wg CEPT [3]

| Zakres częstotliwości | Maksymalna średnia gęstość e.i.r.p. (dBm/MHz) | Maksymalna szczytowa gęstość e.i.r.p. (dBm/50MHz) |
|-----------------------|---|---|
| Poniżej 1,6 GHz       | -90 dBm/MHz                                   | -50 dBm/50MHz                                     |
| 1,6 do 3,8 GHz        | -85 dBm/MHz                                   | -45 dBm/50MHz                                     |
| 3,8 do 4,8 GHz        | -70 dBm/MHz                                   | -30 dBm/50MHz                                     |
| 4,8 do 6 GHz          | -70 dBm/MHz                                   | -30 dBm/50MHz                                     |
| 6 do 8,5 GHz          | -41.3 dBm/MHz                                 | 0 dBm/50MHz                                       |
| 8,5 do 10,6 GHz       | -65 dBm/MHz                                   | -25 dBm/50MHz                                     |
| Powyżej 10,6 GHz      | -85 dBm/MHz                                   | -45 dBm/50MHz                                     |

W powyższej tabeli (i dalej w niniejszym tekście) przyjęto, że szczytowa gęstość e.i.r.p. oznacza maksymalny poziom mocy transmisji zawartej w paśmie o szerokości 50 MHz, którego środek stanowi częstotliwość, na której średnia moc promieniowana osiąga maksimum. W przypadku pomiaru w paśmie o szerokości  $x$  MHz wartość zmierzoną należy zmniejszyć, stosując w tym celu współczynnik  $20\log(50/x)$  dB. Natomiast średnia gęstość e.i.r.p. stanowi średnią wartość mocy mierzoną miernikiem wartości skutecznej przy rozdzielczości szerokości pasma wynoszącej 1 MHz i czasie uśredniania nieprzekraczającym 1 ms. Maksymalna gęstość

e.i.r.p. oznacza z kolei najwyższą wartość mocy sygnału, mierzoną w dowolnym kierunku i na dowolnej częstotliwości w przyjętym zakresie częstotliwości [1].

Ograniczenia, o których mowa powyżej mogą jednak ulec zmianie, gdy podczas transmisji sygnałów z urządzeń UWB wprowadzi się techniki ograniczeń zakłóceń (lub co najmniej jedną z nich). Takimi typowymi technikami redukcji zakłóceń, które stosowane są w urządzeniach UWB, są [4, 5, 6, 7, 8]:

- LBT (ang. listen before talk (transmit)) – technika, w której przed rozpoczęciem nadawania urządzenie radiowe dokonuje rozpoznania zajętości kanału celem znalezienia kanału wolnego;
- DAA (ang. (flexible) detect and avoid) – technika podobna do LBT polegająca na (elastycznym) wykrywaniu zakłóceń w poszczególnych kanałach i w konsekwencji unikania ich podczas transmisji sygnałów użytecznych;
- LDC (ang. low duty cycle) – technika polegająca na niskiej aktywności nadajnika (aktywność ta mierzona jest stosunkiem, wyrażonym w procentach, czasu aktywnej pracy nadajnika w stosunku do określonego przedziału czasu określonego w warunkach technicznych, [3]);
- TPC (ang. transmit power control) – technika polegająca na sterowaniu mocą nadajnika.

Ograniczenia przedstawione w tab. 1 zostały zmienione na mocy decyzji ECC [4] dla przypadku urządzeń UWB, w których stosowana jest technika redukującej zakłócenia typu LDC (niskiej aktywności nadajnika) – łączny czas nadawania nie powinien przekraczać 5 % w każdym z przedziałów jednosekundowych ani 0,5 % w każdym z przedziałów jednogodzinnych, a czas pojedynczej transmisji nie powinien przekraczać 5 milisekund. W takim przypadku, w zakresie 3,4 – 4,8 GHz, dopuszczono do eksploatacji urządzenia UWB z maksymalną średnią gęstością e.i.r.p. poniżej –41.3 dBm/MHz.

W latach 2004 – 2006 Komisja Europejska trzykrotnie zlecała CEPT określenie warunków eksploatacji urządzeń UWB w Europie. Były to: zlecenie udzielone CEPT upoważniające do harmonizacji wykorzystania widma radiowego na potrzeby systemów UWB w Unii Europejskiej („zlecenie 1”), zlecenie udzielone CEPT upoważniające do określenia niezbędnych warunków harmonizacji wykorzystania widma radiowego na potrzeby systemów UWB w Unii Europejskiej („zlecenie 2”) oraz zlecenie udzielone CEPT upoważniające do określenia warunków dotyczących zharmonizowanego wprowadzenia w Unii Europejskiej zastosowań widma radiowego opartych na technice UWB („zlecenie 3”). Zaowocowało to

powstaniem Decyzji Komisji z dnia 21 lutego 2007 r. w sprawie udostępnienia w sposób zharmonizowany widma radiowego na potrzeby urządzeń wykorzystujących technikę ultraszerokopasmową na terytorium Wspólnoty [1].

W dokumencie [1] przedstawione są ograniczenia mocy promieniowanej urządzeń UWB, które z pewnymi niewielkimi zmianami pokrywają się z ograniczeniami przyjętymi w dokumentach [3] i [4]. Zilustrowano je w tab. 2.

Tab. 2. Ograniczenia maksymalnej e.i.r.p. urządzeń UWB w UE [3]

| Zakres częstotliwości [GHz] | Maksymalna średnia gęstość e.i.r.p. (dBm/MHz) | Maksymalna szczytowa gęstość e.i.r.p. (dBm/50MHz) |
|-----------------------------|---|---|
| Poniżej 1,6                 | -90,0   | -50,0   |
| 1,6 do 3,4                  | -85,0   | -45,0   |
| 3,4 do 3,8                  | -85,0   | -45,0   |
| 3,8 do 4,2                  | -70,0   | -30,0   |
| 4,2 do 4,8                  | -41,3 <i>(do 31.12.2010 r.)</i>               | 0,0 <i>(do 31.12.2010 r.)</i>                     |
|                             | -70,0 <i>(po 31.12.2010 r.)</i>               | -30,0 <i>(po 31.12.2010 r.)</i>                   |
| 4,8 do 6,0                  | -70,0   | -30,0   |
| 6,0 do 8,5                  | -41,3   | 0,0   |
| 8,5 do 10,6                 | -65,0   | -25,0   |
| Powyżej 10,6                | -85,0   | -45,0   |

Uwagi do tab. 2:

- W zakresach częstotliwości od 3,4 GHz do 4,8 GHz dopuszcza się maksymalną średnią gęstość e.i.r.p. wynoszącą - 41,3 dBm/MHz, pod warunkiem zastosowania ograniczenia aktywności nadajnika (techniki LDC) , dzięki któremu łączny czas nadawania nie przekracza 5 % w każdym przedziale jednosekundowym ani 0,5 % w każdym przedziale jednogodzinnym, a czas pojedynczej transmisji nie przekracza 5 milisekund,
- Urządzenia korzystające z techniki UWB mogą także zostać dopuszczone do korzystania z częstotliwości radiowych przy innych wartościach granicznych e.i.r.p. niż określono w tabeli 2, pod warunkiem zastosowania odpowiednich technik redukcji zakłóceń innych niż LDC i gwarantujących poziom ochrony przed zakłóceniami co najmniej równoważny zapewnianemu przez ograniczenia określone w tabeli 2.

Po opublikowaniu Decyzji Komisji 2007/131/WE Komisja Europejska ponownie złożyła dwa zlecenia do CEPT. Pierwsze z nich („zlecenie 4”) dotyczyło identyfikacji warunków

harmonijnego wdrożenia w Unii Europejskiej aplikacji radiowych opartych na technice ultraszerokopasmowej UWB. Drugie z nich („zlecenie 5”) obejmowało doprecyzowanie parametrów technicznych urządzeń UWB w aspekcie potencjalnej aktualizacji powyższej Decyzji Komisji [1].

W wyniku zlecenia 4 Komisji Europejskiej powstały dwa sprawozdania CEPT. Sprawozdanie 27 [9] dotyczyło przeglądu badań CEPT nad ogólną postacią transmisji ultraszerokopasmowej (UWB) które zostały zakończone wraz z opublikowaniem decyzji ECC/DEC/(06)12 [4]. W Sprawozdaniu 34 [10] przedstawiono wyniki dodatkowych prac CEPT nad specyficznymi zastosowaniami UWB celem rozszerzenia podstawowych regulacji na różne środowiska. W szczególności zajęto się tam aplikacjami:

- śledzenia położenia dla służb ratunkowych (Location Tracking Application for Emergency Services - LAES);
- śledzenia położenia typu 2 w zakresach częstotliwości 3,4 – 4,8 GHz i 6,0 – 8,5 GHz dla śledzenia osób i obiektów i zastosowań przemysłowych;
- UWB na pokładach samolotów w zakresach częstotliwości 3,1 – 4,8 GHz i 6,0 – 8,5 GHz;
- śledzenia położenia i aplikacjami sensorowymi dla środowiska motoryzacyjnego i transportowego (location tracking and sensor applications for automotive and transportation – LTSA-AT, LTA) w zakresach częstotliwości 3,1 – 4,8 GHz i 6,0 – 8,5 GHz;
- urządzeniami lokalizacji i wykrywania obiektów (Object Discrimination and Characterisation - ODC);
- analizującymi materiały budowlane (Building Material Analysis - BMA).

Dla powyższych aplikacji określone zostały wymagania techniczne związane z maksymalnymi mocami, które mogą być stosowane w praktyce.

Na podstawie wyżej wymienionych sprawozdań CEPT Komisja Europejska wydała decyzję [6] zmieniającą poprzednią decyzję [1]. W tej nowej decyzji zmieniono nieco dane ograniczeń przy ogólnych zastosowaniach techniki UWB, wprowadzając nowe zakresy częstotliwości ze zmienionymi danymi w stosunku do przedstawionej powyżej tab. 2. Dane te pokazane są w tab. 3.

Tab. 3. Ograniczenia maksymalnej e.i.r.p. urządzeń UWB w UE [6]

| Zakres częstotliwości [GHz] | Maksymalna średnia gęstość e.i.r.p. (dBm/MHz) | Maksymalna szczytowa gęstość e.i.r.p. (dBm/50MHz) |
|-----------------------------|---|---|
| Poniżej 1,6                 | -90,0   | -50,0   |
| 1,6 do 2,7                  | -85,0   | -45,0   |
| 2,7 do 3,4                  | -70,0   | -36,0   |
| 3,4 do 3,8                  | -80,0   | -40,0   |
| 3,8 do 4,2                  | -70,0   | -30,0   |
| 4,2 do 4,8                  | -41,3 (do 31.12.2010 r.)                      | 0,0 (do 31.12.2010 r.)                            |
|                             | -70,0 (po 31.12.2010 r.)                      | -30,0 (po 31.12.2010 r.)                          |
| 4,8 do 6,0                  | -70,0   | -30,0   |
| 6,0 do 8,5                  | -41,3   | 0,0   |
| 8,5 do 10,6                 | -65,0   | -25,0   |
| Powyżej 10,6                | -85,0   | -45,0   |

Uwagi do tab. 3:

Eksplatacja urządzeń wykorzystujących technikę UWB może być dopuszczana z innymi ograniczeniami mocy, niż wymienione w tab. 3, pod warunkiem, że stosowane będą dodatkowe techniki ograniczania zakłóceń określone w odpowiednich zharmonizowanych normach przyjętych na mocy dyrektywy 1999/5/WE lub inne odpowiednie techniki ograniczania zakłóceń, pod warunkiem że gwarantują one poziom ochrony przed zakłóceniami co najmniej równoważny poziomom ograniczenia określonym w tabeli:

- W zakresach częstotliwości od 3,1 GHz do 4,8 GHz dopuszcza się maksymalną średnią gęstość e.i.r.p. wynoszącą - 41,3 dBm/MHz oraz maksymalną szczytową gęstość e.i.r.p. wynoszącą 0 dBm mierzoną dla pasma 50 MHz, pod warunkiem zastosowania ograniczenia aktywności nadajnika (techniki LDC), dzięki któremu łączny czas nadawania nie przekracza 5 % w każdym przedziale jednosekundowym ani 0,5 % w każdym przedziale jednogodzinnym, a czas pojedynczej transmisji nie przekracza 5 milisekund,
- W zakresach częstotliwości od 3,1 GHz do 4,8 GHz oraz od 8,5 do 9,0 GHz dopuszcza się maksymalną średnią gęstość e.i.r.p. wynoszącą - 41,3 dBm/MHz oraz maksymalną szczytową gęstość e.i.r.p. wynoszącą 0 dBm mierzoną dla pasma 50 MHz, pod warunkiem zastosowania techniki unikania zakłóceń DAA, określonej w odpowiedniej normie zharmonizowanej (np.[8]).



Oprócz danych przedstawionych w tab. 3 w decyzji [6] określono maksymalne średnie gęstości mocy dla techniki UWB stosowanej w pojazdach drogowych i szynowych w UE (tab. 4) a także podczas analizy materiałów budowlanych (tab.5)

Tab. 4. Ograniczenia e.i.r.p. dla urządzeń UWB stosowanych w pojazdach drogowych i szynowych w UE [6]

| Zakres częstotliwości [GHz] | Ograniczenie czasowe | Maksymalna średnia gęstość e.i.r.p. (dBm/MHz) |
|-----------------------------|----------------------|---|
| 4,2 do 4,8                  | do 31.12.2010 r.     | -41,3*<br>-53,3**                             |
|                             | po 31.12.2010 r.     | -70,0   |
| 6,0 do 8,5                  |                      | -41,3*<br>-53,3**                             |

\* pod warunkiem, że stosowane są techniki ograniczania zagregowanych zakłóceń, które zapewniają co najmniej równoważne działanie w stosunku do technik opisanych w zharmonizowanych normach przyjętych zgodnie z dyrektywą 1999/5/WE. Wymaga to stosowania techniki kontroli mocy nadajnika (TPC) w zakresie minimum 12 dB.

\*\* w innych przypadkach.

Uwagi do tab. 4:

Eksploatacja urządzeń wykorzystujących technikę UWB w motoryzacji i pojazdach szynowych powinna być również dopuszczana z innymi ograniczeniami mocy, niż wymienione w tab. 3 lub 4, pod warunkiem, że stosowane będą dodatkowe techniki ograniczania zakłóceń określone w odpowiednich zharmonizowanych normach przyjętych na mocy dyrektywy 1999/5/WE lub inne odpowiednie techniki ograniczania zakłóceń, gwarantujące poziom ochrony przed zakłóceniami co najmniej równoważny poziomowi zapewnianemu przez limity określone w tabelach 3 i 4. Może to być:

- Ograniczenie aktywności nadajnika (LDC) w zakresach częstotliwości od 3,1 GHz do 4,8 GHz powinno być takie jak w uwadze a) do tab. 3, z tymi samymi limitami. W innych zakresach częstotliwości ograniczenia mają być takie same jak w tab. 3.,
- W przypadku stosowania techniki unikania zakłóceń DAA w zakresach częstotliwości od 3,1 GHz do 4,8 GHz i od 8,5 do 9,0 GHz dopuszcza się ograniczenie e.i.r.p. do -41,3 dBm/MHz pod warunkiem, że stosowane techniki ograniczania zakłóceń zapewniają co najmniej równoważne działanie w stosunku do technik opisanych w zharmonizowanych normach przyjętych zgodnie z dyrektywą 1999/5/WE. Wymaga to stosowania techniki kontroli mocy nadajnika (TPC) w zakresie minimum 12 dB. W innym przypadku należy stosować ograniczenie e.i.r.p. na poziomie -53,3 dBm/MHz.

Tab. 5. Ograniczenia maksymalnej e.i.r.p. urządzeń UWB stosowanych w UE do analiz materiałów budowlanych [6]

| Zakres częstotliwości [MHz] | Maksymalna średnia gęstość e.i.r.p. (dBm/MHz) | Maksymalna szczytowa gęstość e.i.r.p. (dBm/50MHz) |
|-----------------------------|---|---|
| Poniżej 1 730               | -85,0   | -45,0   |
| 1 730 do 2 200              | -65,0   | -25,0   |
| 2 200 do 2 500              | -50,0   | -10,0   |

|                |       |       |
|----------------|-------|-------|
| 2 500 do 2 690 | -65,0 | -25,0 |
| 2 690 do 2 700 | -55,0 | -15,0 |
| 2 700 do 3 400 | -82,0 | -42,0 |
| 3 400 do 4 800 | -50,0 | -10,0 |
| 4 800 do 5 000 | -55,0 | -15,0 |
| 5 000 do 8 000 | -50,0 | -10,0 |
| 8 000 do 8 500 | -70,0 | -30,0 |
| Powyżej 8 500  | -85,0 | -45,0 |

Uwagi do tab. 5:

- a) Urządzenia UWB stosowane do analiz materiałów budowlanych wykorzystujące techniki ograniczania zakłóceń zapewniające co najmniej równoważne działanie w stosunku do technik opisanych w zharmonizowanych normach przyjętych zgodnie z dyrektywą 1999/5/WE dopuszczone są do działania w zakresach częstotliwości od 1,215 do 1,73 GHz z maksymalną średnią gęstością  $-70$  dBm/MHz oraz w zakresach częstotliwości od 2,5 GHz do 2,69 GHz i od 2,7 GHz do 3,4 GHz przy maksymalnej średniej gęstości e.i.r.p. wynoszącej  $-50$  dBm/MHz, pod warunkiem że zachowany jest poziom ochrony co najmniej równoważny poziomowi zapewnianemu przez ograniczenia określone w tabeli 5,
- b) W celu zapewnienia ochrony służb radioastronomicznych, w zakresach częstotliwości od 2,69 GHz do 2,70 GHz oraz od 4,8 do 5,0 GHz, gęstość całkowitej mocy promieniowania powinna być niższa od  $-65$  dBm/MHz, odpowiednio do zharmonizowanych norm przyjętych na mocy dyrektywy 1999/5/WE.

Zlecenie 5 udzielone CEPT przez Komisję Europejską zaowocowało powstaniem sprawozdania [7], w którym m.in. wymienione zostały dotychczasowe opracowania CEPT ECC i normy sporządzone przez ETSI dotyczące aplikacji wykorzystujących technikę UWB oraz sprecyzowano warunki techniczne, w ramach których poszczególne techniki ograniczania zakłóceń umożliwiają uzyskanie wyższych mocy nadawania przez urządzenia wykorzystujące technikę UWB, zapewniając jednocześnie ochronę równoważną ochronie, jaką zapewniają istniejące ograniczenia dotyczące ogólnego wykorzystywania techniki UWB, wykorzystywania UWB w pojazdach samochodowych i szynowych oraz w urządzeniach do śledzenia lokalizacji. W sprawozdaniu tym ponadto uszczegółowiono parametry techniczne urządzeń UWB zgodnie z definicją zawartą w znowelizowanej decyzji ECC [3], dokonano rozróżnienia pomiędzy parametrami urządzeń UWB niezbędnymi do włączenia ich do kolejnej nowelizacji decyzji Komisji [1] a technicznymi parametrami, które zostaną wzięte pod uwagę przy opracowywaniu zharmonizowanych norm europejskich. W sposób bardziej szczegółowy określono relacje

między ograniczeniami dotyczącymi maksymalnej e.i.r.p. w odniesieniu do wymaganych technik ograniczania zakłóceń dla konkretnych zastosowań a także zawarto propozycje dotyczące harmonizacji urządzeń UWB na pokładach samolotów. Wykaz opracowań CEPT oraz norm ETSI w aspekcie różnych zastosowań techniki UWB zaczerpnięty ze sprawozdania [7] przedstawia tabela 6.

