



**Samodzielna Pracownia
Radiokomunikacji Morskiej w Gdańsku (P-8)**

**Platforma propagacji
Badania uwarunkowań propagacyjnych
w morskim paśmie VHF**

Praca nr 08300036

Gdańsk, grudzień 2006

Platforma propagacji: Badania uwarunkowań propagacyjnych w morskim paśmie VHF

Praca nr 08300036

Słowa kluczowe: propagacja fal radiowych; prognozowanie zasięgów; morskie pasmo VHF

Kierownik pracy: dr inż. Rafał Niski

Wykonawcy pracy: mgr inż. Stefan Gencza
mgr inż. Jerzy Kazenas
mgr inż. Mirosław Radziwanowski
dr inż. Jacek Stefański

Kierownik Zakładu: dr inż. Rafał Niski

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	4
2. Uwarunkowania propagacyjne w łączności ultrakrótkofalowej na morzu	6
3. Badania pomiarowe w warunkach rzeczywistych	13
3.1. Przyrządy pomiarowe wykorzystane w trakcie pomiarów	13
3.2. Stacje nadawcze wykorzystane w trakcie pomiarów	15
3.3. Punkty pomiarowe	16
3.4. Warunki klimatyczne podczas pomiarów	17
3.5. Opis procedury pomiarowej.....	18
4. Analiza wyników pomiarowych.....	19
4.1. Wyniki badań pomiarowych	19
4.2. Aproksymacja tłumienia propagacyjnego metodą regresji liniowej z wieloma zmiennymi niezależnymi	22
4.3. Porównanie proponowanego modelu z zaleceniami ITU	23
5. Podsumowanie i wnioski.....	26
Załącznik 1.....	27
Załącznik 2.....	44
Załącznik 3.....	46
Załącznik 4.....	49
Bibliografia	51

1. Wprowadzenie

Jednym z ważniejszych elementów radiokomunikacji morskiej jest system łączności wykorzystujący zakres fal ultrakrótkich [2]. Można tu wyróżnić dwa przypadki: system łączności przybrzeżnej, realizowany za pomocą sieci stacji bazowych umieszczonych na lądzie oraz system łączności bezpośredniej między poruszającymi się jednostkami. W pierwszym przypadku istnieje możliwość odpowiedniego wyboru miejsc usytuowania anten stacji nadawczych, które umożliwią uzyskanie optymalnego pokrycia danego akwenu przybrzeżnego. Natomiast w przypadku łączności pomiędzy dwoma statkami, obszar pracy systemu jest zmienny i zależy od aktualnych pozycji jednostek. Ponadto, ze względu na brak możliwości dowolnego umiejscowienia anten na jednostkach pływających, należy się spodziewać znacznie mniejszych zasięgów działania systemu. Z kolei w przypadku łączności przybrzeżnej należy wziąć pod uwagę fakt, że trasa propagacyjna może częściowo przebiegać nad lądem, szczególnie w przypadku, gdy maszty anten nadawczych znajdują się na obiektach lub naturalnych wzniesieniach terenu oddalonych znacząco od linii brzegowej.

Międzynarodowa Organizacja ds. Morskich IMO (*International Maritime Organization*) w Rezolucji A.704 [4] podaje jedynie sposób wyznaczenia obszaru A1 GMDSS, przy czym zaleca jego weryfikację pomiarową. Zasięgi w morskim paśmie VHF można wyznaczać stosując różne metody np. CCIR 370 [7], wykorzystującą krzywe propagacyjne. Jednak każdorazowo zaleca się przeprowadzenie weryfikacji osiągniętych efektywnych zasięgów poprzez pomiar natężenia pola elektromagnetycznego. Modele propagacyjne, zalecane przez IMO, nie zostały zweryfikowane w morskiej strefie przybrzeżnej Morza Bałtyckiego. Do tej pory projektowanie stacji nadbrzeżnych dla tej strefy realizowane było w oparciu o modele propagacyjne zweryfikowane jedynie dla warunków lądowych, które nie uwzględniały specyfiki środowiska morskiego, a w szczególności przejścia ląd-morze. W związku z tym uzyskane rezultaty odbiegały znacznie od rzeczywistych zasięgów stacji nadbrzeżnych.

Zgodnie z zaleceniami IMO [3,5,6], proces szacowania zasięgów podczas projektowania infrastruktury radiowej wymaga weryfikacji otrzymanych wyników za pomocą odpowiednich pomiarów w warunkach rzeczywistych. W związku z powyższym, autorzy niniejszej pracy podjęli się zbadania poprawności szacowania zasięgów przybrzeżnych stacji radiowych, pracujących w morskim paśmie VHF, w oparciu o zalecenie ITU [1], poprzez przeprowadzenie stosownych badań pomiarowych.

Celem projektu jest analiza metod prognozowania zasięgów nadbrzeżnych stacji bazowych w morskim paśmie VHF i na jej podstawie opracowanie modelu propagacyjnego dla środowiska morskiego, który zostanie zweryfikowany w warunkach rzeczywistych na podstawie przeprowadzonych badań pomiarowych.

Praca składa się z wprowadzenia, 4 rozdziałów, 4 załączników oraz bibliografii zawierającej 14 pozycji. W rozdziale pierwszym opisano uwarunkowania propagacyjne w łączności ultrakrótkofalowej na morzu, w tym metodę wyznaczania zasięgów stacji radiowych w oparciu o Zalecenie ITU-R P.1546-2 [1]. W rozdziale drugim przedstawiono założenia przeprowadzonych badań pomiarowych w warunkach rzeczywistych wraz z zastosowaną procedurą pomiarową. Rozdział trzeci prezentuje wyniki przeprowadzonych badań oraz ich analizę. Przedstawiono tu model pozwalający na szacowanie tłumienia propagacyjnego na trasach morskich, uzyskany na podstawie analizy wyników przeprowadzonych pomiarów, przy wykorzystaniu metody regresji liniowej z wieloma zmiennymi niezależnymi. Rozdział czwarty zawiera podsumowanie i wnioski do niniejszej pracy. Pierwszy z czterech załączników zawiera wyniki przeprowadzonych pomiarów natężenia pola sygnału

odbieranego, drugi opisuje pomiary współczynnika fali stojącej oraz tłumienności kabla pomiarowego. Załącznik trzeci zawiera opis analizy regresji wielowymiarowej, która została wykorzystana do opracowania modelu empirycznego do szacowania tłumienia tras propagacyjnych w warunkach morskich, na podstawie wyników pomiarowych. Natomiast załącznik czwarty prezentuje sposób implementacji tej metody do analizy wyników pomiarowych.

2. Uwarunkowania propagacyjne w łączności ultrakrótkofalowej na morzu

Analiza uwarunkowań propagacyjnych dla tras morskich jest ułatwiona, ze względu na to, że nie występuje tu tak istotny, jak w przypadku tras lądowych, wpływ ukształtowania terenu, infrastruktury i zurbanizowania środowiska. Należy jednak uwzględnić fakt, że fale radiowe są stosunkowo dobrze odbijane przez powierzchnię morza. Na skutek tego do anteny na jednostce pływającej oprócz fali bezpośredniej dochodzi na ogół kilka fal odbitych. Wynikiem propagacji wielodrogowej są zaniki interferencyjne sygnałów obniżające jakość transmisji systemów, w szczególności cyfrowych. Najmniej korzystna sytuacja występuje przy gładkiej powierzchni spokojnego morza, gdy mała liczba fal odbitych powoduje, że prawdopodobieństwo wystąpienia głębokich zaników jest stosunkowo duże. Natomiast w przypadku wzburzonego morza, gdzie liczba fal odbitych jest duża, a fazy poszczególnych składowych mają charakter przypadkowy oraz dominuje fala bezpośrednia, prawdopodobieństwo wystąpienia głębokich zaników jest niewielkie. Ponadto przyczyną propagacji wielodrogowej mogą być również odbicia od elementów konstrukcyjnych i wyposażenia jednostki pływającej [13].