Tab. 6. Opracowania CEPT ECC i normy sporządzone przez ETSI dotyczące aplikacji wykorzystujących technikę UWB

| Dokument CEPT  | Aplikacje UWB   | Technika ograniczająca zakłócenia   | Norma ETSI                             |
|--|---|---|--|
| Decyzje<br>ECC/DEC/(06)04 i<br>ECC/DEC/(06)12 były<br>włączone w część<br>przeglądu ogólnych<br>regulacji dotyczących<br>UWB skutkujących<br>zmienioną decyzją<br>ECC/DEC/(06)04 | Łączność, pomiary,<br>obrazowanie, nadzór i<br>systemy medyczne   | DAA, LDC, TPC   | EN 302 065-1 [11]                      |
|  | Śledzenie lokalizacji w<br>zakresie 6 do 9 GHz (tzw.<br>Typ LT1)  | DAA   | EN 302 065-2 [12]                      |
|  | Aplikacje dotyczące<br>pojazdów naziemnych<br>(motoryzacyjne)   | DAA, LDC, specyficzne<br>TPC<br>Zewnętrzne ograniczenie<br>może być interpretowane<br>jako rodzaj redukcji  | EN 302 065-3 [8]                       |
| ECC/REC/(11)09 LT2<br>[13]   | Aplikacje Śledzenia<br>lokalizacji Typu 2, w tym<br>stałe zewnętrzne<br>aplikacje używające<br>techniki UWB | DC (duty cycle), DAA<br>(pomiędzy 3,1 a 3,4 GHz),<br>również implementacja<br>mechanizmów regulacyjno-<br>koordynacyjnych   | EN 302 065-2                           |
| ECC/REC/(11)10 LAES<br>[14]  | Aplikacje Śledzenia<br>lokalizacji w służbach<br>ratowniczych   | DC (duty cycle), DAA<br>(pomiędzy 3,1 a 3,4 GHz),<br>również implementacja<br>mechanizmów regulacyjno-<br>koordynacyjnych dla<br>centrów treningowych.<br>Ograniczone wykorzystanie<br>przez służby ratownicze<br>dopuszcza wyższe limity<br>emisyjne | EN 302 065-2                           |
| Decyzja ECC/DEC/(12)<br>03 [15] dotycząca  | Łączna radiowa UWB do<br>samolotowej łączności  | Redukcja limitu emisji  | Brak prac ETSI w<br>kierunku tego typu |

| <b>Dokument CEPT</b>   | <b>Aplikacje UWB</b>  | <b>Technika ograniczająca zakłócenia</b>  | <b>Norma ETSI</b>  |
|--|---|---|--|
| urządzeń UWB na pokładach samolotów w zakresie 6 do 8,5 GHz  | wewnętrznej (na pokładach samolotów)  | Alternatywne techniki redukcji zakłóceń zapewniają odpowiednią ochronę poprzez użycie ekranowanych iluminatorów   | norm, choć można wykorzystywać specyfikacje ETSI TS 102 883 [16] i ETSI TR 102 834 [17] <sup>3</sup>   |
| Sprawozdanie ECC 175 [18] – badania koegzystencji aplikacji UWB wewnątrz samolotu i istniejących służb radiowych w zakresach 3,1 do 4,8 i 6,0 do 8,5 GHz | Wszystkie samoloty krótkiego zasięgu (np. A320, B737) jak również dalekiego zasięgu (np. A330/340/350, A380, B747, B777 lub B787) | Redukcja limitu emisji<br>Sprawozdanie z badań rozważa dwa urządzenia UWB nadające równocześnie i pracujące na tej samej (500 MHz) częstotliwości na pokładzie samolotu. Dodatkowo Sprawozdanie ECC 175 nie obejmuje technik redukcji | Brak prac ETSI w kierunku tego typu norm, choć można wykorzystywać specyfikacje ETSI TS 102 883 i ETSI TR 102 834. Precyzyjne implementacje są specyficzne dla każdego typu samolotu |
| Sprawozdanie ECC 170 [19] dotyczące specyficznych aplikacji UWB w zakresach 3,4 do 4,8 GHz i 6,0 do 8,5 GHz (LAES, LT2 i LTA)                            | Zastosowania motoryzacyjne, LT2 i LAES  | Zastosowania motoryzacyjne z nowymi opcjami LDC i koncepcja zewnętrznych limitów. Nie stosuje się dla wszystkich opisanych aplikacji tzn. nie każda opcja LDC pracuje ze wszystkimi aplikacjami UWB                                   | EN 302 065-2 dla LT2 i LAES<br>EN 302 065-3 dla LTA  |
| Sprawozdanie ECC 167 [20] dotyczące praktycznej implementacji mechanizmu rejestracji/koordynacji dla systemów UWB LT2                                    | LT2   | Opisuje wymagania rejestracji/koordynacji celem zapewnienia kompatybilności z wymogami zapewnienia ochrony służb pierwszej ważności   | EN 302 065-2   |

<sup>3</sup> W sprawozdaniu [7] podana jest błędnie specyfikacja ETSI TS 103 360, której brak w wykazie technicznych specyfikacji ETSI

| Dokument CEPT  | Aplikacje UWB  | Technika ograniczająca zakłócenia   | Norma ETSI  |
|--|--|---|---|
| <p>Sprawozdanie ECC 139 [21]</p> <p>Zderzenie systemów LPR używających techniki UWB ze służbami radiokomunikacyjnymi</p> | <p>Radary Próbujące Poziom (LPR) są aplikacją radiolokacyjną skierowaną do szerokich zastosowań przemysłowych.</p> <p>LPR używają techniki UWB.</p> <p>TLPR (radary próbujące poziom płynu w zbiornikach) i LPR objęte są Decyzją Komisji Europejskiej o systemach krótkodystansowych SRD. Proponuje się umieścić wszystkie aplikacje radiolokacyjne w jednym miejscu.</p> | <p>Restrykcje w użytkowaniu tych instalacji, zarówno technika TPC jak i określone ukierunkowanie anten i wymagania na aperturę anteny są zawarte w europejskiej normie zharmonizowanej.</p> <p>Uwaga: trzy z czterech zakresów częstotliwości, w których działają LPR są umieszczone powyżej 10,6 GHz</p> | <p>EN 302 729 [22] dla LPR</p> <p>Ochrona miejsc lokalizacji służby radioastronomicznej zawarta jest w normie zharmonizowanej</p> |

Na bazie sprawozdania [7] oraz poprzednich sprawozdań CEPT Komisja Europejska opracowała decyzję wykonawczą 2014/702/UE, która zmieniła dotychczasową decyzję 2007/131/WE. Decyzja ta ma służyć „harmonizacji warunków technicznych dla urządzeń radiowych wykorzystujących technikę ultraszerokopasmową w Unii. Decyzja zapewnia dostępność widma radiowego na zharmonizowanych warunkach w całej Unii, eliminuje przeszkody w upowszechnianiu techniki UWB oraz tworzy faktyczny jednolity rynek systemów UWB przynoszący konsumentom znaczne korzyści skali i inne korzyści” [23].

W ramach tej decyzji zmieniono m.in. niektóre definicje dotyczące widmowej gęstości mocy oraz określono zmienione (oraz nowe) wymagania techniczne dla zastosowań techniki UWB. Nowe definicje zastępczej mocy promieniowanej e.i.r.p. przedstawiają się teraz następująco:

- „e.i.r.p.” oznacza zastępczą moc promieniowaną izotropowo, która jest iloczynem mocy doprowadzonej do anteny oraz zysku anteny na danym kierunku odniesionym do anteny izotropowej (zysk bezwzględny lub izotropowy);
- „maksymalna średnia widmowa gęstość mocy”, wyrażona jako e.i.r.p. testowanego urządzenia pracującego na określonej częstotliwości, jest średnią mocą odniesioną do

jednostkowej szerokości pasma (wyśrodkowaną wokół tej częstotliwości) wypromieniowywaną na kierunku jej maksymalnej wartości w określonych warunkach pomiarowych;

- „moc szczytowa”, wyrażona jako e.i.r.p., zawarta wewnątrz pasma o szerokości 50 MHz o częstotliwości środkowej odpowiadającej częstotliwości, dla której osiągnięta jest najwyższa średnia moc promieniowania, wypromieniowywana na kierunku jej maksymalnej wartości w określonych warunkach pomiarowych;
- „widmowa gęstość całkowitej mocy promieniowania” oznacza średnią średnich wartości gęstości mocy mierzonych na otaczającej sferze w scenariuszu pomiarów z rozdzielczością co najmniej 15 stopni. Szczegółowy układ pomiarowy zawiera norma ETSI EN 302 435.

W ramach tej decyzji KE określono również, warunki, na jakich państwa członkowskie mogą wykorzystywać urządzenia UWB; stwierdzono tam mianowicie, że: „Państwa członkowskie powinny zezwalać na wykorzystanie widma radiowego, na zasadzie niepowodowania zakłóceń oraz braku ochrony przed zakłóceniami, przez urządzenia wykorzystujące technikę UWB, pod warunkiem że urządzenia takie spełniają warunki określone w załączniku i są stosowane wewnątrz pomieszczeń albo, w przypadku eksploatacji na zewnątrz pomieszczeń, o ile urządzenia te nie są połączone ze stałą instalacją, stałą infrastrukturą bądź stałą anteną zewnętrzną. Urządzenia wykorzystujące technikę UWB, które spełniają warunki określone w załączniku, powinny być dozwolone również w pojazdach drogowych i szynowych.”

Ogólne warunki techniczne wykorzystywania urządzeń UWB przedstawione są w załączniku do decyzji [11]. Ilustruje je tab. 7.

Tab. 7. Wymagania techniczne dla ogólnych zastosowań UWB

| Zakres częstotliwości [GHz] | Maksymalna średnia widmowa gęstość e.i.r.p. (dBm/MHz) | Maksymalna szczytowa gęstość e.i.r.p. (dBm/50MHz) |
|-----------------------------|---|---|
| Poniżej 1,6                 | -90,0   | -50,0   |
| 1,6 do 2,7                  | -85,0   | -45,0   |
| 2,7 do 3,1                  | -70,0   | -36,0   |

| Zakres częstotliwości [GHz] | Maksymalna średnia widmowa gęstość e.i.r.p. (dBm/MHz) | Maksymalna szczytowa gęstość e.i.r.p. (dBm/50MHz) |
|-----------------------------|---|---|
| 3,1 do 3,4                  | -70,0<br>lub<br>-41,3 stosując LDC* lub DAA**         | -36,0<br>lub<br>0                                 |
| 3,4 do 3,8                  | -80,0<br>lub<br>-41,3 stosując LDC* lub DAA**         | -40,0<br>lub<br>0                                 |
| 3,8 do 4,8                  | -70,0<br>lub<br>-41,3 stosując LDC* lub DAA**         | -30,0<br>lub<br>0                                 |
| 4,8 do 6,0                  | -70,0   | -30,0   |
| 6,0 do 8,5                  | -41,3   | 0,0   |
| 8,5 do 9,0                  | -65,0<br>lub<br>-41,3 stosując DAA**                  | -25,0<br>lub<br>0                                 |
| 9 do 10,6                   | -65,0   | -25,0   |
| Powyżej 10,6                | -85,0   | -45,0   |

\* W zakresie częstotliwości od 3,1 GHz do 4,8 GHz. Technika redukcji zakłóceń LDC i jej wartości graniczne zostały zdefiniowane w normie ETSI EN 302 065-1.

\*\* W zakresie częstotliwości od 3,1 GHz do 4,8 GHz oraz od 8,5 GHz do 9 GHz. Technika redukcji zakłóceń DAA i jej wartości graniczne zostały zdefiniowane w normie ETSI EN 302 065-2.

Analizując dane zawarte w powyższej tabeli należy zwrócić uwagę na to, że wartości w niej zawarte nie różnią się od wartości określonych przez CEPT w decyzji [6] (por. tab. 3).

Oprócz powyższych ogólnych warunków technicznych wykorzystywania urządzeń UWB omawiana decyzja Komisji Europejskiej podaje wymagania techniczne dla specyficznych zastosowań UWB, czyli dla systemów śledzenia lokalizacji, urządzeń instalowanych w pojazdach drogowych i szynowych lub na pokładach statków powietrznych, czujników do wykrywania materiałów oraz urządzeń do analizy materiałów budowlanych. Wymagania te przedstawione są w tabelach 8 -12.

Tab. 8. Wymagania techniczne dla systemów śledzenia lokalizacji typu 1 (LT1)

| Zakres częstotliwości [GHz] | Maksymalna średnia widmowa gęstość e.i.r.p. (dBm/MHz) | Maksymalna moc szczytowa e.i.r.p. (dBm/50MHz) |
|-----------------------------|---|---|
|-----------------------------|---|---|

|              |                                     |                   |
|--------------|-------------------------------------|-------------------|
| Poniżej 1,6  | -90,0                               | -50,0             |
| 1,6 do 2,7   | -85,0                               | -45,0             |
| 2,7 do 3,4   | -70,0                               | -36,0             |
| 3,4 do 3,8   | -80,0                               | -40,0             |
| 3,8 do 6,0   | -70,0                               | -30,0             |
| 6,0 do 8,5   | -41,3                               | 0,0               |
| 8,5 do 9,0   | -65,0<br>lub<br>-41,3 stosując DAA* | -25,0<br>lub<br>0 |
| 9 do 10,6    | -65,0                               | -25,0             |
| Powyżej 10,6 | -85,0                               | -45,0             |

\* W zakresie częstotliwości od 3,1 GHz do 4,8 GHz oraz od 8,5 GHz do 9 GHz. Technika redukcji zakłóceń DAA i jej wartości graniczne zostały zdefiniowane w normie ETSI EN 302 065-2.



Tab. 9. Wymagania techniczne dla urządzeń instalowanych w pojazdach drogowych i szynowych

| Zakres częstotliwości [GHz] | Maksymalna średnia widmowa gęstość e.i.r.p. (dBm/MHz)   | Maksymalna moc szczytowa e.i.r.p. (dBm/50MHz) |
|-----------------------------|---|---|
| Poniżej 1,6                 | -90,0   | -50,0   |
| 1,6 do 2,7                  | -85,0   | -45,0   |
| 2,7 do 3,1                  | -70,0   | -36,0   |
| 3,1 do 3,4                  | -70,0<br>lub<br>-41,3 stosując LDC* + OZ****<br>lub<br>-41,3 stosując TPC*** + DAA** + OZ**** | -36,0<br>lub<br>0<br>lub<br>0                 |
| 3,4 do 3,8                  | -80,0<br>lub<br>-41,3 stosując LDC* + OZ****<br>lub<br>-41,3 stosując TPC*** + DAA** + OZ**** | -40,0<br>lub<br>0<br>lub<br>0                 |
| 3,8 do 4,8                  | -70,0<br>lub<br>-41,3 stosując LDC* + OZ****<br>lub<br>-41,3 stosując TPC*** + DAA** + OZ**** | -30,0<br>lub<br>0<br>lub<br>0                 |
| 4,8 do 6,0                  | -70,0   | -30,0   |
| 6,0 do 8,5                  | -53,3<br>lub<br>-41,3 stosując LDC* + OZ****<br>lub<br>-41,3 stosując TPC*** + OZ****         | -13,3<br>lub<br>0<br>lub<br>0                 |
| 8,5 do 9,0                  | -65,0<br>lub<br>-41,3 stosując TPC*** + DAA** + OZ****  | -25,0<br>lub<br>0                             |
| 9 do 10,6                   | -65,0   | -25,0   |

| <b>Zakres częstotliwości [GHz]</b> | <b>Maksymalna średnia widmowa<br/>gęstość e.i.r.p. (dBm/MHz)</b> | <b>Maksymalna moc szczytowa<br/>e.i.r.p. (dBm/50MHz)</b> |
|------------------------------------|--|--|
| Powyżej 10,6                       | –85,0  | –45,0  |

- \* Technika redukcji zakłóceń LDC i jej wartości graniczne zostały zdefiniowane w normie ETSI EN 302 065-3.
- \*\* Technika redukcji zakłóceń DAA i jej wartości graniczne zostały zdefiniowane w normie ETSI EN 302 065-3.
- \*\*\* Technika redukcji zakłóceń TPC i jej wartości graniczne zostały zdefiniowane w normie ETSI EN 302 065-3.
- \*\*\*\* Wymagane jest ograniczenie zewnętrzne (OZ)  $\leq -53,3$  dBm/MHz. Ograniczenie zewnętrzne jest zdefiniowane w normie ETSI EN 302 065-3.

Tab. 10. Wymagania techniczne dla urządzeń instalowanych na pokładach statków powietrznych

| Zakres częstotliwości [GHz] | Maksymalna średnia widmowa gęstość e.i.r.p. (dBm/MHz) | Maksymalna moc szczytowa e.i.r.p. (dBm/50MHz) | Wymagania dotyczące technik ograniczania zakłóceń  |
|-----------------------------|---|---|--|
| Poniżej 1,6                 | -90,0   | -50,0   |  |
| 1,6 do 2,7                  | -85,0   | -45,0   |  |
| 2,7 do 3,4                  | -70,0   | -36,0   |  |
| 3,4 do 3,8                  | -80,0   | -40,0   |  |
| 3,8 do 6,0                  | -70,0   | -30,0   |  |
| 6,0 do 6,65                 | -41,3   | 0,0   |  |
| 6,65 do 6,6752              | -62,3   | -21,0   | przedział 21 dB powinien być wdrażany do osiągnięcia poziomu -62,3 dBm/MHz*                                    |
| 6,6752 do 8,5               | -41,3   | 0,0   | od 7,25 do 7,75 GHz (ochrona FSS oraz MetSat (od 7,45 do 7,55 GHz))*** od 7,75 do 7,9 GHz (ochrona MetSat)**** |
| 8,5 do 10,6                 | -65,0   | -25,0   |  |
| Powyżej 10,6                | -85,0   | -45,0   |  |

\* Rozwiązaniem mogą być alternatywne techniki osłabiania zakłóceń zapewniające równoważną ochronę, np. ekranowane iluminatory.

\*\* Ochrona: od 7,25 do 7,75 GHz (służba stała satelitarna) oraz od 7,45 do 7,55 GHz (służba meteorologiczna satelitarna):  $-51,3 - 20 \cdot \lg_{10}(10[\text{km}]/x[\text{km}])$  (dBm/MHz) w przypadku wysokości powyżej 1 000 m nad ziemią, gdzie x jest wysokością statku powietrznego nad ziemią w kilometrach, oraz -71,3 dBm/MHz w przypadku wysokości 1 000 m i poniżej.

\*\*\* Ochrona: od 7,75 do 7,9 GHz (służba meteorologiczna satelitarna):  $-44,3 - 20 \cdot \lg_{10}(10[\text{km}]/x[\text{km}])$  (dBm/MHz) w przypadku wysokości powyżej 1 000 m nad ziemią, gdzie x jest wysokością statku powietrznego nad ziemią w kilometrach, oraz -64,3 dBm/MHz w przypadku wysokości 1 000 m i poniżej.

Tab. 11. Wymagania techniczne dla czujników do wykrywania materiałów

| Zakres<br>częstotliwości<br>[GHz] | Stale instalacje   |   | Instalacje inne niż stałe<br>Maksymalna średnia<br>widmowa gęstość mocy<br>e.i.r.p. (dBm/MHz) |
|-----------------------------------|--|---|---|
|                                   | Maksymalna średnia<br>widmowa gęstość mocy<br>e.i.r.p. (dBm/MHz) | Maksymalna średnia<br>widmowa gęstość mocy<br>e.i.r.p. w płaszczyźnie<br>poziomej (-20° do 30°<br>nachylenia) (dBm/MHz) |   |
| Poniżej 1,73                      | -85,0  |   |   |
| 1,73 do 2,2                       | -65,0  | -70,0   |   |
| 2,2 do 2,5                        | -50,0  |   |   |
| 2,5 do 2,69                       | -65,0*   | -70,0   | -65,0*,**   |
| 2,69 do 2,7                       | -55,0  | -75,0   | -70,0***  |
| 2,7 do 2,9                        | -50,0  | -70,0   | -70,0   |
| 2,9 do 3,4                        | -50,0  | -70,0   | -70,0*  |
| 3,4 do 3,8                        | -50,0  | -70,0   | -50,0**,***   |
| 3,8 do 4,8                        | -50,0  |   |   |
| 4,8 do 5,0                        | -55,0  | -75,0   | -55,0**,***   |
| 5,0 do 5,25                       | -50,0  |   |   |
| 5,25 do 5,35                      | -50,0  | -60,0   |   |
| 5,35 do 5,6                       | -50,0  |   |   |
| 5,6 do 5,65                       | -50,0  | -65,0   |   |
| 5,65 do 5,725                     | -50,0  | -60,0   |   |
| 5,725 do 8,5                      | -50,0  |   |   |
| 8,5 do 10,6                       | -65,0  |   |   |
| Powyżej 10,6                      | -85,0  |   |   |

Uwagi do tab. 11:

- Emisje z czujników do wykrywania materiałów dozwolone na mocy niniejszej decyzji są utrzymywane na minimalnym poziomie i w żadnym przypadku nie mogą przekroczyć wartości granicznych gęstości e.i.r.p. wskazanych w tabeli 11. W przypadku instalacji innych niż stałe, zgodność z wartościami granicznymi wskazanymi w powyższej tabeli należy zapewnić przy użyciu urządzenia na reprezentatywnej strukturze analizowanego materiału (np. reprezentatywnej ścianie zgodnie z definicją w ETSI EN 302 435-1 [24] lub ETSI EN 302 498-1 [25]),

- b) Moc szczytowa (w dBm) mierzona w paśmie o szerokości 50 MHz nie powinna przekraczać wartości granicznej uzyskanej w wyniku dodania współczynnika konwersji (25 dB) do wartości granicznej „maksymalnej średniej widmowej gęstości mocy” (w dBm/MHz),
- c) \* Urządzenia wykorzystujące mechanizm „Listen Before Talk” (LBT) określone w zharmonizowanej normie EN 302 498-2 mogą być eksploatowane w zakresach częstotliwości od 2,5 do 2,69 i od 2,9 do 3,4 GHz przy maksymalnej średniej widmowej gęstości mocy wynoszącej -50 dBm/MHz
- \*\* W celu ochrony służb radiowych instalacje inne niż stałe muszą spełniać następujący wymóg dotyczący widmowej gęstości całkowitej mocy promieniowania:
- 1) w zakresach częstotliwości od 2,5 do 2,69 GHz oraz od 4,8 do 5 GHz widmowa gęstość całkowitej mocy promieniowania musi być o 10 dB niższa od maksymalnej średniej widmowej gęstości mocy;
- 2) w zakresie częstotliwości od 3,4 do 3,8 GHz widmowa gęstość całkowitej mocy promieniowania musi być o 5 dB niższa od maksymalnej średniej widmowej gęstości mocy.
- \*\*\* Ograniczenie aktywności nadawania do 10 % w ciągu sekundy.

Tab. 12. Wymagania techniczne dla urządzeń do analizy materiałów budowlanych

| Zakres częstotliwości [GHz] | Maksymalna średnia widmowa gęstość mocy e.i.r.p. (dBm/MHz) | Maksymalna moc szczytowa e.i.r.p. (dBm/50MHz) |
|-----------------------------|--|---|
| Poniżej 1,73                | -85,0*   | -45,0   |
| 1,73 do 2,20                | -65,0  | -25,0   |
| 2,20 do 2,50                | -50,0  | -10,0   |
| 2,50 do 2,69                | -65,0*   | -25,0   |
| 2,69 do 2,70                | -55,0**  | -15,0   |
| 2,70 do 3,40                | -70,0*   | -30,0   |
| 3,40 do 4,80                | -50,0  | -10,0   |
| 4,80 do 5,00                | -55,0**  | -15,0   |
| 5,00 do 8,50                | -50,0  | -10,0   |
| Powyżej 8,50                | -85,0  | -45,0   |

\* Urządzenia wykorzystujące mechanizm „Listen Before Talk” (LBT) określony w zharmonizowanej normie EN 302 435-1 mogą być eksploatowane w zakresie częstotliwości od 1,215 do 1,73 GHz przy maksymalnej średniej widmowej gęstości mocy wynoszącej -70 dBm/MHz i w zakresach częstotliwości od 2,5 do 2,69 i od 2,7 do 3,4 GHz przy maksymalnej średniej widmowej gęstości mocy wynoszącej -50 dBm/MHz.