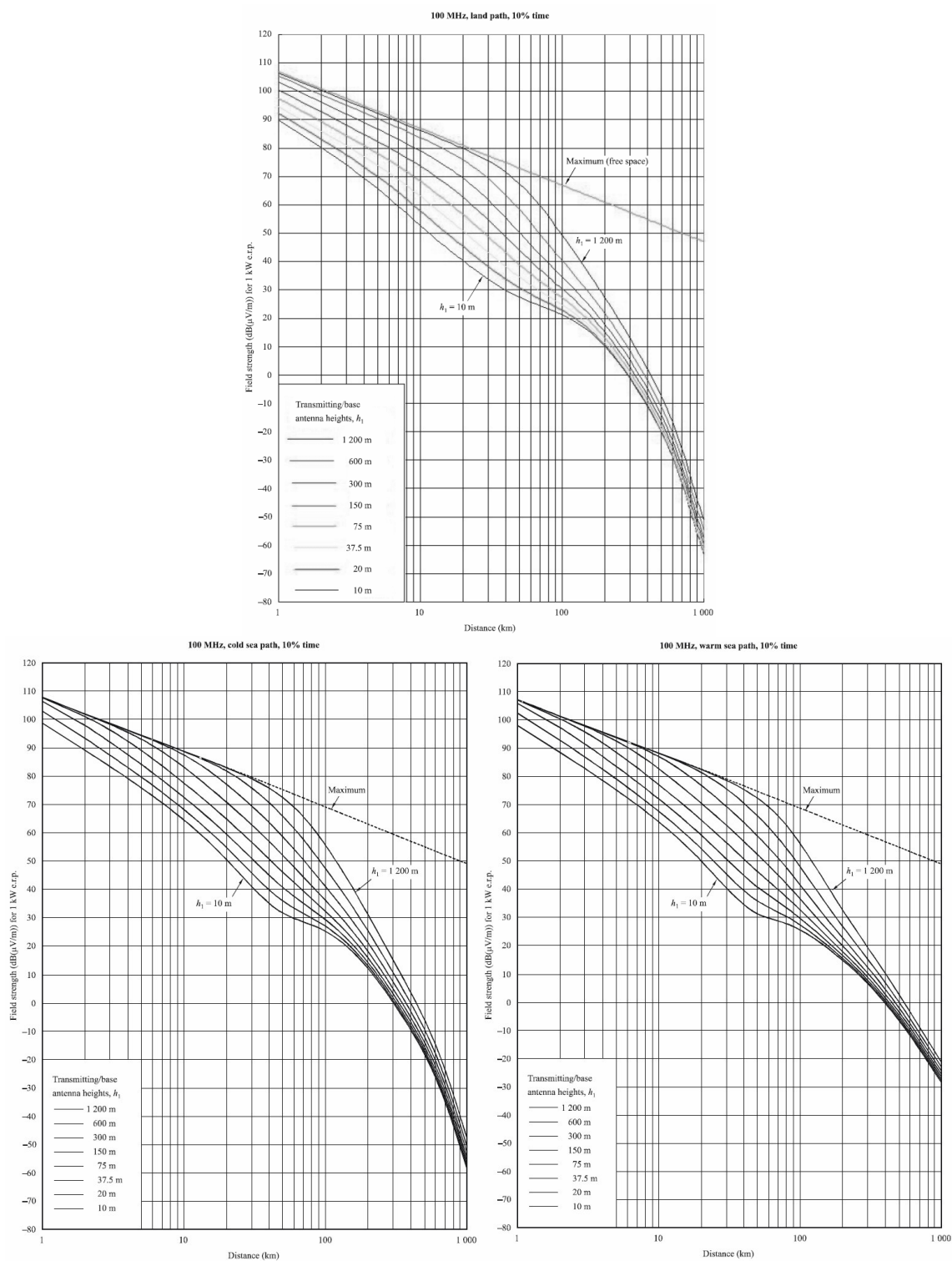
Na propagację fal ultrakrótkich istotny wpływ ma zjawisko refrakcji atmosferycznej [10,12,13], zależnej od rozkładu wielkości meteorologicznych takich jak ciśnienie, temperatura powietrza, czy prężność pary wodnej. Zjawisko to powoduje, że warunki propagacyjne nad morzem są korzystniejsze niż nad lądem, jednak można zauważyć zależność od stref klimatycznych. W przypadku mórz ciepłych, np. Morza Śródziemnego, uzyskiwane zasięgi są większe, przy tych samych parametrach systemu, niż w przypadku mórz zimnych, jak np. Morza Północnego, czy Morza Bałtyckiego.

Nie opracowano do tej pory modelu propagacyjnego przeznaczonego wyłącznie dla naziemnych morskich systemów ultrakrótkofalowych. ITU-R zaleca do prowizorycznego stosowania modele propagacyjne przeznaczone dla zakresu częstotliwości od 30 MHz do 3 GHz [1,11]. Ponadto wskazana jest weryfikacja wyznaczonych na tej podstawie zasięgów na drodze pomiarowej [3].

Podstawowym elementem obecnie obowiązującego Zalecenia ITU-R P.1546-2 [1] są tak zwane statystyczne krzywe propagacji fal ultrakrótkich. Prezentowany w nim model był wielokrotnie modyfikowany i poprawiany, jednak zasadnicza koncepcja statystycznych krzywych propagacji nie uległa zmianie. Polega ona na tym, że owe krzywe podają w funkcji odległości wartości natężenia pola, których przekroczenie należy oczekiwać z określonym prawdopodobieństwem przestrzennym i czasowym. Wartości obu tych prawdopodobieństw są dobrane stosownie do wymagań definicji i metody obliczania zasięgów w radiokomunikacji. Mediany przestrzenno-czasowe, czyli krzywe E(50,50), obrazują wartości sprawdzające się w 50 % miejsc i 50 % czasu i są przeznaczone do szacowania natężenia pola użytecznego, zaś krzywe E(50,10) oraz E(50,1), sprawdzają się w 50 % miejsc i odpowiednio w 10 % lub 1 % czasu, pozwalają na wyznaczenie natężenia pola zakłóceń.

Przedstawione statystyczne krzywe propagacji zostały opracowane na bazie wyników szeroko zakrojonych badań pomiarowych, przeprowadzonych w różnych strefach klimatycznych. W przypadku tras lądowych badania te przeprowadzono w Europie i Ameryce Północnej, natomiast dla tras morskich rozpatrywano dwa przypadki: morza zimnego na przykładzie regionu Morza Północnego oraz morza ciepłego na przykładzie regionu Morza Śródziemnego.

Przykładowe krzywe E(50,10) dla trasy lądowej i dwóch tras morskich (morze zimne i morze ciepłe) dla częstotliwości 100 MHz pokazano na rysunku 1 [1].



Rys. 1. Statystyczne krzywe propagacji E(50,10) dla częstotliwości 100 MHz dla trasy lądowej i tras morskich [1].

W tabeli 1 przedstawiono nominalne wartości parametrów charakteryzujących statystyczne krzywe propagacji.

Tabela 1. Nominalne wartości parametrów dla statystycznych krzywych propagacji $E = f(d)$.

Częstotliwość nominalna	100 MHz, 600 MHz, 2 GHz
Zasięg	od 1 km do 1000 km
Nominalna moc nadajnika P_{erp}	1 kW (e.r.p.)
Nominalna wysokość anteny nadawczej h_1	10 m, 20 m, 37.5 m, 75 m, 150 m, 300 m, 600 m, 1200 m
Nominalna wysokość anteny odbiorczej h_2	10 m
Rodzaj trasy propagacyjnej	E(50,50), E(50,10), E(50,1) ląd E(50,50) morze E(50,10), E(50,1) morze zimne E(50,10), E(50,1) morze ciepłe

Jak widać z tabeli 1, krzywe propagacji zostały podane w postaci trzech zestawów krzywych, dla tzw. częstotliwości nominalnych: 100 MHz dla pasma od 30 MHz do 300 MHz; 600 MHz dla pasma od 300 MHz do 1 GHz oraz 2 GHz dla pasma od 1 GHz do 3 GHz. Na podstawie tych zestawów krzywych można przewidywać wartości natężenia pola dla dowolnej częstotliwości z zakresu od 30 MHz do 3 GHz za pomocą odpowiednich reguł interpolacyjnych względnie ekstrapolacyjnych. Obliczenie wartości natężenia pola $E_{uż}$ dla konkretnej częstotliwości $f_{uż}$ powyżej 100 MHz należy dokonać zgodnie z zależnością:

$$E_{uż} = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \frac{\log(f_{uż}/f_{inf})}{\log(f_{sup}/f_{inf})} \quad [\text{dB}(\mu\text{V/m})] \quad (1)$$

gdzie:

f_{inf} – częstotliwość nominalna niższa,

f_{sup} – częstotliwość nominalna większa,

E_{inf} – natężenie pola przy częstotliwości f_{inf} ,

E_{sup} – natężenie pola przy częstotliwości f_{sup} ,

przy czym:

$$f_{inf} = \begin{cases} 100\text{MHz} & \text{gdy } f_{uż} < 600\text{MHz} \\ 600\text{MHz} & \text{gdy } f_{uż} > 600\text{MHz} \end{cases} \text{ oraz } f_{sup} = \begin{cases} 600\text{MHz} & \text{gdy } f_{uż} < 600\text{MHz} \\ 2\text{GHz} & \text{gdy } f_{uż} > 600\text{MHz} \end{cases}$$