\*\* W celu zapewnienia ochrony pasm częstotliwości wykorzystywanych przez służbę radioastronomiczną (RAS), tj. od 2,69 do 2,7 GHz oraz od 4,8 do 5 GHz, widmowa gęstość całkowitej mocy promieniowania musi być poniżej -65 dBm/MHz.

Należy podkreślić, że opracowując warunki techniczne wykorzystania urządzeń UWB Unia Europejska nie określiła zakresów częstotliwości, w których one mogą być eksploatowane. Wymagania techniczne określone są w szczegółowo określonych podzakresach częstotliwości zawartych pomiędzy 1,6 a 10,6 GHz i enigmatycznie poniżej 1,6 GHz i powyżej 10,6 GHz. Natomiast CEPT ECC w swoim Sprawozdaniu ERC 25 (Europejskiej Tablicy Przeznaczeń

Częstotliwości, ECA) [26] podał zakresy częstotliwości, w których mogą być lokowane urządzenia UWB. Są to następujące zakresy:

- 3100 – 4800 MHz (urządzenia LT2 i LAES) w podzakresach:
  - 3100 – 3300 MHz,
  - 3300 – 3400 MHz,
  - 3400 – 3600 MHz,
  - 3600 – 4200 MHz,
  - 4200 – 4400 MHz,
  - 4400 – 4500 MHz,
  - 4500 – 4800 MHz.
- 5925 – 8500 MHz (ogólne urządzenia UWB oraz urządzenia na pokładach samolotów) w podzakresach:
  - 5925 – 6700 MHz,
  - 6700 – 7075 MHz,
  - 7075 – 7145 MHz,
  - 7145 – 7190 MHz,
  - 7190 – 7235 MHz,
  - 7235 – 7250 MHz,
  - 7250 – 7300 MHz,
  - 7300 – 7375 MHz,
  - 7375 – 7450 MHz,
  - 7450 – 7550 MHz,
  - 7550 – 7750 MHz,
  - 7750 – 7900 MHz,
  - 7900 – 8025 MHz,
  - 8025 – 8175 MHz,
  - 8175 – 8215 MHz,
  - 8215 – 8400 MHz,
  - 8400 – 8500 MHz.
- 8500 – 9000 MHz (ogólne urządzenia UWB) w podzakresach:

- 8500 – 8550 MHz,
- 8550 – 8650 MHz,
- 8650 – 8750 MHz,
- 8750 – 8850 MHz,
- 8850 – 9000 MHz.

Niestety w polskiej Krajowej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości brak jest wyszczególnionych zastosowań w określonych tam zakresach częstotliwości (uwzględnione są tylko przeznaczenia rządowe bądź cywilne). Brak jest więc źródła informacji o szczegółowych zastosowaniach urządzeń UWB w poszczególnych zakresach w Polsce. Natomiast w Rozporządzeniu Ministra Administracji i Cyfryzacji w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego [27] istnieje tylko jedna wzmianka o tym, że „Pasma częstotliwości 24 GHz może być wykorzystane przez ultraszerokopasmowe samochodowe radary bliskiego zasięgu o maksymalnej średniej gęstości mocy wynoszącej -41,3 dBm/MHz e.i.r.p. i wartości szczytowej gęstości mocy o wartości 0 dBm/50 MHz e.i.r.p., z wyłączeniem częstotliwości poniżej 22 GHz, gdzie maksymalną średnią gęstość mocy ogranicza się do -61,3 dBm/MHz e.i.r.p.”.

Widać więc, że w polskich dokumentach regulacyjnych brak jest jakiegokolwiek informacji o warunkach stosowania techniki UWB w Polsce, na częstotliwościach poniżej 10,6 GHz. Dostępne są natomiast urządzenia spełniające wymagania europejskie, które mogłyby zostać stosowane w Polsce.

### **Literatura do Rozdziału 3:**

- [1] Komisja Europejska; Decyzja Komisji z dnia 21 lutego 2007 r. w sprawie udostępnienia w sposób zharmonizowany widma radiowego na potrzeby urządzeń wykorzystujących technologię ultraszerokopasmową na terytorium Wspólnoty (2007/131/WE), Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, 23.2.2007,
- [2] CEPT ECC, The Protection Requirements of Radiocommunications Systems below 10.6 GHz from Generic UWB Applications, ECC Report 64, Helsinki February 2005,
- [3] CEPT ECC, ECC Decision of 24 March 2006 on the harmonised conditions for devices using Ultra-Wideband (UWB) technology in bands below 10.6 GHz, (ECC/DEC/(06)04),
- [4] CEPT ECC, ECC Decision of 1 December 2006 on the harmonised conditions for devices using Ultra-Wideband (UWB) technology with Low Duty Cycle (LDC) in the frequency band 3.4 – 4.8 GHz, (ECC/DEC/(06)12),

- [5] CEPT, CEPT Report 017, Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to: identify the conditions relating to the harmonised introduction in the European Union of radio applications based on ultra-wideband (UWB) technology, Complementary report, Report approved on 30 March 2007 by the ECC,
- [6] Komisja Europejska, Decyzja Komisji z dnia 21 kwietnia 2009 r. zmieniająca decyzję Komisji 2007/131/WE w sprawie udostępnienia w sposób zharmonizowany widma radiowego na potrzeby urządzeń wykorzystujących technologię ultraszerokopasmową na terytorium Wspólnoty, 2009/343/WE, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej 25.4.2009,
- [7] CEPT, CEPT Report 45, Report from CEPT to the European Commission in response to the Fifth Mandate to CEPT on ultra-wideband technology to clarify the technical parameters in view of a potential update of Commission Decision 2007/131/EC, Report approved on 21 June 2013 by the ECC,
- [8] ETSI, Harmonised European Standard, Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU; Part 3: Requirements for UWB devices for ground based vehicular applications, ETSI EN 302 065-3 V2.1.1, 2016-11,
- [9] CEPT, CEPT Report 27, Report A from CEPT to European Commission in response to the Mandate 4 on Ultra-Wideband (UWB), Report approved on 13 March 2009 by the ECC,
- [10] CEPT, CEPT Report 34, Report B from CEPT to European Commission in response to the Mandate 4 on Ultra-Wideband (UWB), Final Report on 30 October 2009 by the ECC,
- [11] ETSI, Harmonised European Standard, Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU; Part 1: Requirements for Generic UWB applications, ETSI EN 302 065-1 V2.1.1, 2016-11,
- [12] ETSI, Harmonised European Standard, Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU; Part 2: Requirements for UWB location tracking, ETSI EN 302 065-2 V2.1.1, 2016-11,
- [13] CEPT ECC, UWB Location Tracking Systems TYPE 2 (LT2), ECC Recommendation (11)09, October 2011,



- [14] CEPT ECC, Location tracking application for emergency and disaster situations, ECC Recommendation (11)10, October 2011,
- [15] CEPT ECC, The harmonised conditions for UWB applications onboard aircraft, ECC Decision (12)03, 02 November 2012,
- [16] ETSI, Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices using Ultra Wide Band (UWB); Measurement Techniques, ETSI TS 102 883 V1.1.1, 2012-08,
- [17] ETSI, Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); System Reference Document; Technical characteristics for airborne Ultra-WideBand (UWB) applications operating in the frequency bands for 3,1 GHz to 4,8 GHz and 6 GHz to 8,5 GHz, ETSI TR 102 834 V1.1.1, 2009-05,
- [18] CEPT ECC, Co-existence study considering UWB applications inside aircraft and existing radio services in the frequency bands from 3.1 GHz to 4.8 GHz and from 6.0 GHz to 8.5 GHz, ECC Report 175, March 2012,
- [19] CEPT ECC, Specific UWB Applications in the Bands 3.4 - 4.8 GHz and 6 - 8.5 GHz Location Tracking Applications for Emergency Services (LAES), Location Tracking Applications Type 2 (LT2) and Location Tracking and Sensor Applications for Automotive and Transportation Environments (LTA), ECC Report 170, Tallinn, October, 2011,
- [20] CEPT ECC, The Practical Implementation of Registration/Coordination Mechanism for UWB LT2 (Location Tracking Type 2) Systems, ECC Report 167, Miesbach, May, 2011,
- [21] CEPT ECC, Impact of Level Probing Radars Using Ultra-Wideband Technology on Radiocommunications Services, ECC Report 139, Rottach-Egern, February 2010,
- [22] ETSI, Harmonised European Standard, Short Range Devices (SRD); Level Probing Radar (LPR) equipment operating in the frequency ranges 6 GHz to 8,5 GHz, 24,05 GHz to 26,5 GHz, 57 GHz to 64 GHz, 75 GHz to 85 GHz; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU, ETSI EN 302 729 V2.1.1, 2016-12,
- [23] Komisja Europejska, Decyzja wykonawcza Komisji z dnia 7 października 2014 r. zmieniająca decyzję 2007/131/WE w sprawie udostępnienia w sposób zharmonizowany widma radiowego na potrzeby urządzeń wykorzystujących technologię ultraszerokopasmową na terytorium Wspólnoty, 2014/702/WE, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej 9.10.2014,
- [24] ETSI, Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Technical characteristics for SRD equipment using Ultra Wide Band technology (UWB); Building Material Analysis and Classification equipment applications

operating in the frequency band from 2,2 GHz to 8,5 GHz; Part 1: Technical characteristics and test methods, ETSI EN 302 435-1 V1.3.1, 2009-12,

- [25] ETSI, Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Technical characteristics for SRD equipment using Ultra Wide Band technology (UWB); Object Discrimination and Characterization Applications for power tool devices operating in the frequency band from 2,2 GHz to 8,5 GHz; Part 1: Technical characteristics and test methods, ETSI EN 302 498-1 V1.1.1, 2010-06,
- [26] CEPT ECC, ERC Report 25, The European Table of Frequency Allocations and Applications in the Frequency Range 8.3 kHz to 3000 GHz (ECA TABLE), Approved June 2016,
- [27] Rozporządzenie Ministra Administracji I Cyfryzacji z dnia 12 grudnia 2014 r. w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego, Dz. U. RP, Warszawa, dnia 19 grudnia 2014 r., poz. 1843.

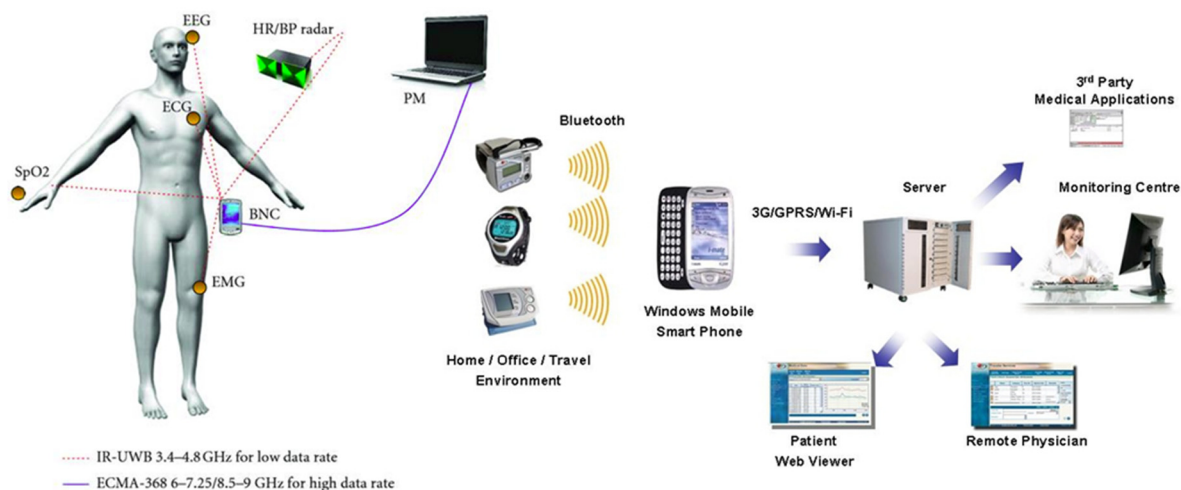
## 4 Pomiary kompatybilności transmisji UWB

Zgodnie z definicją FCC sygnał radiowy, którego zajmowane 10 dB pasmo jest większe od 20% częstotliwości środkowej, lub szerokość bezwzględna pasma jest większa od 500 MHz nazywamy sygnałem ultraszerokopasmowym. Ponieważ sposób wytwarzania samego sygnału ultraszerokopasmowego nie został określony, to powstało wiele technologii, które mieszczą się pod wspólną nazwą UWB. Można wyróżnić tu takie technologie jak np. impulsowe I-UWB (Impulse UWB) wysyłające bardzo krótkie impulsy, systemy rozpraszania bezpośredniego (Direct Sequence Spread Spectrum) DS-SS, czy wykorzystujące szerokie pasmo poprzez jego podział na kanały i realizowanie transmisji w kanałach o zmieniających się chwilowo pasmach (Frequency Hopping) FH-SS np. na wielu ortogonalnych podnośnych, co określane jest jako MC-UWB (Multicarrier UWB).

Urządzenia UWB mogą stanowić znaczną alternatywę dla obecnie stosowanych typowych rozwiązań takich jak Wi-Fi czy Bluetooth i być od nich bardziej niezawodne. Do niedawna, technologia UWB znana była z zastosowań w ograniczonym zakresie, np. w radarach i komunikacji wojskowej. Jednak w wyniku wprowadzenia przez FCC (Federal Communication Commission) oraz Komisję Europejskiej regulacji prawnych zezwalających na użycie techniki UWB w odpowiednich pasmach częstotliwości do celów komercyjnych pojawiło się duże zainteresowanie nie tylko środowisk naukowych, ale przede wszystkim producentów sprzętu elektronicznego przeznaczonego dla „zwykłych” użytkowników.

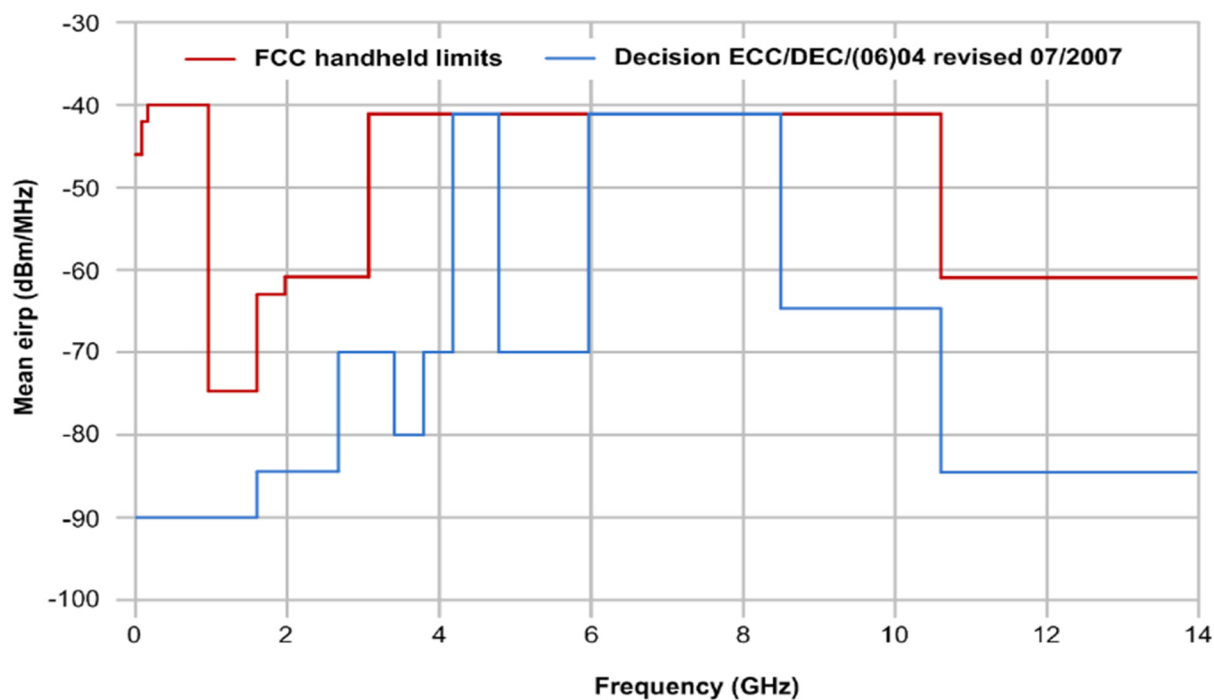
Ze względu na szerokość pasma systemów UWB zapewniający dużą odporność na skutki propagacji wielodrogowej, urządzenia UWB wzbudziły zainteresowanie nie tylko jako urządzenia do komunikacji na małe odległości, praktycznie do 10 m, ale także jako urządzenia lokalizacyjne i telemetryczne pozwalające np. na nadzór nad obiektami przemieszczającymi się w halach produkcyjnych, monitorowanie przemieszczania się osób wymagających stałego dozoru w szpitalach lub domach opieki, wykrywanie obiektów znajdujących się na małych głębokościach w ziemi, np. min.

Wielką nadzieję w środowiskach medycznych pokłada się urządzenia, które nie zagrażają ani już istniejącym urządzeniom medycznym ani osobom przebywającym w niewielkiej odległości ale nawet z urządzeniami wszczepionymi. Poniżej przedstawione ilustracje doskonale te nadzieje wyrażają.



Rys. 8 Zastosowania technologii UWB w środowisku medycznym

#### 4.1 Porównanie wymagań europejskich i amerykańskich UWB



Rys. 9 Dopuszczalny poziom emisji dla urządzeń UWB w USA i Europie

Poniżej przedstawiona została lista europejskich aktów normalizacyjnych dotyczących urządzeń UWB

| <b>Numer normy</b>           | <b>Tytuł normy</b>  |
|------------------------------|---|
| <a href="#">EN 302 372</a>   | Short Range Devices (SRD); Tank Level Probing Radar (TLPR) equipment operating in the frequency ranges 4,5 GHz to 7 GHz, 8,5 GHz to 10,6 GHz, 24,05 GHz to 27 GHz, 57 GHz to 64 GHz, 75 GHz to 85 GHz; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU |
| <a href="#">EN 302 729</a>   | Short Range Devices (SRD); Level Probing Radar (LPR) equipment operating in the frequency ranges 6 GHz to 8,5 GHz, 24,05 GHz to 26,5 GHz, 57 GHz to 64 GHz, 75 GHz to 85 GHz; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU                          |
| <a href="#">EN 302 065-1</a> | Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU; Part 1: Requirements for Generic UWB applications   |
| <a href="#">EN 302 065-2</a> | Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU; Part 2: Requirements for UWB location tracking  |
| <a href="#">EN 302 065-3</a> | Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU; Part 3: Requirements for UWB devices for ground based vehicular applications  |
| <a href="#">EN 302 065-4</a> | Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU; Part 4: Material Sensing devices using UWB technology below 10,6 GHz  |
| <a href="#">EN 303 883</a>   | Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band (UWB); Measurement Techniques   |
| <a href="#">TS 102 692</a>   | Ultra Wideband (UWB); RF conformance testing of radar level gauging applications in stillpipes TLPR   |
| <a href="#">TR 103 181-3</a> | Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band (UWB); Part 3: Worldwide UWB regulations between 3,1 and 10,6 GHz   |
| <a href="#">TR 103 416</a>   | System Reference document (SRdoc); Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band (UWB); Technical characteristics and spectrum requirements for UWB based vehicular access systems for operation in the 3,4 GHz to 4,8 GHz and 6 GHz to 8,5 GHz frequency ranges  |
| <a href="#">TS 103 366</a>   | Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Time Domain based Low Duty Cycle Measurement for UWB  |
| <a href="#">TS 103 361</a>   | Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Receiver technical requirements, parameters and measurement procedures to fulfil the requirements of the Directive 2014/53/EU   |
| <a href="#">TR 103 365</a>   | Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Time Domain Based Peak Power Measurement for UWB Devices  |
| <a href="#">TR 103 181-1</a> | Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band (UWB); Technical Report Part 1: UWB signal characteristics and overview CEPT/ECC and EC regulation  |
| <a href="#">EN 302 065-1</a> | Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB);   |

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <a href="#">EN 302 065-2</a> | Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive; Part 1: Requirements for Generic UWB applications<br>Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive; Part 2: Requirements for UWB location tracking<br>Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); |
| <a href="#">EN 302 065-3</a> | Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive; Part 3: Requirements for UWB devices for road and rail vehicles   |
| <a href="#">TR 103 181-2</a> | Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band (UWB); Transmission characteristics Part 2: UWB mitigation techniques  |
| <a href="#">TR 103 086</a>   | Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Conformance test procedure for the exterior limit tests in EN 302065-3 UWB applications in the ground based vehicle environment   |
| <a href="#">TS 102 754</a>   | Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Technical characteristics of Detect And Avoid (DAA) mitigation techniques for SRD equipment using Ultra Wideband (UWB) technology   |

Jak widać z załączonej listy wprowadzenie na rynek nowych urządzeń wykorzystujących UWB wymaga bardzo solidnego przygotowania od strony technicznej i normalizacyjnej.