Natomiast, w przypadku, gdy częstotliwości $f_{uż}$ jest mniejsza niż 100 MHz metoda postępowania jest bardziej skomplikowana. W pierwszej kolejności należy sprawdzić stopień zaburzenia pierwszej strefy Fresnela. Zakłada się przy tym, że 60 % tej strefy powinno być niezaburzone przez powierzchnię morza. Długość trasy, przy której wspomniany prześwit wynosi 0.6, dla częstotliwości $f_{uż}$: $d_{fuz} = D_{06}(f_{uż}, h_1, 10)$ oraz dla częstotliwości 600 MHz $d_{600} = D_{06}(600, h_1, 10)$ są określane na podstawie zależności:

$$D_{06}(f, h_1, h_2) = \frac{D_f D_h}{D_f + D_h} \quad [\text{km}] \quad (2)$$

gdzie:

$D_f = 0,0000389 \cdot f \cdot h_1 \cdot h_2$ jest członem zależnym od częstotliwości,

$D_h = 4,1(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$ jest członem zależnym od odległości horyzontu radiowego,
 f częstotliwość [MHz],

h_1, h_2 wysokość zawieszenia anten odpowiednio nadawczej i odbiorczej n.p.m.

Wówczas: wartość natężenia pola $E_{uż}$ określa zależność:

$$E_{uż} = \begin{cases} E_{\max} & \text{gdy } d_{uż} \leq d_{fuż} \\ E_{dfuż} + (E_{d600} - E_{dfuż}) \frac{\log(d_{uż}/d_f)}{\log(d_{600}/d_f)} & \text{gdy } d_{uż} > d_{fuż} \end{cases} \quad [\text{dB}\mu\text{V/m}] \quad (3)$$

gdzie:

E_{\max} – maksymalna wartość natężenia pola mogąca wystąpić na trasie morskiej przy danej odległości,

$E_{dfuż}$ – maksymalna wartość natężenia pola mogąca wystąpić na trasie morskiej w odległości $d_{fuż}$,

E_{d600} – natężenie pola uzyskane w odległości d_{600} wyznaczone dla częstotliwości $f_{uż}$ według zależności (1).

Jak już wspomniano, krzywe propagacji obrazują rozkład wartości natężenia pola w funkcji odległości, która może zawierać się w zakresie od 1 km do 1000 km. Aby wyznaczyć wartość natężenia pola dla konkretnej odległości wystarczy odczytać ją z krzywych, lub, w celu zwiększenia precyzji, można wykorzystać krzywe w postaci stabelaryzowanej udostępniane przez Biuro Radiokomunikacyjne w Genewie (*Radiocommunication Bureau*). Podobnie jak poprzednio, wartość natężenia pola $E_{uż}$ dla konkretnej odległości $d_{uż}$ można wyznaczyć według zależności:

$$E_{uż} = E_{\inf} + (E_{\sup} - E_{\inf}) \frac{\log(d_{uż}/d_{\inf})}{\log(d_{\sup}/d_{\inf})} \quad [\text{dB}(\mu\text{V/m})] \quad (4)$$

gdzie:

d_{\inf} – odległość niższa niż $d_{uż}$,

d_{\sup} – odległość większa niż $d_{uż}$,

E_{\inf} – natężenie pola w odległości d_{\inf} ,

E_{\sup} – natężenie pola w odległości d_{\sup} .

Prezentowane krzywe statystyczne charakteryzują się określonym prawdopodobieństwem przestrzennym (50 %) i trzema prawdopodobieństwami czasowymi (50 %, 10 %, 1 %). Istnieje możliwość wyznaczenia wartości natężenia pola $E_{uż}$ przy dowolnym prawdopodobieństwie czasowym $t_{uż}$ z przedziału od 1 % do 50 % na podstawie interpolacji:

$$E_{uż} = E_{\sup} \frac{Q_{\inf} - Q_t}{Q_{\inf} - Q_{\sup}} + E_{\inf} \frac{Q_t - Q_{\sup}}{Q_{\inf} - Q_{\sup}} \quad [\text{dB}(\mu\text{V/m})] \quad (5)$$

gdzie:

$$Q_t = Q_i(t_{uz}/100), Q_{inf} = Q_i(t_{inf}/100), Q_{sup} = Q_i(t_{sup}/100),$$

t_{inf} – nominalny procent czasu mniejszy od t_{uz} ,

t_{sup} – nominalny procent czasu większy od t_{uz} ,

E_{inf} – natężenie pola według krzywej dla t_{inf} ,

E_{sup} – natężenie pola według krzywej dla t_{sup} ,

przy czym

$Q_i(x)$ jest odwrotną komplementarną dystrybuantą rozkładu normalnego.

Przedział wysokości zawieszenia anteny stacji nadawczej h_1 , która w przypadku tras morskich jest rozumiana jako wysokość nad poziomem morza, zawiera się w przedziale od 10 m do 1200 m. Również w tym przypadku istnieje możliwość wyznaczenia wartości natężenia pola E_{uz} , dla trasy morskiej, dla dowolnej wysokości zawieszenia anteny nadawczej h_{uz} z przedziału od 10 m do 3000 m, zgodnie z zależnością:

$$E_{uz} = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \frac{\log(h_{uz}/h_{inf})}{\log(h_{sup}/h_{inf})} \quad [\text{dB}(\mu\text{V/m})] \quad (6)$$

gdzie:

h_{inf} – nominalna wysokość zawieszenia anteny nadawczej poniżej h_{uz} ,

h_{sup} – nominalna wysokość zawieszenia anteny nadawczej powyżej h_{uz} ,

E_{inf} – natężenie pola dla wysokości anteny nadawczej h_{inf} ,

E_{sup} – natężenie pola dla wysokości anteny nadawczej h_{sup} .

przy czym:

$$h_{inf} = \begin{cases} 10m & \text{gdy } h_{uz} < 20m \\ 20m & \text{gdy } h_{uz} < 37,5m \\ 37,5m & \text{gdy } h_{uz} < 75m \\ 75m & \text{gdy } h_{uz} < 150m \\ 150m & \text{gdy } h_{uz} < 300m \\ 300m & \text{gdy } h_{uz} < 600m \\ 600m & \text{gdy } h_{uz} > 600m \end{cases} \text{ oraz } h_{sup} = \begin{cases} 20m & \text{gdy } h_{uz} < 20m \\ 37,5m & \text{gdy } h_{uz} < 37,5m \\ 75m & \text{gdy } h_{uz} < 75m \\ 150m & \text{gdy } h_{uz} < 150m \\ 300m & \text{gdy } h_{uz} < 300m \\ 600m & \text{gdy } h_{uz} < 600m \\ 1200m & \text{gdy } h_{uz} > 600m \end{cases}.$$

W przypadku, gdy wysokość zawieszenia anteny stacji nadawczej jest mniejsza niż 10 m metoda postępowania jest bardziej skomplikowana. W pierwszej kolejności należy sprawdzić stopień zaburzenia pierwszej strefy Fresnela poprzez obliczenie długości trasy $D_{h1} = D_{06}(f, h_1, 10)$ według (2).

Jeżeli długość trasy $d_{uz} > D_{h1}$, konieczne jest również sprawdzenie prześwitu pierwszej strefy Fresnela dla wysokości stacji nadawczej równej 20 m, czyli wyznaczenie $D_{20} = D_{06}(f, 20, 10)$. Wówczas:

$$E_{uz} = \begin{cases} E_{\max} & \text{gdy } d \leq D_{h1} \\ E_{Dh1} + (E_{D20} - E_{Dh1}) \frac{\log(d/D_{h1})}{\log(D_{20}/D_{h1})} & \text{gdy } D_{h1} < d < D_{20} \text{ [dB}\mu\text{V/m]} \\ E'(1 - F_s) + E'' F_s & \text{gdy } d \geq D_{20} \end{cases} \quad (7)$$

gdzie:

E_{\max} – maksymalna wartość natężenia pola mogąca wystąpić na trasie morskiej przy danej odległości,

E_{Dh1} – E_{\max} przy D_{h1} ,

$$E_{D20} = E_{10}(D_{20}) + [E_{20}(D_{20}) - E_{10}(D_{20})] \frac{\log(h_1/10)}{\log(20/10)},$$

$E_{10}(x)$ – natężenie pola przy $h_1 = 10m$ interpolowane dla odległości x ,

$E_{20}(x)$ – natężenie pola przy $h_1 = 20m$ interpolowane dla odległości x ,

$$E' = E_{10}(d) + [E_{20}(d) - E_{10}(d)] \frac{\log(h_1/10)}{\log(20/10)},$$

E'' – natężenie pola uzyskane w tych warunkach przy założeniu trasy lądowej,

$$F_s = \frac{d - D_{20}}{d}.$$

W przypadku, gdy wysokość zawieszenia anteny stacji odbiorczej jest większa od nominalnej wartości $h_2 = 10m$ wówczas konieczne jest wyznaczenie poprawki korygującej natężenie pola $C[dB]$ zgodnie z zależnością:

$$C = K_{h2} \log(h_2/10) \text{ [dB]} \quad (8)$$

gdzie:

$$K_{h2} = 3.2 + \log(f),$$

f – częstotliwość [MHz].

Natomiast w przypadku, gdy wysokość anteny odbiorczej jest mniejsza od wartości nominalnej $h_2 = 10m$, wówczas podobnie jak w przypadku anteny nadawczej, konieczne jest wyznaczenie stopnia zaburzenia pierwszej strefy Fresnela poprzez obliczenie $d_{10} = D_{06}(f, h_1, 10)$ oraz $d_{h2} = D_{06}(f, h_1, h_2)$ zgodnie z (2). Wówczas wartość poprawki $C[dB]$ przyjmuje wartość:

$$C = \begin{cases} 0 & \text{gdy } d < d_{h2} \\ K_{h2} \log(h_2/10) \frac{\log(d/d_{h2})}{\log(d_{10}/d_{h2})} & \text{gdy } d_{h2} < d < d_{10} \text{ [dB]} \\ K_{h2} \log(h_2/10) & \text{gdy } d \geq d_{10} \end{cases} \quad (9)$$

Warto tu dodać, że w rezolucjach IMO zaleca się, aby wysokość zawieszenia anteny odbiorczej na statku była równa 4 m n.p.m., co oznacza konieczność wyznaczania poprawki.

W wyniku zastosowania przedstawionych powyżej korekcji i poprawek, jest możliwe wyznaczenie wartości natężenia pola dla określonych parametrów łącza radiowego: częstotliwości f , wysokości zawieszenia anteny nadawczej h_1 i odbiorczej h_2 oraz w określonej odległości d .

3. Badania pomiarowe w warunkach rzeczywistych

Zgodnie z zaleceniami IMO [3,5,6], niezależnie od wszystkich obliczeń i szacowania zasięgów stacji radiowych, dla zastosowań praktycznych w morskim paśmie VHF, wymagana jest weryfikacja otrzymanych wyników za pomocą odpowiednich pomiarów w warunkach rzeczywistych. W związku z powyższym, jak było zaznaczone na wstępie, autorzy niniejszej pracy podjęli się zbadania poprawności wyznaczania zasięgów stacji radiowych, pracujących w morskim paśmie VHF, w oparciu o zalecenie ITU [1], poprzez przeprowadzenie stosownych badań pomiarowych. W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione założenia badań pomiarowych oraz procedura ich przeprowadzania w warunkach rzeczywistych.

3.1. Przyrządy pomiarowe wykorzystane w trakcie pomiarów

Badania pomiarowe propagacji sygnałów radiowych w paśmie VHF zostały przeprowadzone przy użyciu następujących przyrządów:

- przenośnego analizatora widma typu MS2711D firmy ANRITSU (nr seryjny: 622134, nr inwentarzowy: 801-4734),
- anteny dipolowej typu 3121C firmy EMCO (nr seryjny: 9609-1217, nr inwentarzowy: 53-2-111),
- odbiornika GPS firmy GARMIN typu GPSMAP 76CSx.

Poniżej przedstawiono najważniejsze parametry przyrządów pomiarowych:

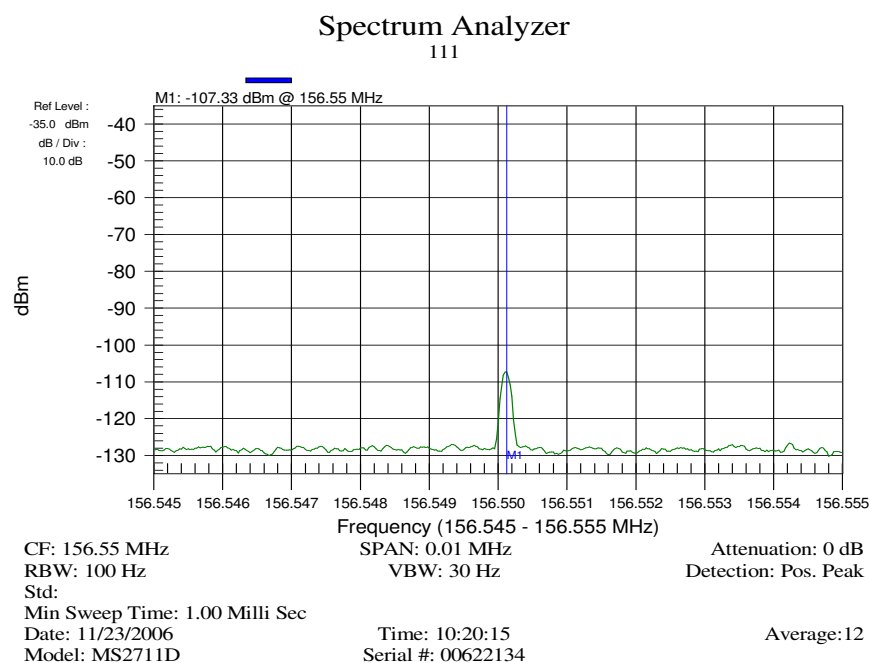
- Analizator widma:
 - pomiar mocy sygnału na wejściu pomiarowym dokonywany w jednostkach [dBm],
 - częstotliwość środkowa nastawiana na właściwą częstotliwość środkową badanego kanału,
 - pasmo przemiatania ± 5 kHz,
 - pomiar seryjny z uśrednianiem po 12 pomiarach,
 - rozdzielczość pomiarowa 100 Hz,
 - rozdzielczość wyświetlana 30 Hz,
 - całkowita dokładność pomiaru (pojedynczego pomiaru) poziomu sygnału wynosi ± 1.5 dBm (± 1 dBm typowo) dla częstotliwości > 10 MHz do 3 GHz (wg specyfikacji firmowej).
- Antena dipolowa:
 - nastawiona na częstotliwość pośrednią między dwoma częstotliwościami środkowymi nośnych i wynosiła 156,562 MHz,
 - zysk anteny $G_o = 1,75$ dB ,
 - wartość współczynnika antenowego dla tej częstotliwości (*Antenna Factor*) AF=12,45 dB (wg specyfikacji firmowej),

- tłumienie dołączonego sprzęgacza wynosi ok. 0,2 dB w tym zakresie częstotliwości (wg specyfikacji firmowej),
- współczynnik fali stojącej (VSWR), zmierzony dla tej częstotliwości, wyniósł 1,478 (patrz Załącznik 2).
- współczynnik odbicia Γ obliczony na podstawie znajomości VSWR, $\Gamma = -0,193$ (patrz Załącznik 2).
- tłumienność niedopasowania M, obliczony na podstawie znajomości VSWR, $M = -0,165$ dB (patrz Załącznik 2),
- tłumienność kabla pomiarowego, zmierzona dla tej częstotliwości, $F = 1,175$ dB (patrz Załącznik 2).

▪ Odbiornik GPS:

- pomiar seryjny współrzędnych geograficznych z uśrednianiem po 5 minutach,
- dokładność pomiaru ± 5 m.

Każdy pomiar wykonany przy pomocy przenośnego analizatora widma został zapisany do pamięci wewnętrznej przyrządu, a następnie przesłany do komputera PC. Przyjęty system zapisu jednoznacznie określa punkt pomiarowy, badany kanał oraz numer seryjnego pomiaru. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy obraz ekranu jednego z wyników pomiarów. Pełny zestaw wyników pomiarów w postaci obrazu ekranu z analizatora widma, został zamieszczony w Załączniku 1.



Rys. 2. Obraz ekranu analizatora widma z pomiaru mocy sygnału w jednym z punktów pomiarowych.