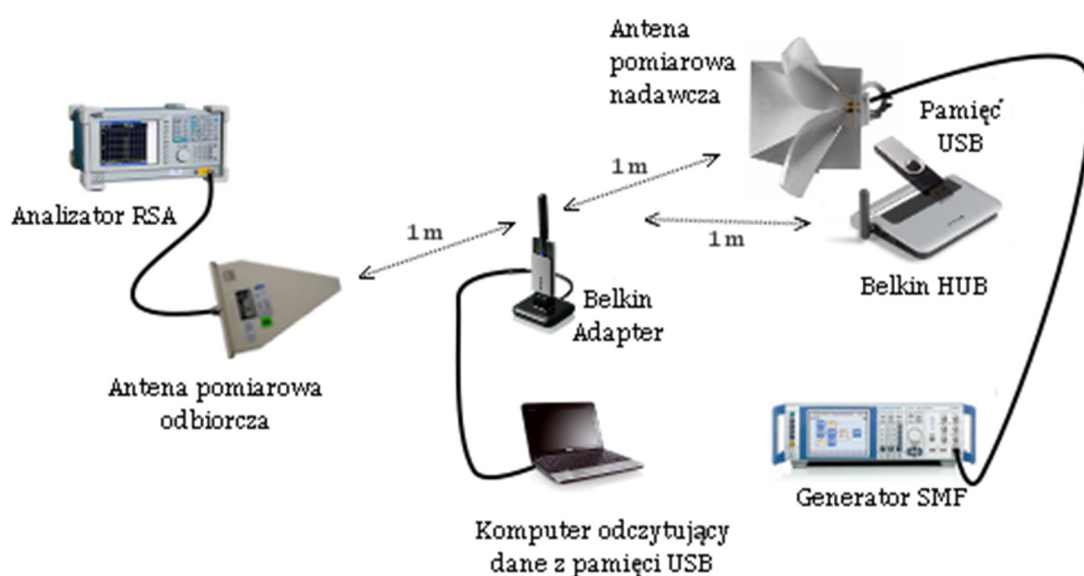
#### 4.2 Badanie urządzenia Wireless USB Belkin



Rys. 10. Zdjęcie przedstawiające urządzenie testowe

Do badań na stanowisku pomiarowym wybrano urządzenia f-my Belkin. Są to znane od 2007 roku urządzenia, które ze względu na łatwość instalacji doskonale nadają się do przeprowadzenia badań wpływu zakłóceń na transmisję oraz sprawdzenia metod pomiarowych pozwalających oceniać zgodność tych urządzeń z normami emisyjnymi obowiązującymi w Polsce.

#### 4.3 Wykorzystane stanowisko badawcze



Rys. 11 Układ pomiarowy przeznaczony do pomiaru współczynnika ochronnego

Do zbadania wpływu emisji zakłócającej na transmisję ultraszerokopasmową przygotowano układ pomiarowy przedstawiony na Rys. 11. Widoczne na nim antena pomiarowa odbiorcza, antena pomiarowa nadawcza oraz antena adaptera Belkin dołączonego do komputera kablem USB ustawione były precyzyjnie na jednej linii, około 1 m nad podłogą nieprzewodzącą (płytki ceramiczne) i przy zgodnych polaryzacjach. Obie anteny pomiarowe były dołączone do urządzeń pomiarowych specjalnymi 2 m kablami w ekranie metalowym ciągłym przeznaczonymi dla częstotliwości gigahercowych. Zasilanie urządzenia Belkin HUB zapewnione było przez niepokazany na rysunku dedykowany zasilacz sieciowy. Antena urządzenia Belkin HUB była ustawiona około 5 cm od bocznej pionowej krawędzi anteny pomiarowej nadawczej i 1 m od anteny adaptera Belkin.

Celem pomiaru było wyznaczenie różnicy wyrażonej w dB pomiędzy natężeniem pola pochodzącym od anteny urządzenia Belkin oraz pochodzącym od anteny pomiarowej nadawczej. Wcześniejsze pomiary wykazały, że oba urządzenia Belkin promieniują z identyczną mocą bez

względu na kierunek transmisji pomiędzy nimi. Dodatkowy pomiar wykazał, że wskazania odbiornika pomiarowego przy zmianie odległości z 2 m na 1m między anteną pomiarową nadawczą i odbiorczą nie wzrastają o więcej niż 1 dB. Związane jest to z faktem, że pomiary odbywają się na granicy strefy bliskiej anten. W związku z powyższym przyjęto, że różnica wskazań między poziomem odebranego sygnału od urządzenia Belkin i sygnału pochodzącego od anteny pomiarowej nadawczej zerwania jest poszukiwanym współczynnikiem ochronnym jeśli jest wyznaczona dla momentu, gdy kanał transmisji jeszcze działa, ale ulega przerwaniu przy dalszym zwiększeniu poziomu sygnału zakłócającego.

#### 4.4 Wyniki pomiarów współczynnika ochronnego i omówienie pomiarów

Współczynniki ochronne zbadano dla wybranych modulacji sygnałów zakłócających .

Tab.13. Różnica poziomu sygnału użytecznego i zakłócającego (sygn.użył. – sygn.zakł.)

| Modulacja sygnału zakłócającego  | Szerokość pasma pomiarowego | Transmisja jeszcze bez widocznego spowolnienia | Transmisja spowolniona około 10-krotnie | Zanik transmisji |
|--|-----------------------------|--|---|------------------|
|  |                             | [dB]   | [dB]                                    | [dB]             |
| Sinus bez jakiegokolwiek modulacji                                     | 10 MHz                      | -1   | <b>-4</b>                               | -7               |
|  | 20 kHz                      | -20  | <b>-23</b>                              | -26              |
| sygnał zmodulowany szerokopasmowo modulacją PSK z dewiacją 4,9 radiana | 10 MHz                      | 0  | <b>-3</b>                               | -6               |
|  | 20 kHz                      | -23  | <b>-26</b>                              | -29              |
| sygnał zmodulowany impulsowo o małym 1%                                | 10 MHz                      | -3   | <b>-6</b>                               | -9               |

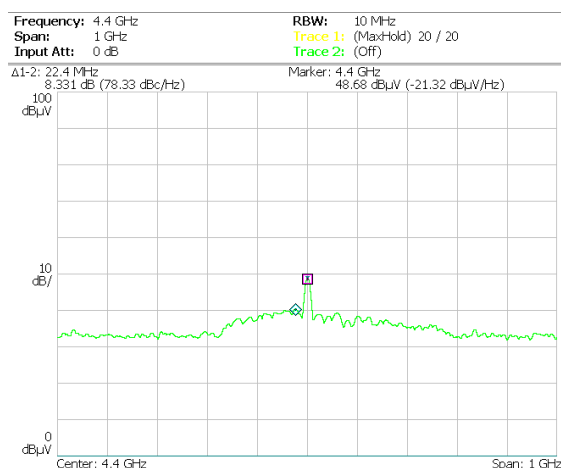


|   |        |     |            |     |
|---|--------|-----|------------|-----|
| współczynnika<br>wypełnienia i<br>okresie 1 MHz |        |     |            |     |
|   | 20 kHz | -22 | <b>-25</b> | -28 |

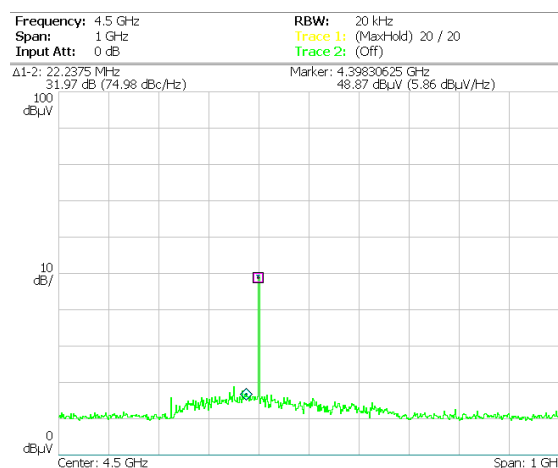
Badania wykonano używając dwóch możliwie skrajnych szerokości pasma pomiarowego. Pasma wąskie lepiej wyraża maksymalne natężenie pola wyrażone w V/m, natomiast pasmo szerokie lepiej oddaje gęstość mocy docierającej do anteny pomiarowej wyrażone w dBm/m<sup>2</sup>. Taki podwójne pomiary służyły rozstrzygnięciu dodatkowego problemu: czy badana transmisja ulega degradacji z powodu poziomu napięcia indukowanego w antenie urządzenia Belkin, czy też z powodu energii wytwarzanej w obwodach wejściowych przez sygnał zakłócający.

Badania wąsko pasmowe wykazały, że czysty sinus zakłóca transmisję o 2-3 dB bardziej niż sygnały szerokopasmowe bez względu na rodzaj modulacji. Natomiast pomiar szerokopasmowy pozwolił stwierdzić, że modulacja szerokopasmowa „ciągła” lub sinus bardziej zakłóca transmisję niż modulacją „nieciągła”, np. impulsowa o małym współczynniku wypełnienia. Wynika to wprost z metody realizacji transmisji przez urządzenie Belkin, które prowadzi komunikację testującą łączę oraz samą transmisję w krótkich paczkach. Pozwala to wykorzystywać krótkie przerwy w sygnale zakłócającym. Stąd też niewielka różnica pomiędzy zakłóceniem sinusoidalnym i modulowanym w sposób ciągły. Badane były tu różne typy modulacji AM, FM, 4-8-16-64 QAM, PSK, FSK i nie zauważono między nimi istotnych różnic.

Poniżej przedstawiono wybrane zrzuty ekranu uzyskane w trakcie wyznaczania współczynników ochronnych oraz w trakcie testowania wpływu na przebieg transmisji różnych rodzajów modulacji sygnału zakłócającego.



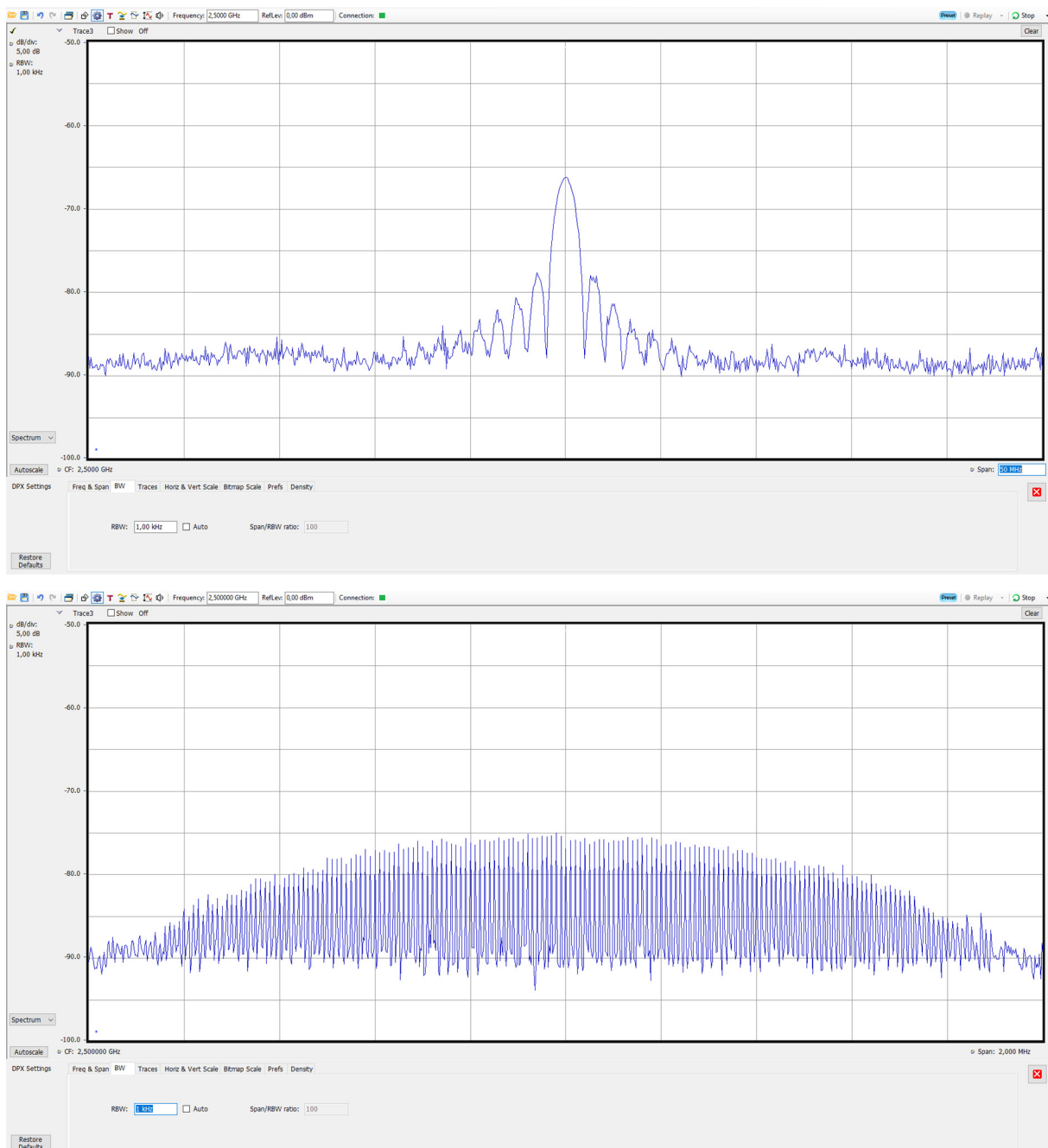
RBW 10 MHz



RBW 20 kHz

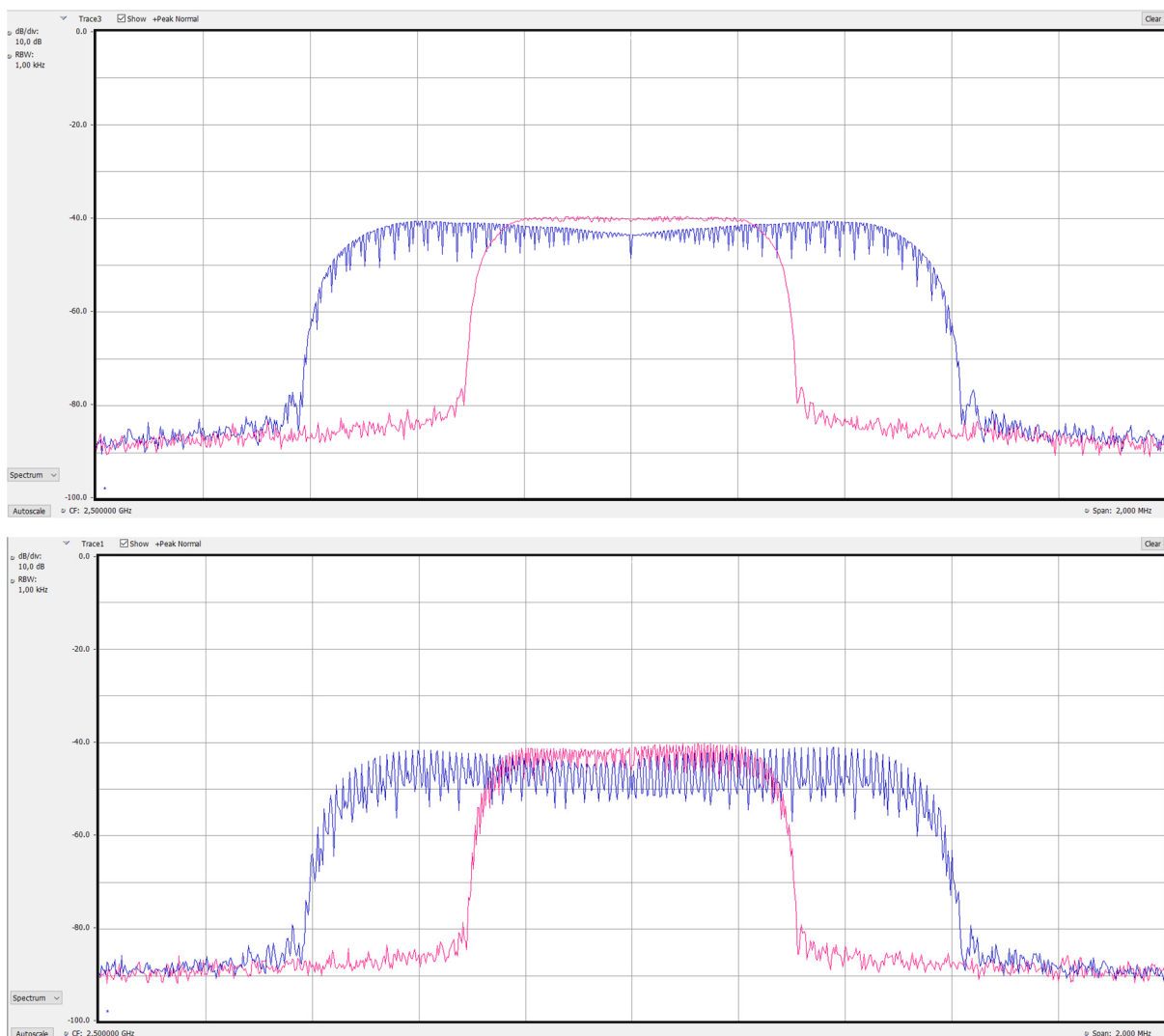
Rys. 12 Modulacja PSK o dewiacji 5,9 radiana na tle sygnału użytecznego zajmującego 520 MHz przy zastosowaniu różnego RBW ale tym samym poziomie napięcia ustawionym na generatorze zasilającym antenę zakłócającą.

Widoczne niżej przykłady sprawdzanych modulacji uzyskano na analizatorze widma czasu rzeczywistego Tektronix RSA306 pozwalającym na lepsze zobrazowanie szczegółów ze względu na możliwość ustawienia RBW na 1kHz. Ze względu na ograniczony zakres częstotliwościowy analizatora pokazano przebiegi przy obniżonej do 2,5 GHz częstotliwości środkowej. Sam charakter przebiegów nie różnił się od stosowanych do badań zakłóceń o częstotliwości środkowej 4,4 GHz.



Rys. 13 Modulacja impulsowa o okresie 10 MHz i wypełnieniu 1%. Wyżej: całe widoczne widmo, niżej: fragment środkowy.

Modulacja ta mimo swojej szerokości widma okazała się mniej zakłócająca niż sygnał niezmodulowany o tej samej mocy.

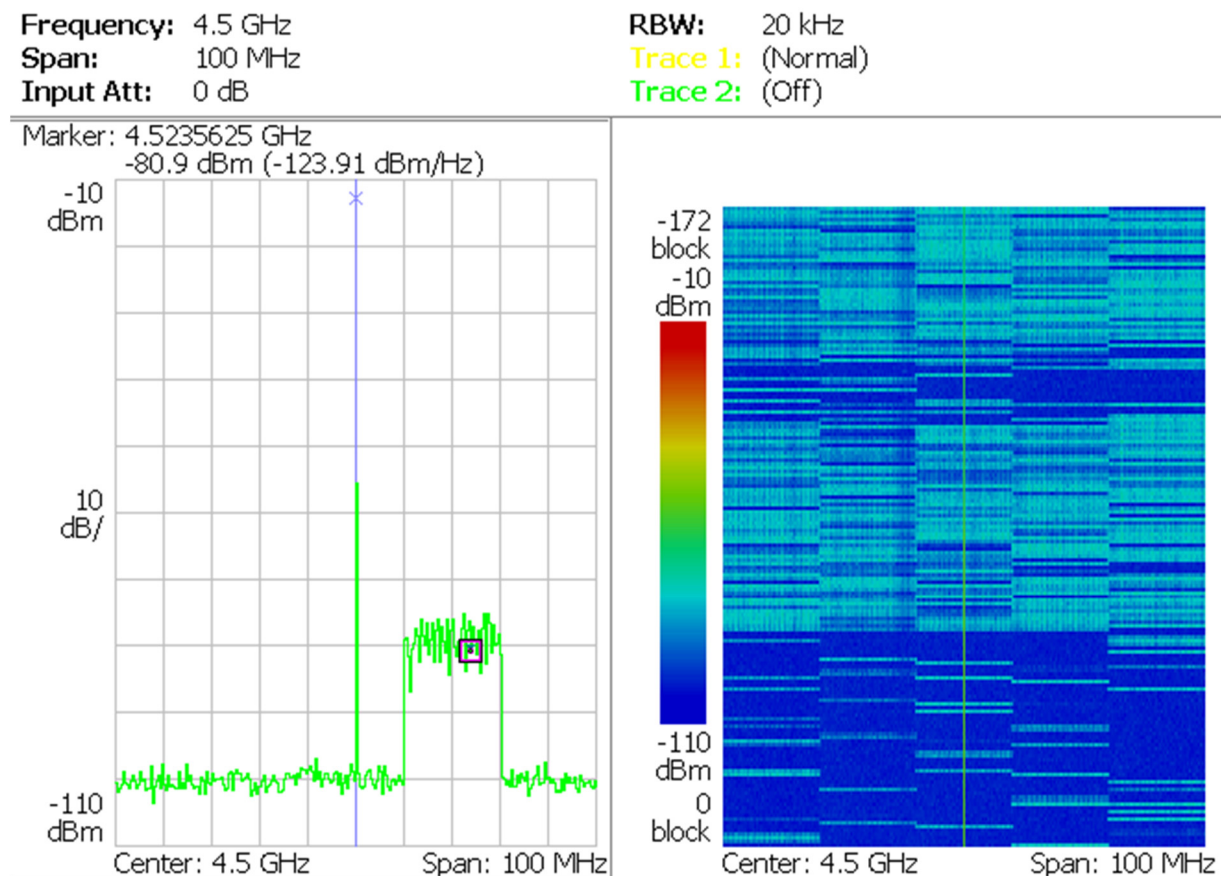


Rys. 14 Modulacja QAM. Wyżej: 4QAM, niżej: 64QAM. Niebieski: Symbol Rate 1 M/s, czerwony 500k/s.