Antena odbiorcza systemu pomiarowego została umieszczona na wysokości 4 metrów nad poziomem morza. Na rysunku 3 przedstawiono zestaw pomiarowy rozwinięty w punkcie pomiarowym.



Rys. 3. Zestaw pomiarowy rozwinięty w punkcie pomiarowym.

3.2. Stacje nadawcze wykorzystane w trakcie pomiarów

Dzięki uprzejmości Urzędu Morskiego w Gdyni przeprowadzono badania pomiarowe dla dwóch niezależnych stacji nadawczych usytuowanych w Bosmanacie portu Hel oraz na

Latarni Morskiej w Helu. Poniżej przedstawiono parametry poszczególnych stacji nadawczych, uzyskane od Urzędu Morskiego w Gdyni:

▪ Bosmanat Portu Hel:

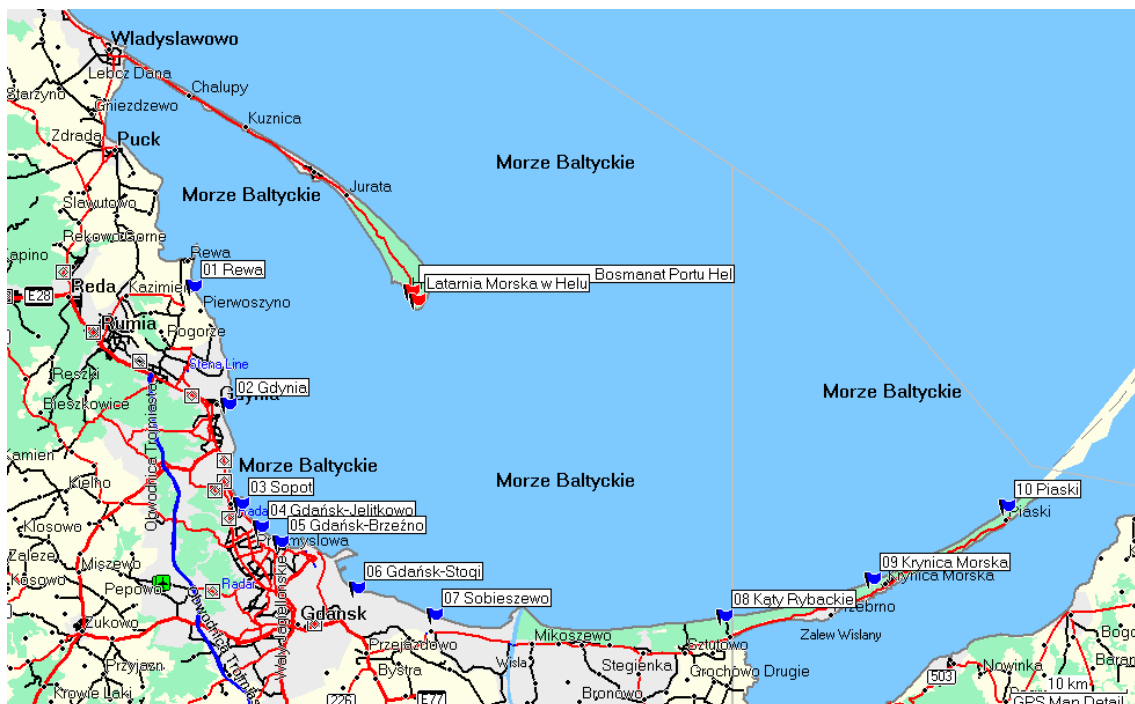
- współrzędne geograficzne stacji: 54N 36' 22", 18E 48' 16",
- częstotliwość pracy 156,55 MHz – kanał 11,
- antena dookólna typu Radmor 3282,
- zysk anteny nadawczej 4,5 dB,
- wysokość zawieszenia anteny – 14 m npm,
- polaryzacja anteny pionowa,
- moc wyjściowa nadajnika 16,8 W (12,25 dBW),
- tłumienność kabla antenowego 0,11 dB/mb,
- długość kabla antenowego 25 mb,
- moc promieniowania (EPR) 14 dBW.

▪ Latarnia Morska w Helu:

- współrzędne geograficzne stacji: 54N 35' 59", 18E 48' 46",
- częstotliwość pracy 156,575 MHz – kanał 71,
- antena dookólna typu GP 160 5/8,
- zysk anteny nadawczej 3 dB,
- wysokość zawieszenia anteny – 44 m npm,
- polaryzacja anteny pionowa,
- moc wyjściowa nadajnika 13,68 W (11,36 dBW),
- tłumienność kabla antenowego 0,08 dB/mb,
- długość kabla antenowego 17 mb,
- moc promieniowania (EPR) 13 dBW.

3.3. Punkty pomiarowe

Z uwagi na fakt, że pomiary dotyczyły uwarunkowań propagacyjnych fal radiowych w paśmie VHF na obszarze morskim, punkty pomiarowe zostały wybrane tak, aby droga propagacji przebiegała bezpośrednio nad morzem a jednocześnie zmieniała się długość trasy propagacyjnej. Punkty pomiarowe zostały wybrane wzdłuż brzegu Zatoki Gdańskiej od okolic Rewy do miejscowości Piaski na Mierzei Wiślanej, co zostało graficznie przedstawione na rysunku 4. Wybrano 10 punktów pomiarowych, dla których odległość od stacji nadawczej zawierała się w granicach od ok. 18 km do ok. 55 km. W tabeli 2 przedstawiono poszczególne punkty pomiarowe wraz z ich współrzędnymi geograficznymi oraz odległościami od poszczególnych stacji nadawczych.



Rys. 4. Rozmieszczenie punktów pomiarowych.

Tabela 2. Parametry punktów pomiarowych.

Lp	Lokalizacja	Współrzędne geograficzne	Odległość do nadajnika	
			kanal 11	kanal 71
1	Rewa	54N 36,601' 18E 30,828'	18,74 km	19,31 km
2	Gdynia	54N 31,091' 18E 33,576'	18,59 km	18,69 km
3	Sopot	54N 26,469' 18E 34,586'	23,54 km	23,34 km
4	Gdańsk-Jelitkowo	54N 25,386' 18E 36,215'	24,15 km	23,86 km
5	Gdańsk-Brzeźno	54N 24,718' 18E 37,780'	24,38 km	24,01 km
6	Gdańsk-Stogi	54N 22,522' 18E 43,895'	26,11 km	25,52 km
7	Sobieszewo	54N 21,316' 18E 50,180'	27,99 km	27,25 km
8	Kąty Rybackie	54N 21,266' 19E 13,431'	38,99 km	38,11 km
9	Krynica Morska	54N 22,985' 19E 25,327'	47,01 km	46,19 km
10	Piaski	54N 26,375' 19E 36,042'	54,67 km	53,93 km

3.4. Warunki klimatyczne podczas pomiarów

W okresie wykonywania badań propagacyjnych, warunki klimatyczne były następujące:

- Zachmurzenie: średnie, bez opadów,

- Temperatura powietrza: 9-11°C,
- Wiatr: 4-8 m/s, kierunek: S/W,
- Ciśnienie: ok. 1007 hPa, stałe,
- Stan morza: temperatura wody – 6-8°C, wiatr: 3-5 w skali Beauforta.

3.5. Opis procedury pomiarowej

Procedura pomiarowa została stworzona w celu sprawnego przeprowadzenia badań pomiarowych. Określa ona parametry, które należy ustawić na przyrządach biorących udział w badaniach, a także określa kolejność wykonywania elementarnych czynności.

W pierwszej kolejności ustalono podstawowe parametry analizatora widma:

- częstotliwość środkową,
- zakres odchyłki od częstotliwości środkowej,
- szerokość pasma pomiarowego,
- tryb pomiaru – pomiary z uśrednianiem za 12 pomiarów elementarnych.