W przypadku różnych typów modulacji ciągłych szerokopasmowych istotną rolę odgrywało natężenie pola, natomiast moc emitowana z anteny związana z szerokością pasma miała praktycznie niezauważalne znaczenie na sposób zakłócania transmisji pomiędzy urządzeniami Belkin.

Jako dodatkową ilustrację przedstawiono niżej zrzuty ekranu z analizatora widma pokazujące zaniki transmisji poprzez Wireless USB Belkin pod wpływem omawianych wyżej zakłóceń. Dla celów ilustracyjnych antena pomiarowa odbiorcza została znacznie przybliżona do anteny Raport 21307016

adaptera Belkin w celu ułatwienia obserwacji zachowania się badanego urządzenia, stąd też nie należy odnosić widocznych poziomów sygnałów do zaprezentowanych wyżej wyników pomiaru współczynników ochronnych.

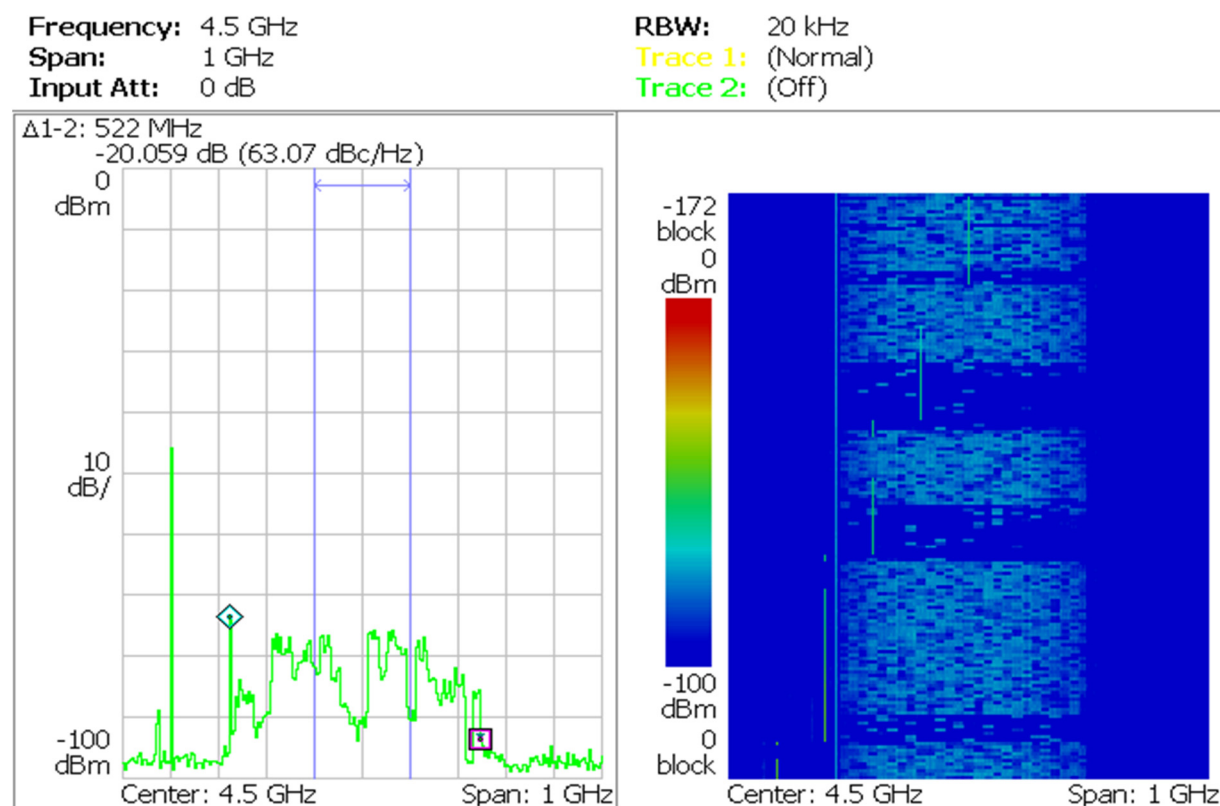


Rys. 15. Zakłócanie sygnałem niezmodulowanym.

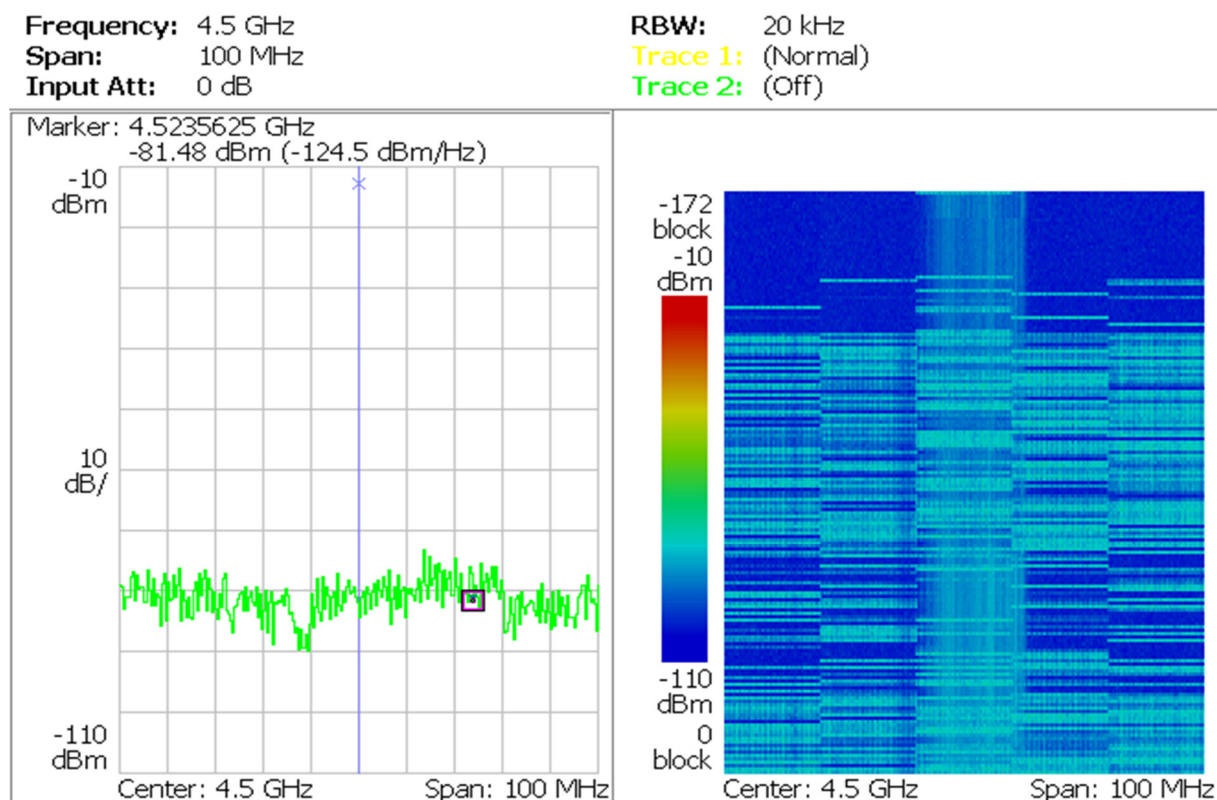
Na przedstawionym wyżej rysunku widoczny jest po lewej sygnał zakłócający oraz pojedynczy kanał, z 26 kanałów o szerokości 20 MHz, jakimi posługuje się urządzenie Belkin stosujące Multicarrier UWB. Sygnał zakłócający widoczny na spektrogramie po prawej był stopniowo zwiększany aż do utraty transmisji. Pojedyncze paczki widoczne po utracie łączności związane są z badaniem możliwości nawiązania transmisji przez współpracujące urządzenia.

Poniżej pokazane są podawane zakłócenia sinusoidalne przy zmieniającej się częstotliwości w stosunku do częstotliwości pasma urządzenia Belkin. Poziom zakłócenia po zmianie częstotliwości był ustawiany tak, aby transmisja przebiegała w sposób niezakłócony, a następnie poziom był zwiększany do utraty łączności. Przeprowadzone testy wykazały, że zakłócenie poza

pasmem użytkowym praktycznie nie zakłóca urządzenia. Wejście z zakłóceniem na dowolny kanał powoduje utratę łączności przy praktycznie takim samym poziomie zakłócenia.



Rys. 16. Testowanie wpływu częstotliwości zakłócenia w stosunku do pasma użytkowego badanego urządzenia Belkin. Ciągły ślad po lewej stronie pasma pochodził z wnętrza badanego urządzenia.



Rys. 17. Sygnał zakłócający szerokopasmowy o modulacji Chirp i dewiacji 10 MHz na tle transmisji.

#### 4.5 Wnioski i podsumowanie

Wykonane eksperymenty i badania potwierdzają wysoką skuteczność i odporność na zakłócenia transmisji UWB przy jednoczesnym zachowaniu bardzo niskiego poziomu gęstości widmowej własnej emisji. Ta ostatnia cecha jest szczególnie istotna w środowiskach wrażliwych na zakłócenia, np. w środowiskach medycznych, w których funkcjonuje np. wiele emisji w paśmie nielicencjonowanym tj. 2,4 GHz WiFi. Badane urządzenie było przeznaczone do przesyłania dużych ilości danych związanych z typowym transferem w środowisku biurowym (korzystanie z banków danych, urządzeń drukujących itd.), jednak użycie analogicznych technologii do przesyłania danych pomiarowych lub sterujących, np. w tzw. inteligentnych budynkach pozwala z jednej strony na znaczne obniżenie kosztów i uproszczenie instalacji, a z drugiej nie wprowadza do tradycyjnych kanałów komunikacji bezprzewodowej kolejnych sygnałów wypełniających te kanały w sposób konkurencyjny.

Kolejne badania proponuje się przeprowadzić na dostępnych od niedawna urządzeniach firmy DecaWave, które posiadają zdecydowanie szersze możliwości.

Pozwalają one np. na użycie własnego oprogramowania sterującego transmisją. Wspomniane urządzenia są stosowane oprócz transmisji danych, również do pozycjonowania obiektów posiadających transponder UWB lub do badania położenia obiektów w oparciu o odbicie fali. Zastosowania te są obecnie coraz częściej i powszechniej stosowane np. w zautomatyzowanych systemach produkcyjnych, w systemach bezpieczeństwa i ochrony obiektów, w urządzeniach noszonych przez ludzi a służących do monitoringu medycznego lub ochrony personelu w obszarach niebezpiecznych.

Gwałtowny rozwój tej technologii i pojawianie się kolejnych dostawców musi jednak stwarzać dalsze problemy z kompatybilnością EMC. Prowadzone prace w tym kierunku mogą pomóc w przygotowaniu właściwych metod i środków pozwalających na skuteczną kontrolę przestrzegania norm dotyczących tych urządzeń.

## **5 Demonstrator platformy detekcji widma radiowego**

### **5.1 Wprowadzenie**

W ramach pracy rozpoznano możliwość wykorzystania niskobudżetowych układów SDR (*Software Defined Radio*) na potrzeby uruchomienia demonstratora platformy pomiarowej, pozwalającej na monitoring pracy i detekcję widma radiowego (*sensing*) systemów radiokomunikacyjnych w pasmach VHF/UHF. Istotnym elementem platformy była możliwość automatycznego przetwarzania analizowanych sygnałów oraz przekazywanie ich do serwera danych wraz z ich wizualizacją na interaktywnych podkładach mapowych w czasie rzeczywistym. Badania w tym zakresie zostały podjęte ze względu na nieustanny rozwój nowych technik bezprzewodowych oraz stale postępujące zapotrzebowanie na dostęp do widma radiowego. Rozwijane w ostatnich latach koncepcje prowadzą do inteligentnego wykorzystywania widma radiowego na zasadzie kognitywnej (*Cognitive Radio*): systemy tego typu obserwują otoczenie, analizują jego zachowanie i podejmują decyzję o transmisji w wolnej w danej chwili i w danym miejscu części widma radiowego. Istota tego typu systemów wraz z prezentacją tzw. cyklu kognitywnego została zaprezentowana przez Mitolę na przełomie wieków [2]. Istotnym narzędziem umożliwiającym powyższe działania w dziedzinie radia kognitywnego jest detekcja widma radiowego (*sensing*) realizowany poprzez pomiar fizycznym urządzeniem. Minimalizacja kosztów takich przyrządów oraz ich upowszechnienie może przyczynić się do utworzenia taniej oraz rozległej sieci

pomiarowej, dzięki której dane mogłyby być przetwarzane i raportowane w sieci internetowej z wykorzystaniem dedykowanego punktu dostępowego (w tym przypadku, w postaci dedykowanego serwisu WWW). Nie ma obecnie na rynku komercyjnym kompletnych dedykowanych niskobudżetowych systemów pomiarowych, umożliwiających realizację monitoringu i pomiarów emisji radiowych systemów radiokomunikacyjnych, pracujących w pasmach VHF/UHF, mogących raportować wyniki on-line w czasie rzeczywistym. Tego typu systemy są obecnie w fazie badawczej i są przedmiotem prac rozwojowych na świecie.

Praca ta miała na celu opracowanie i przygotowanie demonstratora w skali laboratoryjnej. Jej wyniki traktowane są jako wyjście do dalszych prac zmierzających do opracowania platformy mogącej pracować w warunkach rzeczywistych (pozalaboratoryjnych). W przedstawianym rozwiązaniu bazowano na popularnych i dostępnych rozwiązaniach/komponentach. Wyróżnić można trzy kluczowe i niezależne elementy opracowanej architektury: radio programowalne, serwer danych oraz internetowy serwis prezentacji danych, które łącznie składają się na opracowany demonstrator. Zostały one przedstawione w dalszej części tekstu.

Technologia radia programowalnego (SDR), której początki sięgają przełomu lat 80 ubiegłego wieku [1] za sprawą obecnych możliwości przetwarzania sygnałów cyfrowych (z wykorzystaniem układów DSP, FPGA) staje się coraz bardziej popularna, a także coraz bardziej dostępna. Radio programowalne nie doczekało się jednak do tej pory jednej spójnej definicji. Jedną z pierwszych przedstawił w [2] Joshep Mitola. Wraz z publikacją Mitoli zaczęto utrzymywać w środowisku pojęcie *Software Radio*, tym samym niejako wprowadzając techniki radia programowalnego w obszar zastosowań cywilnych. Idąc za słowami autora *Software Radio* jest zbiorem podstawowych elementów realizujących przetwarzanie sygnału cyfrowego, pełniących funkcję systemu komunikacyjnego (nadajnik, model kanału, odbiornik, etc) z wykorzystaniem procesora, na którym radio programowalne jest implementowane w czasie rzeczywistym. Radio takie ma możliwość rekonfigurowania parametrów generowanego sygnału m.in. za pomocą dedykowanych aplikacji. Urządzenia SDR wykorzystują do tego celu przetwarzanie sygnałów cyfrowych, co pozwala wariantować generowany sygnał poprzez zmianę modulacji/demodulacji, parametrów filtrowania, kontroli błędów, multipleksowania etc. Inna definicja ujmująca Radio Programowalne w szerszym kontekście odnosi się do systemu, który prawie wszystkie funkcjonalności związane z warstwą fizyczną implementuje z wykorzystaniem algorytmów procesorów sygnałowych.

Wraz ze wzrostem ilości urządzeń stosujących radio programowalne, odnotowuje się również rozwój licznych pakietów narzędziowych. Przykładem jest bardzo popularny pakiet GNU Radio, powstały na bazie prac nad programem PSpectra w MIT. Za pomocą GNU Radio można generować (oraz

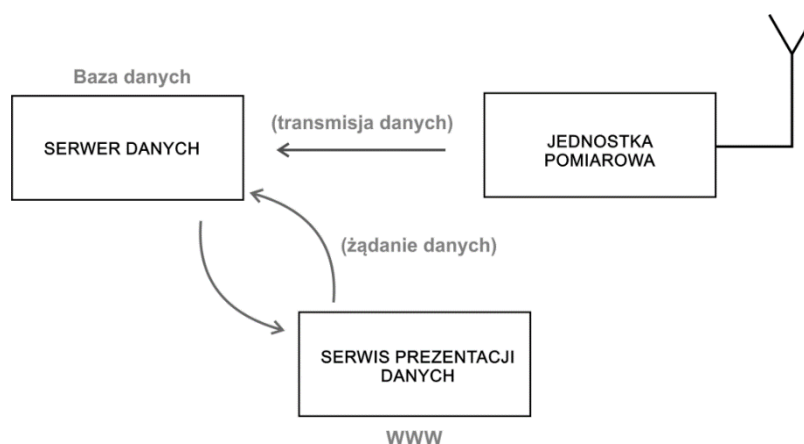


odbierać) m.in. sygnały takich systemów jak FM, ZigBee, Bluetooth, DECT, GSM lub tworzyć własne implementacje z wykorzystaniem interfejsu graficznego.

Możliwości tworzenia własnych rozwiązań z wykorzystaniem radia programowalnego zyskuje się dzięki zwracanym z odbiornika (lub generowanym w nadajniku) próbkom I/Q (tzw. sygnał kwadraturowy). Możliwa jest dzięki temu sprzętowa modulacja i demodulacja sygnałów zespolonych. W dalszej części pracy został przedstawiony sposób wykorzystania próbek I/Q przy realizacji pomiaru poziomu mocy z wykorzystaniem układów SDR. Omówiono w szczególności opracowany demonstrator wraz z przedstawieniem koncepcji architektury. Zaprezentowano również sposób kalibracji układów SDR oraz wyniki pomiarów laboratoryjnych i polowych.

## 5.2 Architektura

Demonstrator platformy pomiarowej pozwalającej na monitoring pracy systemów radiokomunikacyjnych w pasmach VHF/UHF zrealizowano w oparciu o architekturę składającą się z trzech podstawowych bloków funkcjonalnych: serwera danych, jednostki pomiarowej oraz serwisu prezentacji danych. Wzajemne powiązania bloków przedstawiono na rysunku 18.

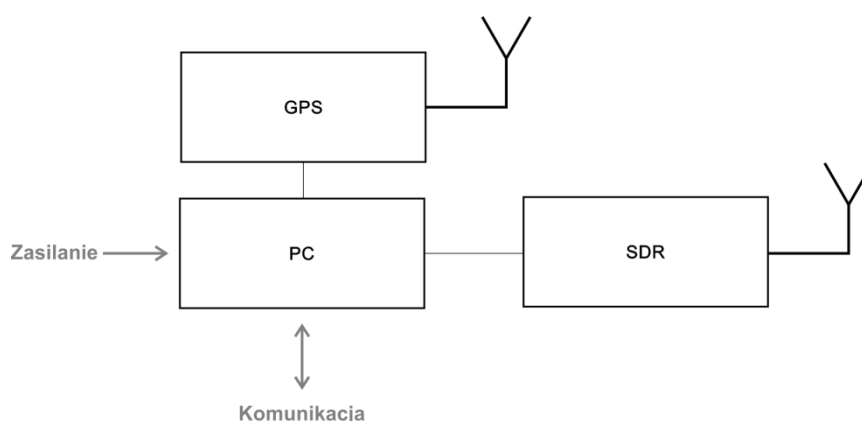


*Rysunek 18: Ogólna architektura opracowanego demonstratora*

Transmisja danych pomiędzy blokami realizowana jest poprzez odpowiednie interfejsy z wykorzystaniem określonych struktur danych. Dzięki temu osiągnięto modułowość rozwiązania, umożliwiającą wymianę dowolnego bloku w toku ewentualnych dalszych prac. Poza tym przyjęty podział pozwala na dostarczenie odpowiednich informacji do końcowych użytkowników, którzy nie muszą być w tym samym czasie operatorami sprzętu (specjalistami w dziedzinie).

### 5.3 Jednostka pomiarowa

Jednostka pomiarowa jest blokiem funkcjonalnym odpowiedzialnym za realizację pomiaru sygnału radiowego w odpowiednim zakresie częstotliwości (z wykorzystaniem radia programowalnego), a także za obróbkę danych do postaci oczekiwanej przez serwer danych (*post-processing*). Dane w końcowej postaci przekazywane są do serwera danych przez sieć Internet. Ogólna koncepcja jednostki pomiarowej przedstawiona została na rysunku 19.



Rysunek 19: Ogólny schemat koncepcyjny jednostki pomiarowej.

W toku pracy dobrano odpowiednie urządzenia, które miały pozwolić na realizację zadania, a jednocześnie wpisywać się w segment rozwiązań niskobudżetowych. Wybrano Raspberry PI 3 ze względu na dużą liczbę złącz GPIO - *Genral-Purpose Input/Output* (pozwalających na obsługę interfejsów I2C, SPI, UART) - interfejs USB, a także możliwość zasilania napięciem 5V. Jako moduł GPS wybrano układ uBlox Neo-6M wykorzystujący interfejs UART. Moduł ten wykorzystuje antenę aktywną ze wzmocnieniem 28 dB. Testy terenowe wykazały dużą stabilność modułu i zdolność do pracy nawet w przypadkach gdy antena jest montowana od wewnętrznej strony obudowy. Jednostkę pomiarową wyposażono w Router Mikrotik mAP 2N, mogący pełnić rolę punktu dostępowego AP WiFi. Dzięki temu możliwe jest łączenie się z jednostką bezprzewodowo. Istnieje, co prawda możliwość połączenia bezpośrednio kablem sieciowym z komputerem Raspberry Pi3, jednak rozwiązanie to wymaga otwierania obudowy, co w warunkach pomiarowych (polowych) jest niepraktyczne. Wybór konkretnej platformy SDR nie był oczywisty. Tym samym przeprowadzono analizę popularnych niskobudżetowych rozwiązań SDR, które są dostępne w komercyjnej dystrybucji. W tabeli 14 przedstawiono porównanie kluczowych parametrów analizowanych platform.