Parametry te zostały odpowiednio dostosowane do dwóch nadajników i zapisane w pamięci przyrządu. Zgodnie z zaleceniem producenta anteny, ustawiono długość dipola właściwą dla badanych kanałów oraz określono z krzywych kalibracyjnych parametry zestawu antenowego (antena oraz sprzęgacz), współczynnik antenowy SF i tłumienność sprzęgacza. Następne kroki obejmowały działania podczas pomiaru na punkcie pomiarowym. W każdym z punktów pomiarowych wykonywano następujące czynności:

- ustawienie zestawu pomiarowego (ustawienie anteny, rozstawienie stojaka pomiarowego, połączenie zestawu antenowego z przyrządem pomiarowym, patrz rysunek 3),
- uruchomienie i kalibracja analizatora widma,
- wybór podstawowych parametrów pracy analizatora, właściwych dla odpowiedniego kanału,
- wywołanie sygnału nośnej w badanym kanale,
- dokonanie pomiaru mocy sygnału, zgodnie z ustalonym trybem pomiarowym,
- zapis dokonanego pomiaru do pamięci wewnętrznej przyrządu,
- pomiar mocy sygnału i zapis wyniku powtarzano przynajmniej pięciokrotnie,
- zmiana podstawowych parametrów z uwagi na zmianę kanału pomiarowego i powtarzano etapy procedury pomiarowej dotyczące wywołania sygnału nośnej, realizacji pomiaru i zapisu,
- po dokonaniu wszystkich pomiarów w obu dostępnych kanałach, demontaż zestawu pomiarowego i przemieszczenie do następnego punktu pomiarowego,
- kopiowanie wyników pomiarów z pamięci analizatora do komputera PC w celu dalszej obróbki uzyskanych wyników.

4. Analiza wyników pomiarowych

4.1. Wyniki badań pomiarowych

W wybranych punktach pomiarowych, dokonano pomiaru mocy sygnału pochodzącego od poszczególnych stacji nadawczych. W okresie nadawania sygnału nośnej w odpowiednim kanale, dokonywano przynajmniej 4 serii pomiarowych po 12 pomiarów w każdej serii z uśrednianiem danych pomiarowych. Wyniki z każdej serii zostały przedstawione w tabeli 3 dla kanału 11 oraz w tabeli 4 dla kanału 71 wraz z uśrednioną wartością natężenia pola sygnału odbieranego.

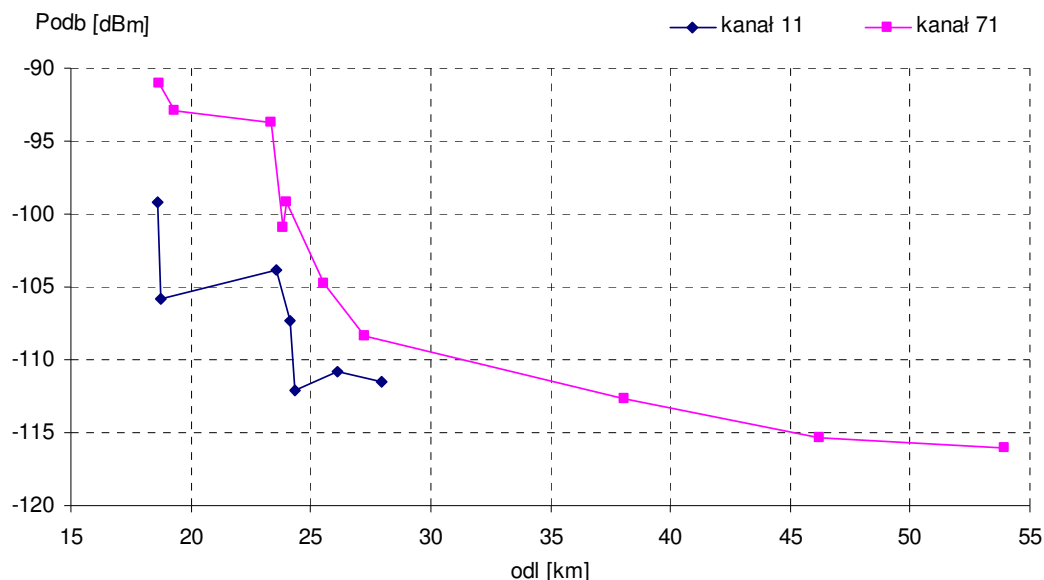
Tabela 3. Wyniki pomiarów mocy sygnału nadawanego w kanale 11.

Lp.	Lokalizacja	Seria 1 [dBm]	Seria 2 [dBm]	Seria 3 [dBm]	Seria 4 [dBm]	Seria 5 [dBm]	Seria 6 [dBm]	Seria 7 [dBm]	Średnia [dBm]
1	Rewa	-105,81	-105,78	-105,94	-105,76	-105,74	-105,88	-105,88	-105,83
2	Gdynia	-98,75	-98,96	-98,83	-99,31	-99,91	-99,39	-99,49	-99,23
3	Sopot	-104,52	-103,76	-103,70	-103,87	-103,73	-103,54	-104,05	-103,88
4	Gdańsk-Jelitkowo	-107,33	-107,55	-107,03	-107,40	-107,49	-107,31	-	-107,35
5	Gdańsk-Brzeźno	-111,98	-111,97	-112,12	-112,17	-111,97	-112,26	-	-112,08
6	Gdańsk-Stogi	-110,48	-110,49	-111,11	-110,93	-110,76	-110,67	-111,42	-110,84
7	Sobieszewo	-112,73	-111,30	-111,25	-111,18	-111,50	-111,39	-111,46	-111,54

Tabela 4. Wyniki pomiarów mocy sygnału nadawanego w kanale 71.

Lp.	Lokalizacja	Seria 1 [dBm]	Seria 2 [dBm]	Seria 3 [dBm]	Seria 4 [dBm]	Seria 5 [dBm]	Seria 6 [dBm]	Seria 7 [dBm]	Średnia [dBm]
1	Rewa	-92,69	-93,09	-92,99	-92,99	-	-	-	-92,94
2	Gdynia	-91,98	-89,93	-92,91	-90,08	-90,53	-	-	-91,09
3	Sopot	-93,53	-93,31	-95,24	-93,28	-93,52	-93,29	-	-93,69
4	Gdańsk-Jelitkowo	-101,11	-101,07	-101,15	-100,86	-100,69	-	-	-100,98
5	Gdańsk-Brzeźno	-100,51	-98,76	-98,87	-98,70	-99,25	-	-	-99,22
6	Gdańsk-Stogi	-105,81	-105,71	-103,28	-104,79	-104,52	-	-	-104,82
7	Sobieszewo	-108,25	-108,19	-108,54	-108,49	-108,24	-108,21	-	-108,32
8	Kąty Rybackie	-112,60	-112,91	-111,95	-113,01	-113,17	-	-	-112,73
9	Krynica Morska	-114,58	-114,22	-114,71	-115,07	-117,06	-116,23	-	-115,31
10	Piaski	-122,40	-115,50	-116,41	-116,72	-115,75	-115,58	-116,22	-116,94

Rysunek 5 przedstawia zależność uśrednionej mocy sygnału odbieranego w funkcji odległości od anteny nadawczej dla obu badanych kanałów.



Rys. 5. Zależność uśrednionej mocy sygnału odbieranego w funkcji odległości.

Z pobieżnej analizy rysunku 5 wynika, że wraz ze zwiększaniem odległości pomiędzy stacją nadawczą a pomiarową średni poziom mocy sygnału odbieranego maleje. Otrzymane charakterystyki można podzielić na dwa przedziały: do 25 km i powyżej 25 km. W odległości do 25 km od stacji nadbrzeżnej do stacji pomiarowej można zaobserwować znacznie szybszy spadek poziomu mocy średniej sygnału wraz z odległością, w porównaniu z odcinkiem trasy propagacyjnej powyżej 25 km. Zaobserwowany podział charakterystyk z rysunku 5 na dwa przedziały związany jest z horyzontem optycznym, który uwzględniając wysokości wzniesień anten nadawczych, znajduje się w okolicach 25 km.