**Tabela 14: Porównanie niskobudżetowych rozwiązań SDR**

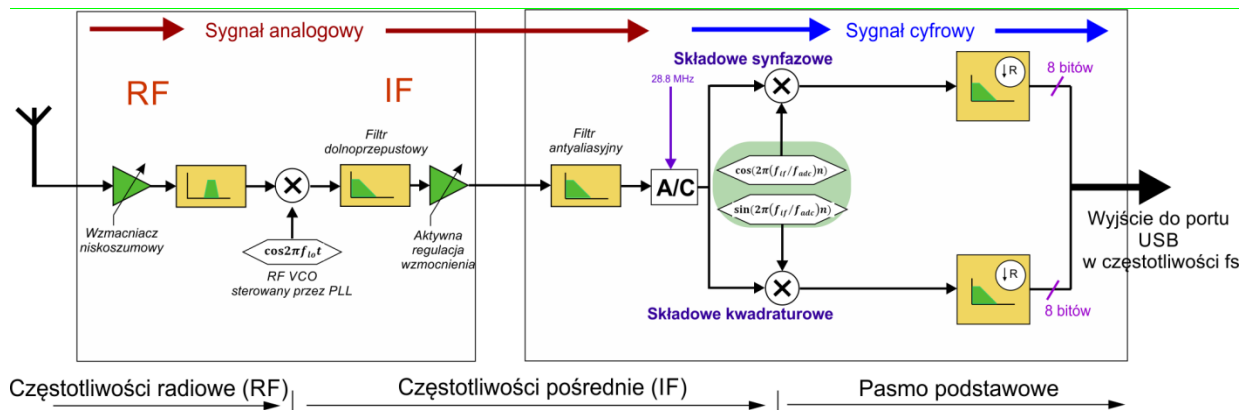
| Model             | Częstotliwość [MHz] | Pasmo [MHz]         | Próbkowanie ADC           | Stabilność [PPM] | Tryb             | Cena    |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|------------------|------------------|---------|
| RTL-SDR (R820-T2) | 24 – 1766           | 3,2 (2,56 zalecane) | 8 bit                     | ~30              | odbiór           | ~ \$25  |
| Airspy Mini       | 24 – 1800           | 5                   | 10.4 (ENOB <sup>1</sup> ) | 0.5              | odbiór           | ~ \$99  |
| Airspy R2         | 24 – 1800           | 9                   | 10.4 (ENOB)               | 0.5              | odbiór           | ~ \$169 |
| BladeRF           | 300 – 3800          | 40                  | 12                        | b.d.             | odbiór/nadawanie | ~ \$350 |
| HackRF One        | 30 – 6000           | 20                  | 8                         | 30               | odbiór/nadawanie | ~\$299  |
| USRP B210         | 50 – 6000           | 61,44               | 8                         | 2                | odbiór/nadawanie | ~\$1100 |

1 – ENOB – *Effective number of bits*

Do dalszych badań wybrano platformę RTL-SDR z modelem Rafael R820-T2 produkcji Rafael Microelectronics. Platforma ta wykorzystuje układ Realtek RTL2832U (DVB-T COFDM Demodulator). Pierwotnie układy te były stosowane do odbioru telewizji cyfrowej w standardzie DVB-T (dongle USB). Jednak za sprawą możliwości bezpośredniego odczytywania próbek I/Q stały się one bardzo popularne przy realizacji prac badawczych. Wiele instytucji oraz radioamatorów zrealizowało prace oparte o RTL-SDR w różnych dziedzinach. W [3] użyto RTL-SDR do analizy widma radiowego w zakresie częstotliwości 470-862 MHz w poszukiwaniu wolnych częstotliwości tzw. białych przestrzeni (*TV White Space*) w zakresie pasma telewizji naziemnej. SDR-RTL było użyte również do odbioru informacji z satelitów National Oceanic and Atmosphere Administration (pasmo 137 MHz), a odbierane informacje dotyczyły przewidywanych gwałtownych zmian pogodowych, co ułatwiało planowanie zadań podczas zarządzania kryzysowego. W[4] w oparciu o SDR-RTL zrealizowano odbiornik radia FM stereo. W [5] przedstawiono możliwość odbioru otwartych danych (niezaszyfrowanych) GSM, służących do oceny jakości łącza. W [6] przy wykorzystaniu GNU Radio, Raspberry Pi2 oraz SDR-RTL zrealizowano demodulator sygnałów AM oraz FM w zakresach częstotliwości od 30 MHz do 1,7 GHz wraz z możliwością analizy widma.

W [7] autorzy opisali realizację platformy radiowej oraz odbiorników SDR w paśmie 90 MHz, które umożliwiają dostrojenie się i odbiór wiadomości w trakcie katastrof naturalnych. W [8] przedstawiono wykorzystanie SDR do detekcji i monitorowania wyładowań niezupełnych (*partial discharge*), które mogą mieć miejsce w łączach energetycznych. W [9] przedstawiono wykorzystanie SDR przy realizacji odbioru i prezentacji danych AIS (*Automatic Identification System*), służących do automatycznego śledzenia dużych statków towarowych i pasażerskich.

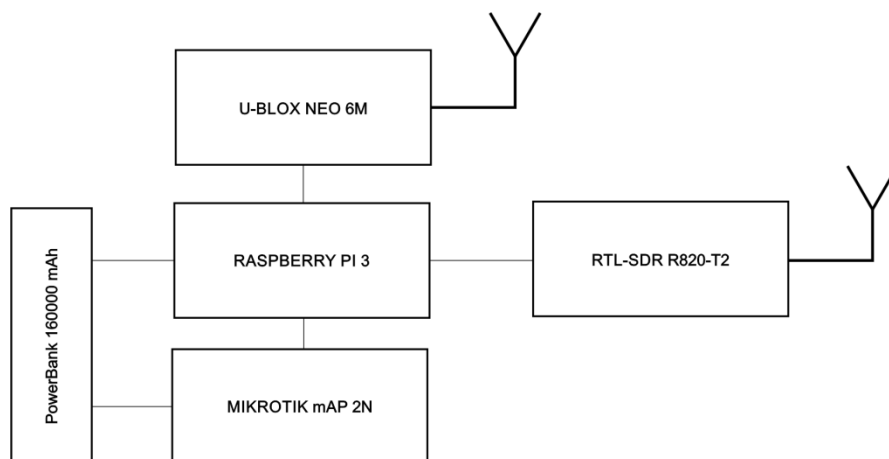
RTL-SDR zwraca 8 bitowe próbki z teoretyczną częstotliwością próbkowania 3,2 MS/s. Praktycznie zaleca się jednak nie przekraczanie 2,56 MS/s. Próbki IQ są w tym przypadku zespolone - tym samym szerokość analizowanego pasma jest równa częstotliwości próbkowania.



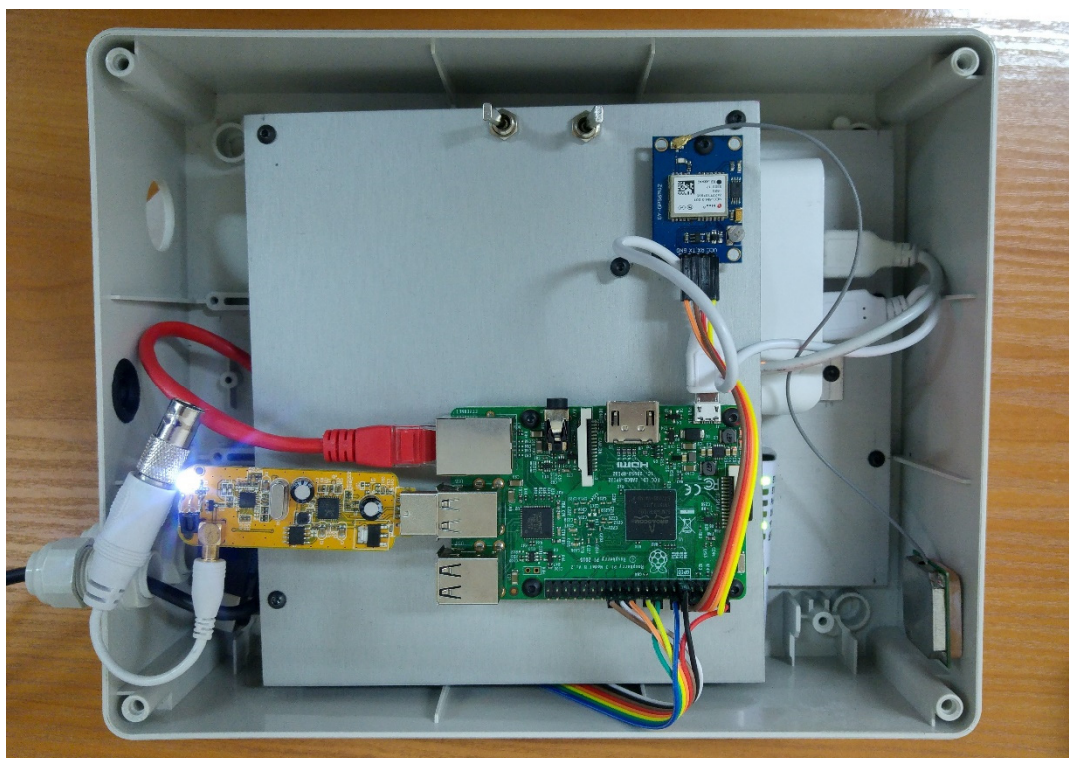
Rysunek 20: Schemat architektury odbiornika RTL-SDR z tunerem RM R820\T2 [10]

Zgodnie z zaprezentowanym schematem sygnał radiowy (RF) zostaje poddany na wejściu wzmocnieniu wzmacniaczem niskoszumowym, a następnie zamieniony do postaci częstotliwości pośredniej (IF). W układzie R820\T2 działa aktywna regulacja wzmocnienia. Sygnał kolejno jest próbkowany (częstotliwość oscylatora 28,8 MHz) oraz wyznaczane są składowe kwadraturowe oraz synfazowe. Uzyskując na wyjściu (port USB) próbki IQ reprezentujące sygnał w paśmie podstawowym. W układzie występują łącznie 3 stopnie wzmocnienia.

Architektura całości opracowanej platformy i połączenie wyżej omawianych elementów została przedstawiona na rysunku 21. Na rysunkach 22 – 23 przedstawiono wykonany prototyp. Wszystkie komponenty zostały zamocowane w hermetycznej obudowie IP56, zapewniającej ochronę przed pyłem oraz silnymi strugami wody, które mogą wystąpić w trakcie wykonywania pomiarów.



*Rysunek 21: Schemat Jednostki pomiarowej z dobranymi elementami.*



*Rysunek 22: Rozmieszczenie elementów demonstratora wewnątrz obudowy (widok wewnętrzny)*

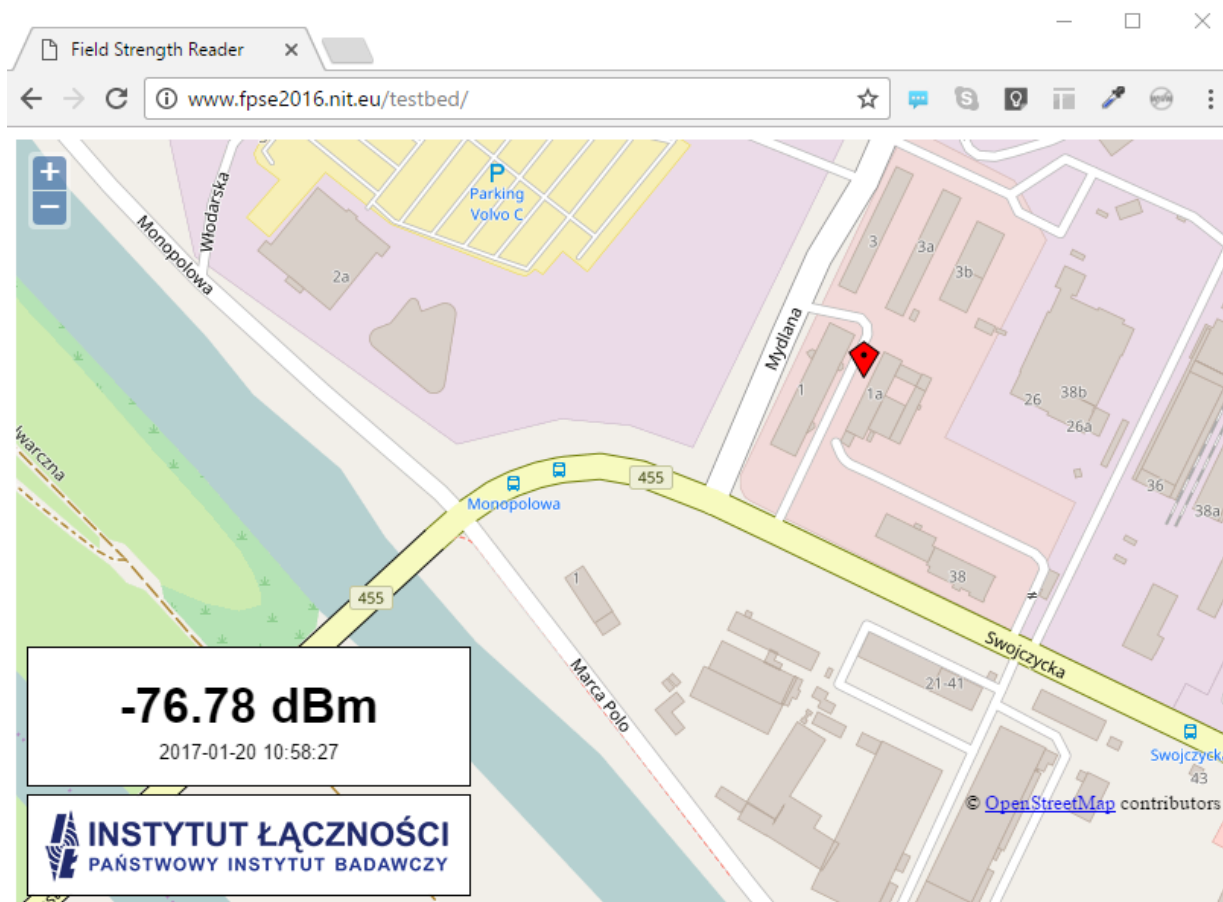


*Rysunek 23: Obudowa zapewniająca stopień ochrony IP56 (widok zewnętrzny)*

#### 5.4 Serwer danych i serwis prezentacji danych

Serwis wizualizacji danych został wykonany w formie strony WWW. Pozwala ona na wizualizację na mapie w czasie rzeczywistym ostatniego wyniku pomiaru dokonanego zestawem pomiarowym. Lokalizacja pomiaru wizualizowana jest na mapie w postaci markera, a wyników bloku w lewym dolnym rogu strony. Odświeżanie wyniku pomiaru odbywa się w stałych interwałach czasowych ustalonych na 1 sekundę. Strona internetowa została wykonana przy wykorzystaniu technologii HTML, CSS i JavaScript. Do operacji po stronie serwera w bazie danych został wykorzystany interpretowany skryptowy język programowania PHP. Dane pomiarowe odczytywane są z relacyjnej bazy danych MySQL. Do prezentacji podkładu mapowego OpenStreetMap na stronie internetowej została wykorzystana biblioteka OpenLayers.

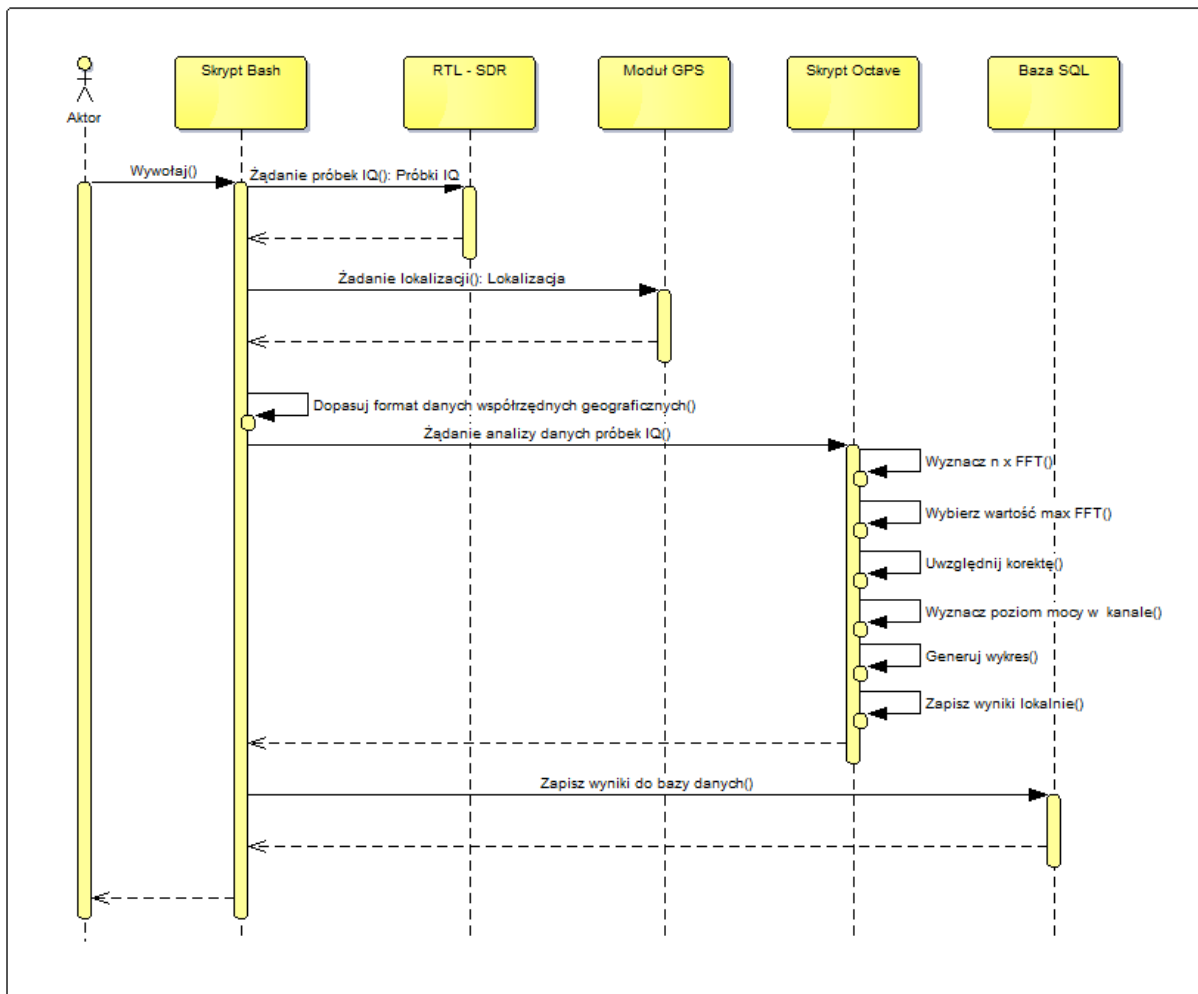




*Rysunek 24: Przykładowy ekran opracowanego serwisu WWW*

## 5.5 Pomiar poziomu mocy w kanale radiowym - kalibracja

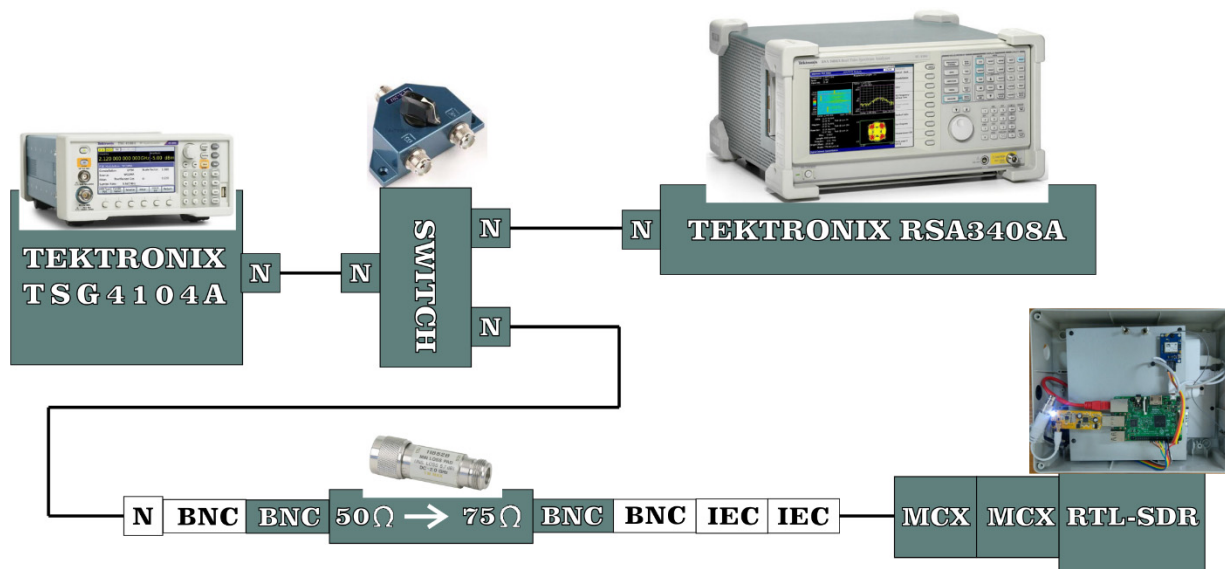
Wyznaczanie poziomu mocy w kanale radiowym wykonywane jest za pomocą skryptów pracujących na Raspberry Pi 3 z zainstalowanym systemem operacyjnym Linux Raspian Jessie. Na rysunku 24 przedstawiono schemat sekwencji, opisujący wykonanie pojedynczego pomiaru. Logika obsługi radia programowalnego, modułu GPS oraz połączenia z bazą danych realizowana była w języku powłoki systemu UNIX (bash). Logika obliczeń (analizy próbek IQ) wykonywana jest w języku Octave.



Rysunek 25: Schemat sekwencji - pomiar poziomu mocy w kanale radiowym

Pomiar jest realizowany dla określonego zakresu częstotliwości, liczby punktów szybkiej transformaty Fouriera oraz liczby zbiorów FFT. Spośród wszystkich zbiorów FFT wyznaczana jest wartość maksymalna dla każdego koszyka (*bin*) FFT. Zwracane próbki IQ z RTL-SDR nie są wyskalowane względem konkretnej jednostki. W ramach pracy dokonano ich kalibracji, proponując odpowiednią poprawkę. Przeanalizowano również charakterystykę układu zależną od częstotliwości oraz poziomu mocy odbieranego sygnału na wejściu odbiornika. Kalibracja została przeprowadzona z wykorzystaniem układu jak na rys 25. Nie badano powtarzalności uzyskanych wyników na więcej niż jednym egzemplarzu odbiornika oraz nie analizowano wpływu stabilności temperaturowej. Pomiary wykonano na rozgrzanych przyrządach.





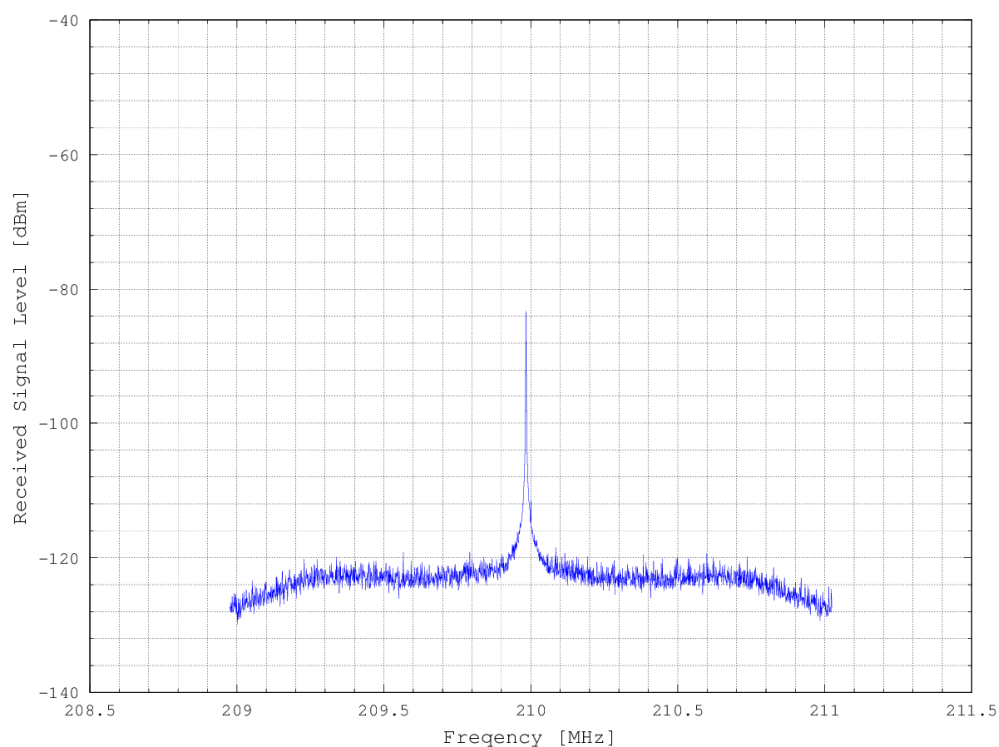
*Rysunek 26: Schemat pomiarowy. Kolorem białym zaznaczono dodatkowe przejściówki zastosowane w układzie pomiarowym.*

W układzie pomiarowym zastosowano dopasowanie impedancji toru oraz przełącznik pozwalający rejestrować zamiennie wyniki na analizatorze widma lub odbiorniku RTL-SDR. Dopasowanie impedancji oraz przewody wносиły dodatkowe straty, kolejno 6.4 dB oraz 1 dB, co zostało uwzględnione w obliczeniach. Wszystkie pomiary wykonano dla zakresu częstotliwości 170-230 MHz. Jest to zakres pracy systemu DAB+ w paśmie III VHF. Dla tego systemu były też prowadzone późniejsze testy układu. RTL-SDR pracował z częstotliwością próbkowania 2,048 MS/s z ustalonym zyskiem tunera 40,2 dB. Przyjęto w obliczeniach FFT o liczbie punktów 2048. Wartość maksymalna była wyznaczana ze 100 przebiegów FFT. Na rysunku 10 przedstawiono laboratoryjne stanowisko pomiarowe.



*Rysunek 271: Laboratoryjne stanowisko pomiarowe.*

W celu wykonania kalibracji układu analizowano sygnały o pojedynczej częstotliwości, generowane z krokiem 5 MHz w zakresie 170 – 230 MHz. Rysunek 28 jest wynikiem działania opracowanej implementacji w Octave. Jest on generowany automatycznie dla każdego pomiaru.



*Rysunek 282: Przykładowy wynik pomiaru – automatycznie generowany wykres prezentujący poziom mocy w funkcji częstotliwości*

Na rysunku można zaobserwować utratę dokładności na krańcach zakresu. Tym samym nie rekomenduje się wykorzystywanie pełnego zakresu – w tym przypadku 2,048 MHz – do prowadzenia pomiarów. W tabeli 2 zaprezentowano wyniki pomiarów kalibracyjnych przeprowadzonych w zakresie mocy wejściowej – 65 dBm ÷ 115 dBm. W wyniku pomiaru uzyskano wyniki w jednostkach względnych dBr. Za pomocą pakietu narzędziowego R wyskalowano wyniki, proponując poprawkę dla zakresu 170 – 230 MHz. Poprawka,  $K$ , ma postać wielomianu 3 stopnia (wzór 1):

$$K = -483,69 + 6,105f - 0,03227f^2 + 0,00005604f^3 \quad (1)$$

Po zastosowaniu poprawki uzyskano wyniki jak w tabeli 15. Porównując je z wynikami oczekiwanymi w tabeli 16 przedstawiono wartość błędu. Na rysunku 29 zaprezentowano wykres przedstawiający poziom mocy wyznaczony na wejściu odbiornika RTL-SDR względem poziomu mocy odniesienia. Z kolei na rysunku 30 przedstawiono wartość błędu dla różnych poziomów mocy w funkcji częstotliwości.

Tabela 15: Wyznaczony poziom mocy przed kalibracją.

| Poziom<br>sygnału<br>$P_{out}$<br>[dBm] | Straty<br>dopasowana<br>$L_{imp}$ [dB] | Tłumienie<br>złączek<br>$L_z$ [dB] | Poziom<br>na<br>wejściu<br>tunera<br>$P_{in}$<br>[dBm] | Poziom rejestrowany (bez korekty) [dBr] |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---|--|------------------------------------|--|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|   |  |                                    |  | 170 MHz                                 | 175 MHz | 180 MHz | 185 MHz | 190 MHz | 195 MHz | 199 MHz | 205 MHz | 210 MHz | 215 MHz | 220 MHz | 225 MHz | 230 MHz |
| -107,6                                  | 6,4                                    | 1                                  | -115   | -9,49                                   | -11,01  | -8,36   | -9,16   | -9,74   | -7,35   | -8,58   | -7,54   | -7,38   | -9,45   | -7,22   | -6,49   | -9,12   |
| -97,6                                   | 6,4                                    | 1                                  | -105   | -0,29                                   | -3,27   | -0,18   | -0,23   | -0,70   | 1,39    | 0,41    | 1,77    | 1,54    | -0,96   | 2,11    | 2,20    | -0,29   |
| -87,6                                   | 6,4                                    | 1                                  | -95  | 9,40                                    | 6,22    | 9,41    | 9,35    | 8,86    | 11,17   | 9,87    | 10,77   | 11,19   | 8,49    | 11,81   | 11,70   | 9,28    |
| -77,6                                   | 6,4                                    | 1                                  | -85  | 19,19                                   | 16,06   | 19,27   | 19,38   | 18,69   | 21,00   | 19,83   | 20,70   | 21,14   | 18,48   | 21,80   | 21,51   | 19,18   |
| -67,6                                   | 6,4                                    | 1                                  | -75  | 29,25                                   | 26,09   | 29,24   | 29,34   | 28,66   | 30,91   | 29,82   | 30,67   | 31,15   | 28,45   | 31,75   | 31,41   | 29,18   |
| -57,6                                   | 6,4                                    | 1                                  | -65  | 39,24                                   | 36,05   | 39,21   | 39,32   | 38,70   | 41,00   | 39,83   | 40,65   | 41,17   | 38,47   | 41,76   | 41,51   | 39,09   |

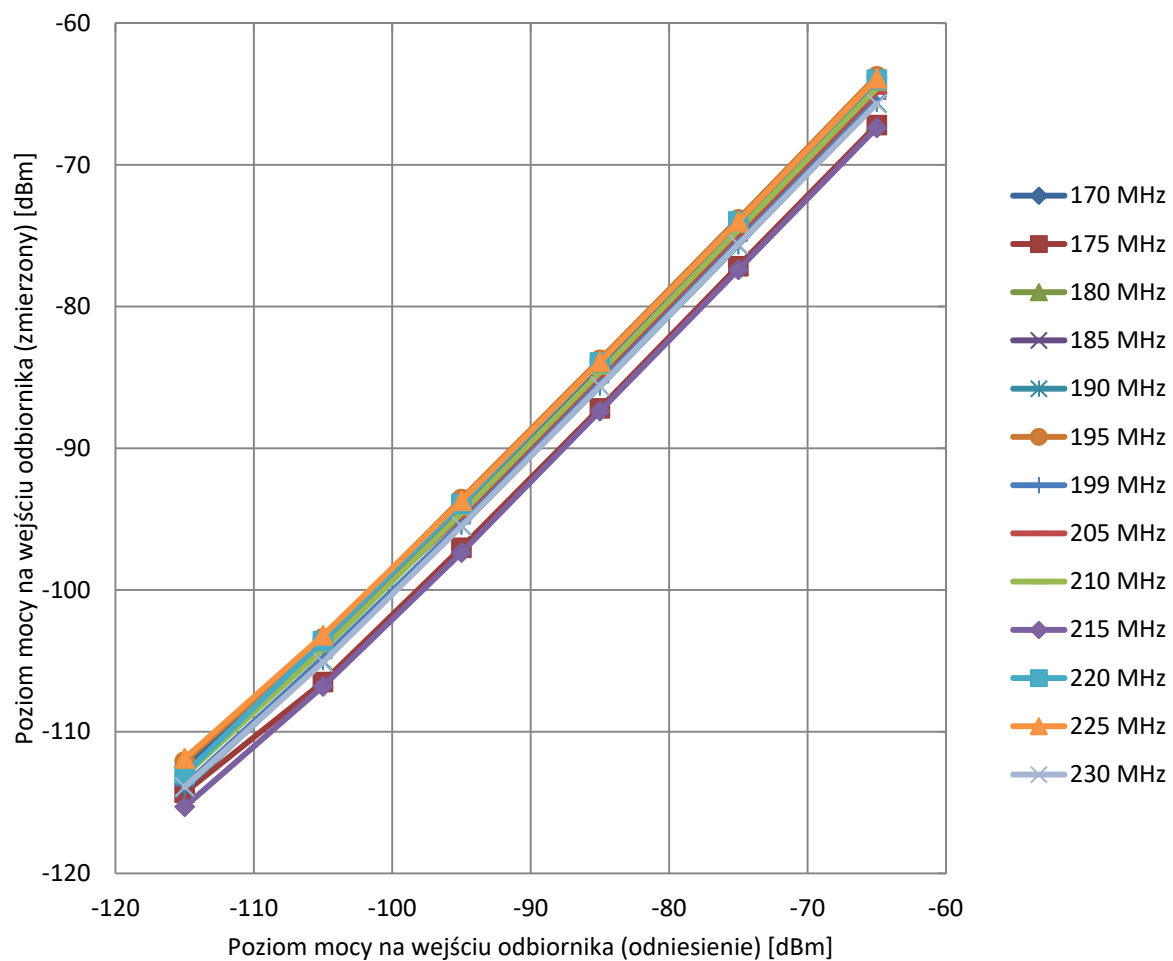
Tabela 16: Wyznaczony poziom mocy po kalibracji.

| Poziom<br>sygnału<br>$P_{out}$<br>[dBm] | Straty<br>dopasowana<br>$L_{imp}$ [dB] | Tłumienie<br>złączek<br>$L_z$ [dB] | Poziom<br>na<br>wejściu<br>tunera<br>$P_{in}$<br>[dBm] | Poziom skorygowany [dBm] |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---|--|------------------------------------|--|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|   |  |                                    |  | 170 MHz                  | 175 MHz | 180 MHz | 185 MHz | 190 MHz | 195 MHz | 199 MHz | 205 MHz | 210 MHz | 215 MHz | 220 MHz | 225 MHz | 230 MHz |
| -107,6                                  | 6,4                                    | 1                                  | -115   | -112,60                  | -114,3  | -111,9  | -113    | -114    | -112,1  | -113,8  | -113,1  | -113,1  | -115,3  | -113    | -111,9  | -113,9  |

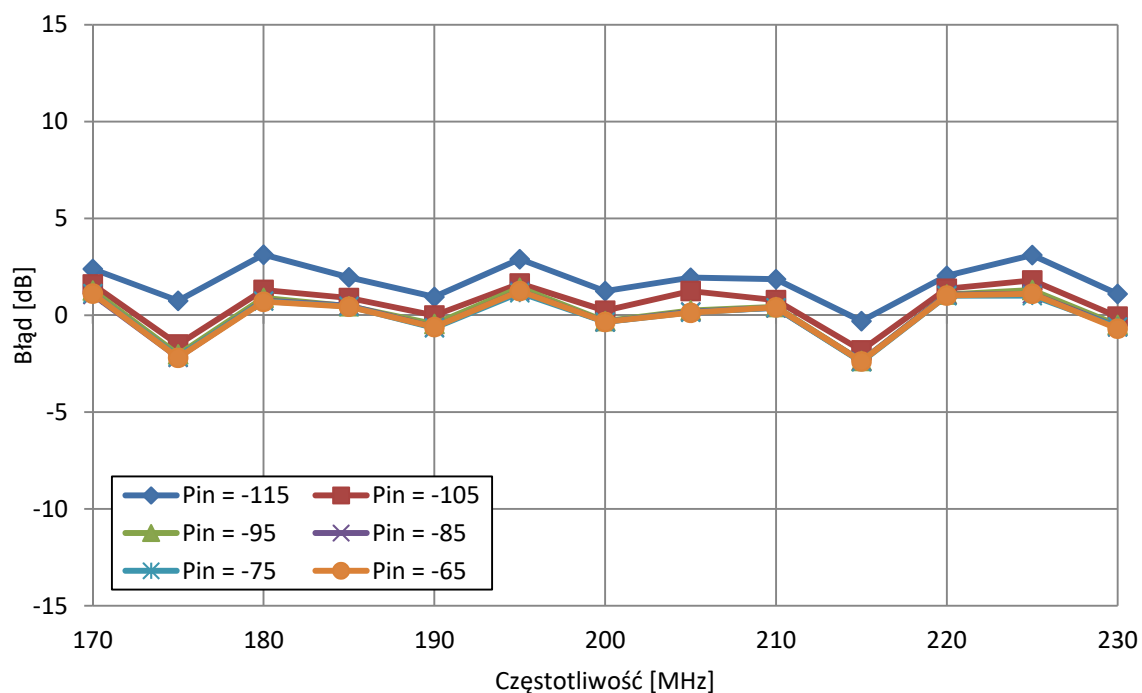
|       |     |   |      |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------|-----|---|------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| -97,6 | 6,4 | 1 | -105 | -103,40 | -106,5 | -103,7 | -104,1 | -105   | -103,4 | -104,8 | -103,8 | -104,2 | -106,8 | -103,6 | -103,2 | -105,1 |
| -87,6 | 6,4 | 1 | -95  | -93,71  | -97,02 | -94,1  | -94,53 | -95,45 | -93,58 | -95,3  | -94,75 | -94,57 | -97,36 | -93,93 | -93,7  | -95,5  |
| -77,6 | 6,4 | 1 | -85  | -83,92  | -87,18 | -84,24 | -84,5  | -85,62 | -83,75 | -85,34 | -84,82 | -84,62 | -87,37 | -83,94 | -83,89 | -85,6  |
| -67,6 | 6,4 | 1 | -75  | -73,86  | -77,15 | -74,27 | -74,54 | -75,65 | -73,84 | -75,35 | -74,85 | -74,61 | -77,4  | -73,99 | -73,99 | -75,6  |
| -57,6 | 6,4 | 1 | -65  | -63,87  | -67,19 | -64,3  | -64,56 | -65,61 | -63,75 | -65,34 | -64,87 | -64,59 | -67,38 | -63,98 | -63,89 | -65,69 |

**Tabela 17: Różnica między poziomem odniesienia a poziomem wyznaczonym.**

| Poziom<br>sygnału<br>$P_{out}$<br>[dBm] | Straty<br>dopasowana<br>$L_{imp}$ [dB] | Tłumienie<br>złączek<br>$L_z$ [dB]w | Poziom<br>na<br>wejściu<br>tunera<br>$P_{in}$<br>[dBm] | Błąd [dB] |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---|--|-------------------------------------|--|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|   |  |                                     |  | 170 MHz   | 175 MHz | 180 MHz | 185 MHz | 190 MHz | 195 MHz | 199 MHz | 205 MHz | 210 MHz | 215 MHz | 220 MHz | 225 MHz | 230 MHz |
| -107,6                                  | 6,4                                    | 1                                   | -115   | 2,39      | 0,75    | 3,13    | 1,96    | 0,95    | 2,90    | 1,25    | 1,94    | 1,86    | -0,30   | 2,04    | 3,11    | 1,10    |
| -97,6                                   | 6,4                                    | 1                                   | -105   | 1,59      | -1,51   | 1,31    | 0,89    | -0,01   | 1,64    | 0,24    | 1,25    | 0,78    | -1,81   | 1,37    | 1,80    | -0,07   |
| -87,6                                   | 6,4                                    | 1                                   | -95  | 1,28      | -2,02   | 0,90    | 0,47    | -0,45   | 1,42    | -0,30   | 0,25    | 0,43    | -2,36   | 1,07    | 1,30    | -0,50   |
| -77,6                                   | 6,4                                    | 1                                   | -85  | 1,07      | -2,18   | 0,76    | 0,50    | -0,62   | 1,25    | -0,34   | 0,18    | 0,38    | -2,37   | 1,06    | 1,11    | -0,60   |
| -67,6                                   | 6,4                                    | 1                                   | -75  | 1,13      | -2,15   | 0,73    | 0,46    | -0,65   | 1,16    | -0,35   | 0,15    | 0,39    | -2,40   | 1,01    | 1,01    | -0,60   |
| -57,6                                   | 6,4                                    | 1                                   | -65  | 1,12      | -2,19   | 0,70    | 0,44    | -0,61   | 1,25    | -0,34   | 0,13    | 0,41    | -2,38   | 1,02    | 1,11    | -0,69   |



Rysunek 29: Poziom mocy wyznaczony na wejściu odbiornika RTL-SDR względem poziomu mocy odniesienia



Rysunek 30: Wartość błędu dla różnych poziomów mocy w funkcji częstotliwości

## 5.6 Weryfikacja laboratoryjna

Weryfikację laboratoryjną przeprowadzono z wykorzystaniem generowanego sztucznie sygnału z modulacją FM oraz na podstawie odebranego sygnału DAB+, emitowanego przez RTON Żórawina.

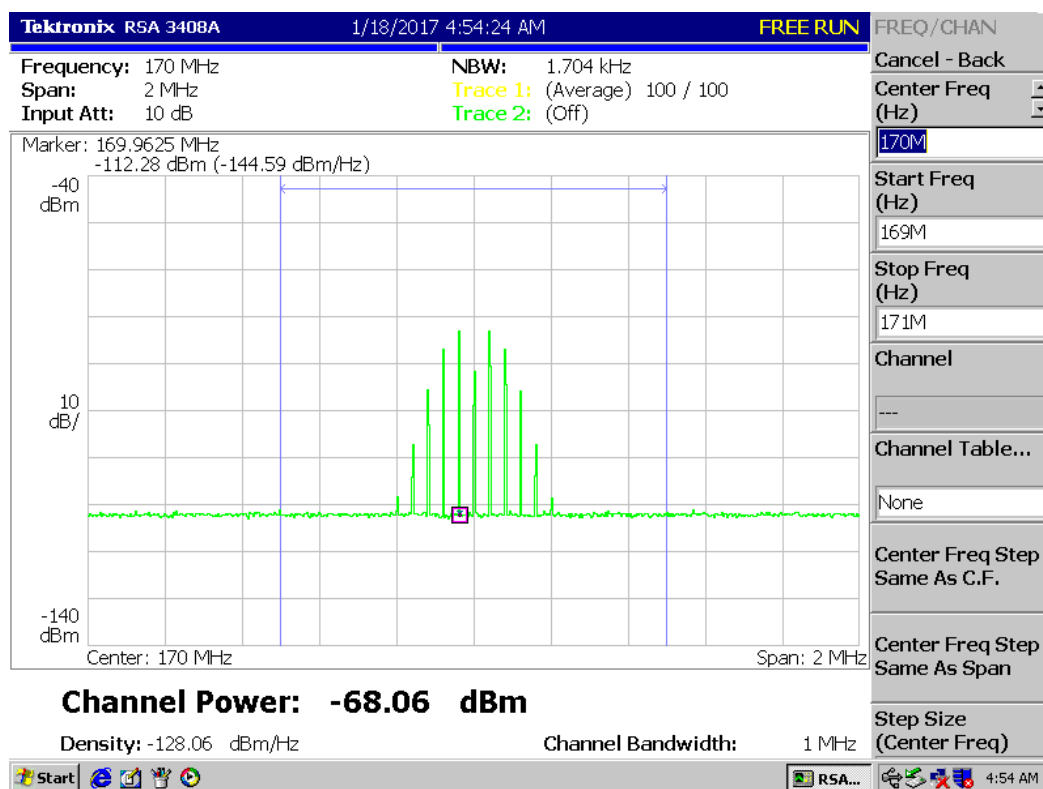
W pierwszym przypadku na wejście odbiornika RTL podano sygnał sinus modulowany FM o dewiacji 80 kHz. Wyniki porównano z uzyskanymi na analizatorze widma Tektronix RSA3408A, uwzględniając straty toru i dopasowania (tabela 18).