W celu porównania uzyskanych na drodze pomiarowej wyników z danymi wyznaczonymi za pomocą modelu propagacyjnego przedstawionego w Zaleceniu ITU [1], konieczna była znajomość zależności tłumienia trasy propagacyjnej od odległości. W ogólności równanie bilansu energetycznego łącza radiowego można zapisać w postaci [9, 14]:

$$(P_N + G_N - F_N) - L - (P_O + G_O - F_O) = 0 \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

gdzie:

P_N – moc nadajnika [dBm],

G_N – zysk anteny nadajnika [dB],

F_N – tłumienie fidera anteny nadawczej [dB]

L – tłumienie trasy propagacyjnej,

P_O – moc sygnału odbieranego [dBm],

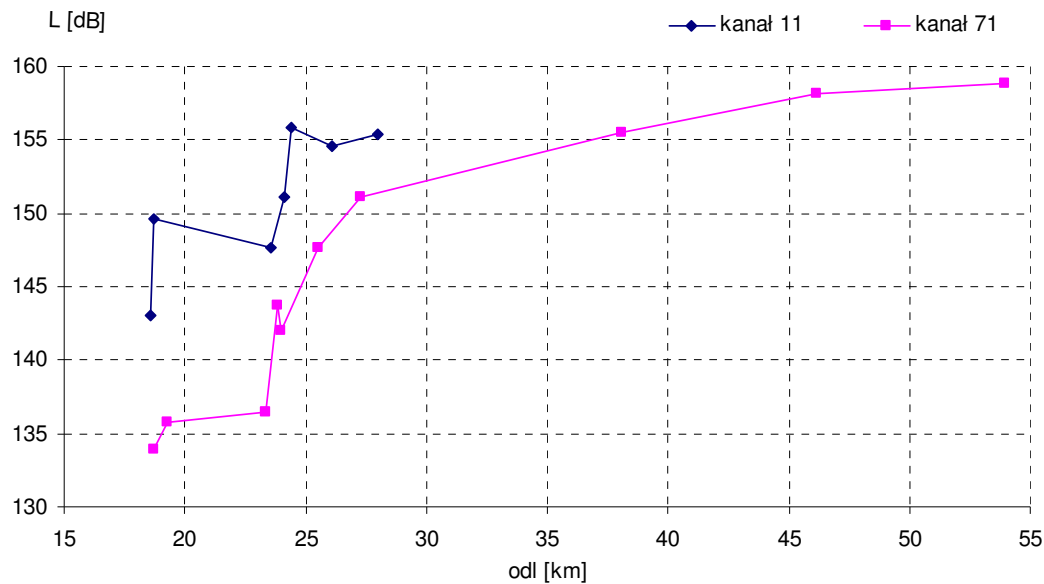
G_O – zysk anteny odbiorczej [dB],

F_O – tłumienie fidera anteny odbiorczej [dB].

Dokonując odpowiednich przekształceń, tłumienie trasy propagacyjnej można wyrazić za pomocą zależności:

$$L = (P_N + G_N - F_N) - (P_O + G_O - F_O) \quad [\text{dB}] \quad (11)$$

Znając wartości wszystkich czynników występujących po prawej stronie zależności (11) można obliczyć wartość tłumienia propagacyjnego dla poszczególnych punktów pomiarowych. Na rysunku 6 oraz w tabeli 5 przedstawiono uśrednioną zależność tłumienia propagacyjnego w funkcji odległości dla obu rozpatrywanych nadajników.



Rys. 6. Zależność tłumienia propagacyjnego od odległości.

Tabela 5. Zależność tłumienia propagacyjnego od odległości.

Lp.	Lokalizacja	Kanał 11		Kanał 71	
		odl [km]	L [dB]	odl [km]	L [dB]
1	Rewa	18,74	149,62	19,31	135,73
2	Gdynia	18,59	143,02	18,69	133,88
3	Sopot	23,54	147,67	23,34	136,49
4	Gdańsk-Jelitkowo	24,15	151,14	23,86	143,77
5	Gdańsk-Brzeźno	24,38	155,87	24,01	142,01
6	Gdańsk-Stogi	26,11	154,63	25,52	147,61
7	Sobieszewo	27,99	155,33	27,25	151,11
8	Kąty Rybackie	-	-	38,11	155,52
9	Krynica Morska	-	-	46,19	158,10
10	Piaski	-	-	53,93	158,82

Podobnie, jak w przypadku prezentowanych na rysunku 5 zależności średniego poziomu mocy sygnału odbieranego od odległości, charakterystykę tłumienia morskiej trasy propagacyjnej, przedstawioną na rysunku 6, można podzielić na 2 przedziały: do 25 km i powyżej 25 km. W pierwszym przedziale, do 25 km, zaobserwowano, że tłumienie trasy propagacyjnej na jednostkową odległość (1 km) wynosi ok. 1,3 dB/km dla kanału 11 oraz ok. 2 dB/km dla kanału 71, natomiast w przedziale drugim, powyżej 25 km, jednostkowe tłumienie wynosi ok. 0,3 dB/km dla kanału 71.

4.2. Aproksymacja tłumienia propagacyjnego metodą regresji liniowej z wieloma zmiennymi niezależnymi

W celu aproksymacji tłumienia propagacyjnego na trasie morskiej posłużono się metodą regresji liniowej z wieloma zmiennymi niezależnymi, szczegółowo opisanej w [8] oraz przedstawionej w skrócie w załącznikach 3 i 4. Zastosowanie tej metody do analizy uzyskanych wyników pomiarowych pozwoliło na określenie wyrażenia do szacowania tłumienia propagacyjnego w następującej postaci:

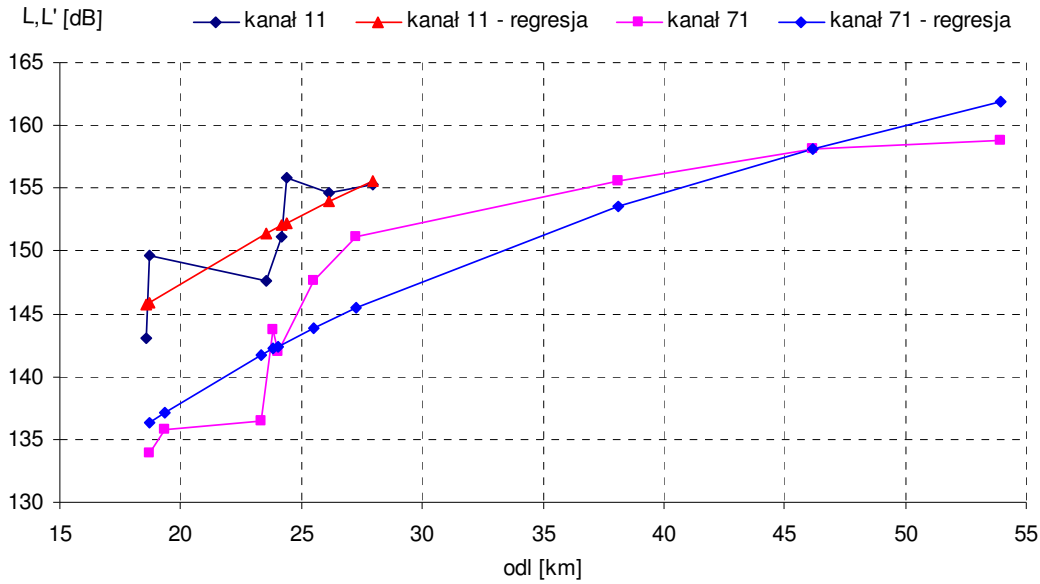
$$L' = 20 \cdot \log(f) - 19,09 \cdot \log(h_t) + 55,31 \cdot \log(d) + 53,53 \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

Błąd standardowy oszacowania tłumienia propagacyjnego wyznaczonego na podstawie zależności (12) i wyników pomiarowych wynosi $S_e = 3,09$ dB, a jego wariancja $S_e^2 = 9,53$ (patrz załącznik 3, zależność (34)).

W tabeli 6 zestawiono wartości tłumienia propagacyjnego wyznaczone na podstawie przeprowadzonych badań pomiarowych oraz wynikające z modelu szacowania tłumienia opisanego zależnością (12), wraz z różnicą pomiędzy nimi. Natomiast na rysunku 7 przedstawiono ilustrację graficzną danych zawartych w tabeli 6.

Tabela 6. Zależność tłumienia propagacyjnego od odległości wyznaczanego na podstawie danych pomiarowych i zależności (12).

Lp.	Lokalizacja	Kanał 11				Kanał 71			
		odl [km]	L [dB]	L' [dB]	ΔL [dB]	odl [km]	L [dB]	L' [dB]	ΔL [dB]
1	Rewa	18,74	149,62	145,94	-3,68	19,31	135,73	137,17	1,44
2	Gdynia	18,59	143,02	145,75	2,73	18,69	133,88	136,38	2,50
3	Sopot	23,54	147,67	151,42	3,75	23,34	136,49	141,72	5,23
4	Gdańsk-Jelitkowo	24,15	151,14	152,03	0,89	23,86	143,77	142,25	-1,52
5	Gdańsk-Brzeźno	24,38	155,87	152,26	-3,61	24,01	142,01	142,40	0,39
6	Gdańsk-Stogi	26,11	154,63	153,91	-0,72	25,52	147,61	143,87	-3,74
7	Sobieszewo	27,99	155,33	155,58	0,25	27,25	151,11	145,44	-5,67
8	Kąty Rybackie	-	-	-	-	38,11	155,52	153,50	-2,02
9	Krynica Morska	-	-	-	-	46,19	158,10	158,12	0,02
10	Piaski	-	-	-	-	53,93	158,82	161,84	3,02



Rys. 7. Ilustracja graficzna obliczonych i pomierzonych wartości tłumienia propagacyjnego w funkcji odległości.