Tabela 18: Tabela wyników pomiarów sygnału generowanego

| Lp. | Częstotliwość<br>środkowa<br>[MHz] | Poziom mocy w<br>kanale 1 MHz (RTL-<br>SDR) [dBm] | Poziom mocy w kanale<br>1 MHz (Tektronix)<br>[dBm] | Różnica [dB] |
|-----|------------------------------------|---|--|--------------|
| 1   | 170                                | -66,51  | -68,07   | 1,56         |
| 2   | 180                                | -65,71  | -68,06   | 2,35         |
| 3   | 190                                | -66,1   | -68,01   | 1,91         |
| 4   | 200                                | -66,21  | -67,97   | 1,76         |
| 5   | 210                                | -66,49  | -67,99   | 1,5          |

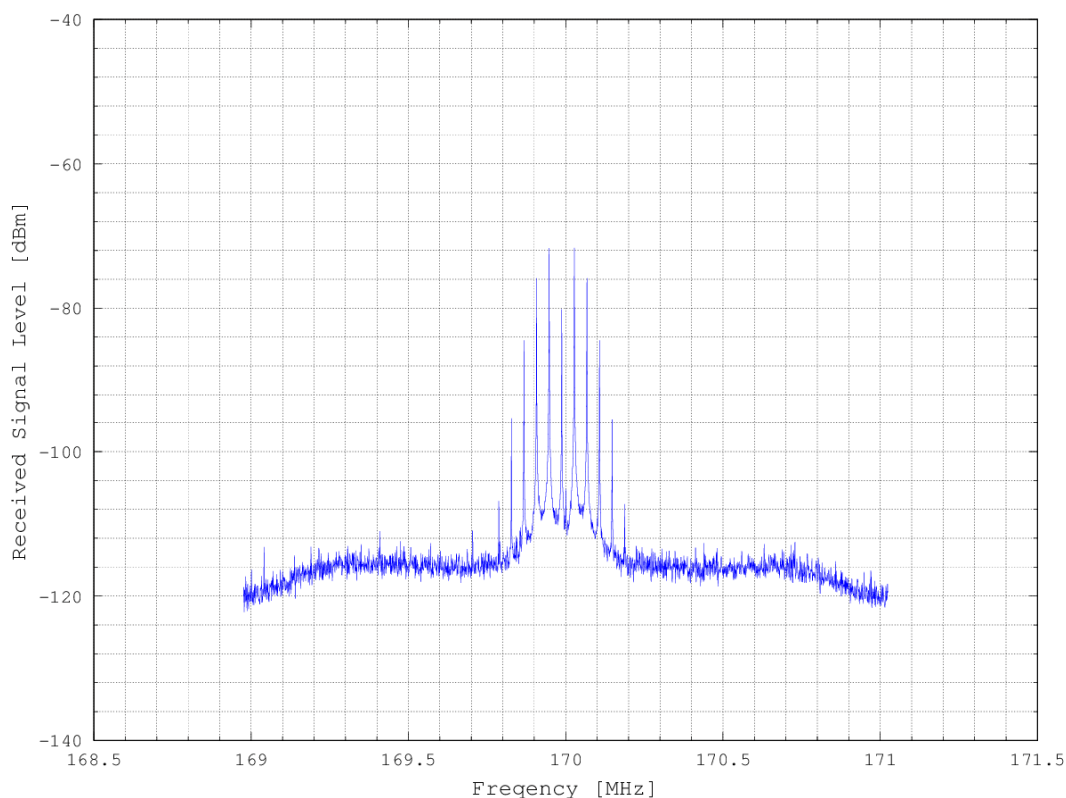
|   |     |        |        |      |
|---|-----|--------|--------|------|
| 6 | 220 | -66,4  | -68,01 | 1,61 |
| 7 | 230 | -65,87 | -68,03 | 2,16 |

Na rysunkach 31-32 poniżej zaprezentowano mierzony sygnał na poszczególnych przyrządach pomiarowych.



Rysunek 31: Wyniki zarejestrowane na analizatorze widma Tektronix RSA3408A





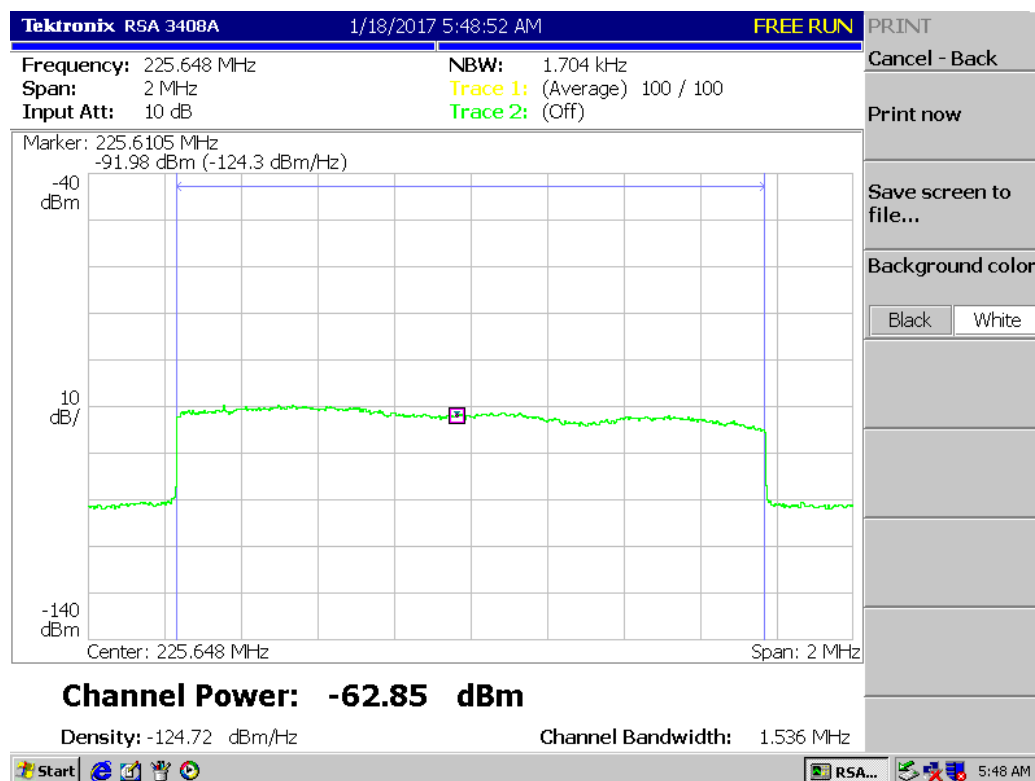
*Rysunek 32: Wyniki zarejestrowane na analizatorze widma na opracowanym demonstratorze*

Kolejnym laboratoryjnym testem weryfikacyjnym był pomiar fizycznego sygnału DAB+. W tym przypadku w dalszym ciągu korzystano z przełączanego ręcznie toru pomiarowego. Sygnały więc nie były mierzone w tym samym czasie, a jeden po drugim. Dodatkowo wyniki były mierzone przenośnym miernikiem Promax HD Ranger+. W tabeli 19 zaprezentowano wyniki pomiarów.

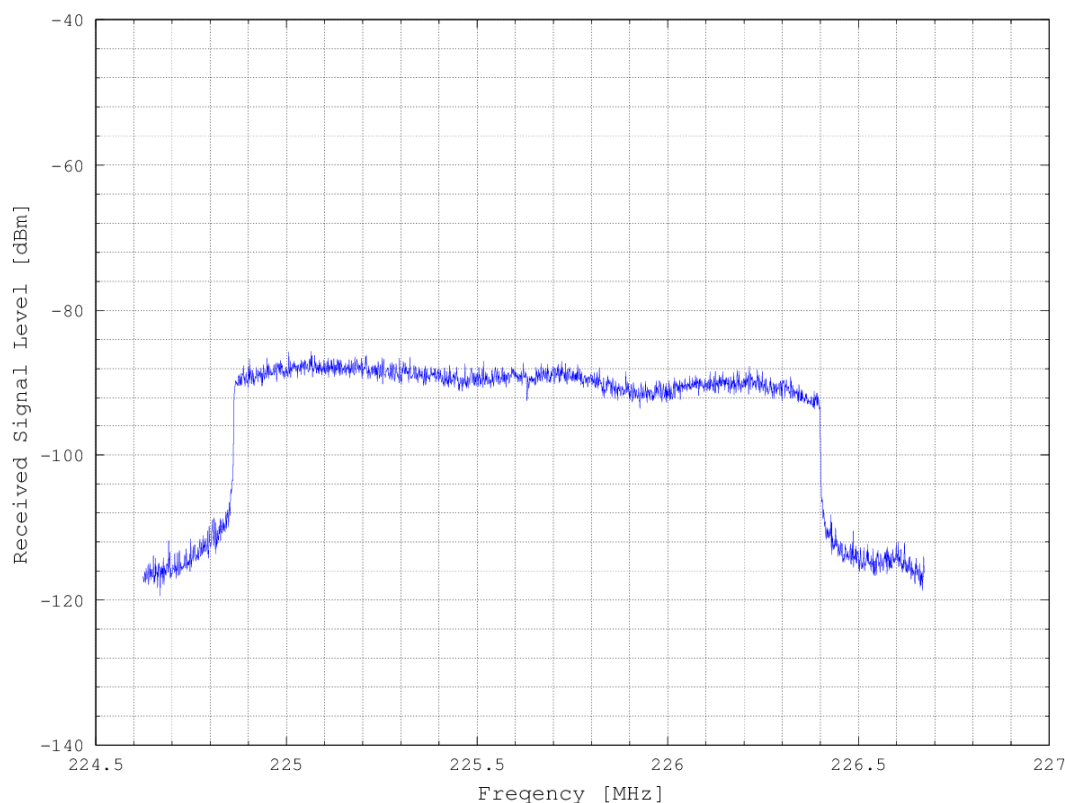
**Tabela 19: Tabela wyników pomiarów odebranego sygnału DAB+ (szerokość kanału 1,536 MHz)**

| Lp | Poziom mocy<br>w kanale<br>(RTL-SDR)<br>[dBm] | Poziom mocy<br>w kanale<br>(Tektronix)<br>[dBm] | Poziom mocy<br>w kanale<br>(Promax)<br>[dBm] | Różnica<br>(RTL-SDR) –<br>(Tektronix)<br>[dB] | Różnica<br>(RTL-SDR) –<br>(Promax)<br>[dB] |
|----|---|---|--|---|--|
| 1  | -62,481                                       | -70,2   | -70,0  | 7,719   | 7,519                                      |
| 2  | -59,736                                       | -65,30  | -66,5  | 5,564   | 6,764                                      |
| 3  | -57,442                                       | -62,85  | -63,6  | 5,408   | 6,158                                      |
| 4  | -71,677                                       | -78,00  | -80,3  | 6,323   | 8,623                                      |
| 5  | -64,401                                       | -69,70  | -70,6  | 5,299   | 6,199                                      |

Na rysunkach 33-34 poniżej zaprezentowano odpowiadający sobie mierzony sygnał na poszczególnych przyrządach pomiarowych.



Rysunek 33: Wyniki pomiaru sygnału DAB+ zarejestrowane na analizatorze widma Tektronix RSA3408A



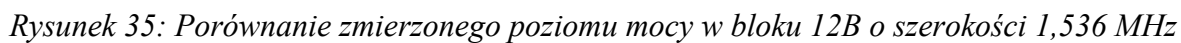
*Rysunek 343: Wyniki pomiaru sygnału DAB+ zarejestrowane na analizatorze widma na opracowanym demonstratorze*

W przypadku pomiaru szerokopasmowego DAB+, zaobserwowano odchyłkę około 6 dB od wartości oczekiwanej. Wprowadzono tym samym tą poprawkę empiryczną do wyznaczonej i zaprezentowanej wcześniej korekty K (wg wzoru 1).

## 5.7 Weryfikacja polowa

Uwzględniając korekty opracowane w toku prac laboratoryjnych, wykonano weryfikację polową, dokonując pomiaru poziomu mocy sygnału DAB+ w bloku 12B o szerokości 1,536 MHz z wykorzystaniem opracowanej platformy oraz przyrządu Promax HD Ranger+, dedykowanego do tego typu pomiarów. Testy miały również za zadanie weryfikację poprawności odczytu GPS oraz transmisji danych (przekazywania danych i ich wizualizacji na żywo).

Pomiary były wykonywane na dworze wzdłuż budynku Instytutu Łączności przy ulicy Swojczyckiej 38 we Wrocławiu. Antena odbiorcza była umieszczona na wysokości 2 m. Wyniki zbierane były od strony północnej budynku. Kilka punktów pomiarowych wyznaczono w budynku. W ramach analiz wykonano porównanie wskazań poziomu mocy odbieranej poprzez antenę o charakterystyce dookólnej. Na rysunku 35 przedstawiono porównanie wyników.



The scatter plot displays the relationship between geographic longitude (Długość geograficzna [stopnie]) on the x-axis and geographic latitude (Szerokość geograficzna [stopnie]) on the y-axis. The x-axis ranges from 17,1136 to 17,1152, and the y-axis ranges from 51,1146 to 51,116. Two datasets are plotted: Promax HD Ranger+ (blue diamonds) and RTL-SDR2 (red squares). The RTL-SDR2 dataset generally shows higher latitude values for a given longitude compared to the Promax HD Ranger+ dataset.

| Długość geograficzna [stopnie] | Szerokość geograficzna [stopnie] (Promax HD Ranger+) | Szerokość geograficzna [stopnie] (RTL-SDR2) |
|--------------------------------|--|---|
| 17,1136                        |  | 51,1156                                     |
| 17,1137                        | 51,1155  | 51,1156                                     |
| 17,1138                        | 51,1156  | 51,1156                                     |
| 17,1138                        | 51,1157  | 51,1157                                     |
| 17,1138                        | 51,1158  | 51,1158                                     |
| 17,1138                        | 51,1159  | 51,1159                                     |
| 17,1139                        | 51,1155  | 51,1155                                     |
| 17,1140                        | 51,1155  | 51,1155                                     |
| 17,1141                        | 51,1154  | 51,1154                                     |
| 17,1142                        | 51,1154  | 51,1154                                     |
| 17,1143                        | 51,1154  | 51,1154                                     |
| 17,1144                        | 51,1153  | 51,1153                                     |
| 17,1145                        | 51,1153  | 51,1153                                     |
| 17,1146                        | 51,1153  | 51,1153                                     |
| 17,1147                        | 51,1152  | 51,1152                                     |
| 17,1148                        | 51,1152  | 51,1152                                     |
| 17,1149                        | 51,1152  | 51,1152                                     |
| 17,1150                        | 51,1151  | 51,1151                                     |
| 17,1151                        | 51,1151  | 51,1151                                     |
| 17,1152                        | 51,1151  | 51,1151                                     |

*Rysunek 36 Rozrzut punktów pomiarowych*

## 5.8 Wnioski

W rozdziale niniejszym opisano zrealizowany demonstrator pozwalający na prowadzenie analiz zmierzonych wartości pola elektrycznego. Demonstrator, co wykazano, umożliwia automatyczną obróbkę i przekazywanie wyników do serwera zdalnego, które z kolei są automatycznie prezentowane w dedykowanym serwisie WWW. Przedstawione wyniki odbiegają nieznacznie od wartości wzorcowych i muszą być traktowane jako wartości obarczone dużą niepewnością pomiarową. Tym samym na obecną chwilę dane te są raczej pewnym wskaźnikiem mocy sygnału. Zaobserwowano, że układ RTL-SDR w połączeniu z zastosowanym oprogramowaniem wprowadza pewną automatyczną kontrolę zysku mierzonego, co w przypadku testów polowych, objawia się wygładzaniem sygnału (mocne sygnały są tłumione, słabe wzmacniane). Zdaniem autorów istnieje możliwość wyeliminowania tych niedogodności poprzez zmianę oprogramowania lub wykorzystanie innego rozwiązania RTL-SDR. Opracowany demonstrator może być rozwijany w dalszym ciągu jako platforma niskobudżetowa lub profesjonalna (bazująca na droższych urządzeniach profesjonalnych). Istnieje możliwość jej skalowania co w przyszłości mogłoby się przyczynić np. do stworzenia automatycznej sieci pomiarowej (np. natężenia pola lub innych wskaźników sygnału) z opcją prezentacji danych w postaci graficznej/tabelarycznej dla końcowych użytkowników.

### Literatura do rozdziału 5:

- [1] N. Arya, K. Sharma i S. Gurinder , „Analysis of channels for Software Defined Radio using LabVIEW,” *International Journal of Recent Research Aspects*, tom 1, nr 3, pp. 1-6, 2014.
- [2] M. Joseph, „Software Radios - Survey, Critical Evaluation and Future Directions,” *NTC-92: National Telesystems Conference*, pp. 13/15-13/23, 1992.
- [3] A. Fanan, N. Riley, M. Mehdawi, M. Ammar i M. Zolfaghari, Comparison of Spectrum Occupancy Measurements using Software Defined Radio RTL-SDR with a Conventional Spectrum Analyzer approach.
- [4] Lovejoy, M. A. Wickert i M. R., Hands-on Software Defined Radio experiments with the low-cost RTL-SDR dongle.
- [5] Vachhhani, Deepak, Vohra, Arusha, Dubey i Khyati, Investigating GSM Control Channels with RTL-SDR and GNU Radio.
- [6] E. G. Sierra i G. A. R. Arroyave, Low Cost SDR Spectrum Analyzer and Analog Radio Receiver Using GNU Radio, Raspberry Pi2 and SDR-RTL Dongle.

- [7] S. Santhosh, S. Arunselvan, S. Aazam, R. Gandhiraj i K. Soman, Multicast WebSDR implementation using RTL-SDR.
- [8] H. Mohamed, P. Lazaridis, D. Upton, U. Khan, B. Saeed, A. Jaber, Y. Zhang, P. Mather, M. F. Q. Vieira, K. W. Barlee, D. S. W. Atkinson, A. Mihovska, L. Gavrilovska i I. A. Glover, Partial Discharge Detection Using Low Cost RTL-SDR Model for Wideband Spectrum Sensing.
- [9] „<http://www.rtlsdr.com/2013/07/receiving-decoding-and-plotting-ais-using-a-rtl-sdr/>,” [Online].
- [10] B. Stewart, K. Barlee, D. Atkinson i L. Crockett, Software Defined Radio using MATLAB and Simulink and the RTL-SDR, Strathclyde Academic Media, 2015.
- [11] S. Mahmood, M. T. Mushtaq i G. Jaffer, Cost Efficient Design Approach for Receiving the NOAA Weather Satellites Data.
- [12] N. Tayfun, A Review of Software Defined Radio Enabling Technologies.

## 6 Podsumowanie

Przeprowadzone analizy i badania laboratoryjne a także pomiary w terenie i próby eksperymentalne wskazują na złożoność zagadnień nowoczesnych systemów łączności zwiększających efektywność wykorzystania widma radiowego takich jak Cognitive Radio (CR) czy Ultra Wide-Band (UWB), które powinny być rozwijane i kontynuowane w przyszłości. Na szczególną uwagę zasługuje dostrzeżony fakt brak regulacji krajowych pozwalają na formalne wykorzystywanie tych nowoczesnych technik w Polsce, który powinien być wskazany na forum regulacyjnym (tj. UKE, MC). Przeprowadzone prace należy potraktować więc jako kolejny etap w kierunku dalszego ich rozwoju. Można by w nim przeprowadzić np. także badania innych typów urządzeń UWB (np. UWB-IR), które w ostatnim okresie zaczynają być dostępne czy rozwinąć metody detekcji widma pasm UHF i VHF za pomocą siatki urządzeń pomiarowych. Ciekawą aplikacją zastosowań obu typów transmisji (CR i UWB) współużytkujących widmo radiowego z innymi systemami jest wykorzystanie ich np. do celów medycznych zarówno w szpitalach gdzie występuje wiele czujników i transmisji (np. podczas operacji) jak i u pacjentów w domach, a także do zastosowań transmisji Internetu Rzeczy IoT gdzie potrzebny jest chwilowy dostęp do wolnej części widma radiowego w najbardziej korzystnej z punktu widzenia propagacji fal radiowych częstotliwości radiowych. Opracowanie aplikacji umożliwiającej rejestrację danych o stanie widma radiowego i ich wizualizację przez Internet pozwala na potencjalny jej dalszy rozwój i wykorzystanie w celu automatycznej detekcji i transmisji CR we wszystkich przyszłych sieciach bezprzewodowych, nad którymi trwają podobne prace także w innych ośrodkach na świecie.