Analiza wyników, przedstawionych w tabeli 6 oraz ich ilustracji graficznej na rysunku 7, pozwala na stwierdzenie, że opracowany, na podstawie metody regresji liniowej z wieloma zmiennymi niezależnymi, model tłumienia propagacyjnego w warunkach morskich stosunkowo dobrze aproksymuje wyniki uzyskane na drodze badań pomiarowych. Należy w tym miejscu podkreślić, że przeprowadzone pomiary i opracowany na ich podstawie model tłumienia propagacyjnego został zweryfikowany tylko dla wybranych częstotliwości z pasma VHF.

4.3. Porównanie proponowanego modelu z zaleceniami ITU

W celu dokonania porównania zaproponowanego modelu tłumienia propagacyjnego z zaleceniami ITU [1], konieczne było wyznaczenie na podstawie tego zalecenia tłumienia propagacyjnego. Ponieważ statystyczne krzywe propagacji są przedstawione w jednostkach [dBμV/m], więc należy dokonać ich konwersji na [dBm]. W tym celu trzeba skorzystać z definicji współczynnika antenowego AF, który określa natężenia pola elektrycznego w miejscu ustawienia anteny odbiorczej w przypadku, gdy znamy napięcie na wyjściu anteny. Współczynnik ten jest określony wg zależności [14]:

$$AF[l/m] = \frac{E[V/m]}{U[V]} \quad (13)$$

gdzie:

$E[V/m]$ – natężenie pola elektrycznego w miejscu ustawienia anteny odbiorczej,

$U[V]$ – zmierzone napięcie na wyjściu anteny.

Stąd, natężenie pola elektrycznego, gdy znamy moc sygnału na dopasowanym obciążeniu, wyznaczamy z zależności:

$$E[dB\mu V/m] = P[dBm] + AF[dB] + F[dB] + 107 \quad (14)$$

gdzie:

$E[dB\mu V/m]$ – natężenie pola elektrycznego w miejscu ustawienia anteny odbiorczej,

$P[dBm]$ – zmierzona moc badanego sygnału na dopasowanym obciążeniu anteny,

$F[dB]$ – wszystkie tłumienia i niedopasowania pomiędzy anteną a dopasowanym obciążeniem (miernikiem).

W rozpatrywanym przypadku, na wartość $F[dB]$ składa się:

- tłumienie sprzęgacza,
- tłumienie kabla pomiarowego, oraz
- tłumienność niedopasowania anteny.

Stąd, $F[dB] = 1,54dB$. Natomiast, współczynnik 107 służy do przeliczenia mocy mierzonego sygnału, wyznaczonego w jednostkach dBm, na napięcie wyrażone w jednostkach dBμV na obciążeniu 50 Ω.

Na podstawie (13) tłumienie propagacyjne w rozpatrywanym przypadku wyznaczone zgodnie z zaleceniem ITU można opisać zależnością;

$$L'' = (P_N + G_N - F_N) - (E[dB\mu V/m] - AF - F_o - 107) \quad [dB] \quad (15)$$

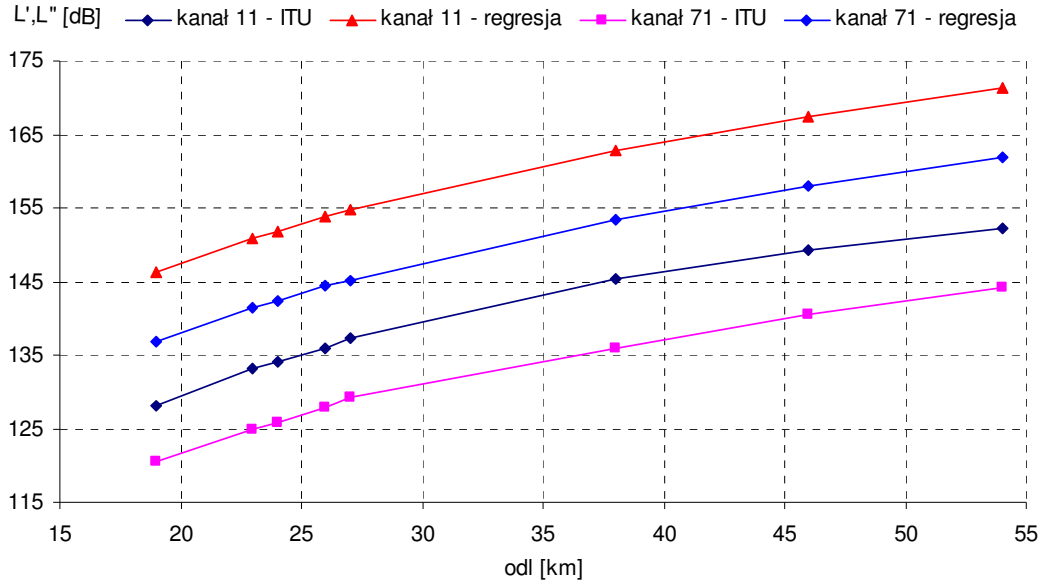
gdzie

$E[dB\mu V/m]$ – natężenie pola elektrycznego odczytane ze statystycznych krzywych propagacji, uwzględniające wszystkie wymagane poprawki i korekty.

Na podstawie zależności (12) i (15) zostały wyznaczone tłumienia tras propagacyjnych dla poszczególnych punktów pomiarowych. Uzyskane w ten sposób wyniki zostały zestawione w tabeli 7 i zobrazowane na rysunku 8.

Tabela 7. Porównanie tłumienia propagacyjnego w funkcji odległości wyznaczonego na podstawie zależności (12) i (15).

odl [km]	Kanał 11			Kanał 71		
	L' [dB]	L'' [dB]	ΔL [dB]	L' [dB]	L'' [dB]	ΔL [dB]
19	146,27	128,16	18,11	136,78	120,56	16,22
23	150,86	133,16	17,70	141,37	124,96	16,41
24	151,88	134,16	17,72	142,39	125,76	16,63
26	153,81	135,96	17,85	144,31	127,76	16,55
27	154,71	137,26	17,45	145,22	129,26	15,96
38	162,92	145,36	17,56	153,43	135,96	17,47
46	167,51	149,16	18,35	158,02	140,46	17,56
54	171,37	152,16	19,21	161,87	144,26	17,61



Rys. 8. Porównanie tłumienia propagacyjnego w funkcji odległości wyznaczonego na podstawie metody regresji oraz Zalecenia ITU-R P.1546 [1].

Z analizy danych zawartych w tabeli 7 i przedstawionych graficznie na rysunku 8 wynika, że kształt wszystkich otrzymanych krzywych jest do siebie zbliżony. Jednak zaobserwowano dość znaczne rozbieżności w wartości tłumień propagacyjnych wyznaczanych na podstawie metody regresji (zależność (12)) i Zalecenia ITU (zależność (15)). Różnice te zawierają się w granicach od ok. 16 dB do ok. 19 dB. Tak znaczące różnice mogą być spowodowane następującymi czynnikami:

- opieranie się na niezwyfikowanych parametrach nadbrzeżnych stacji nadawczych wykorzystywanych podczas pomiarów.
- zasolenie wód Zatoki Gdańskiej jest mniejsze niż zasolenie Morza Bałtyckiego, w związku z czym tłumienie propagacyjne fal radiowych przesyłanych nad takimi wodami może się różnić w stosunku do krzywych propagacyjnych zalecanych przez ITU dla mórz słonych, i może być nawet zbliżone do tłumienia charakterystycznego dla tras lądowych. W takim przypadku propagacja fal radiowych w akwenie Zatoki Gdańskiej być może powinna być traktowana jako propagacja na trasach lądowych a nie na trasach morskich.

W związku z powyższym celem jest przeprowadzenie bardziej kompleksowych badań pomiarowych w całym paśmie VHF i empirycznego zweryfikowania otrzymanej na tym etapie pracy zależności (12) opisującej tłumie propagacyjne.

5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzenie weryfikacji metod szacowania tłumienia propagacyjnego dla potrzeb projektowania sieci radiokomunikacyjnych w paśmie VHF, pracujących w warunkach morskich, jest niezbędne do prawidłowego ich zaprojektowania, co jest zgodne z zaleceniami IMO [3,5,6]. Należy w tym miejscu podkreślić, że prace tego typu, nie były dotąd prowadzone dla potrzeb systemów radiokomunikacyjnych akwenu Morza Bałtyckiego wzdłuż polskiej linii brzegowej.

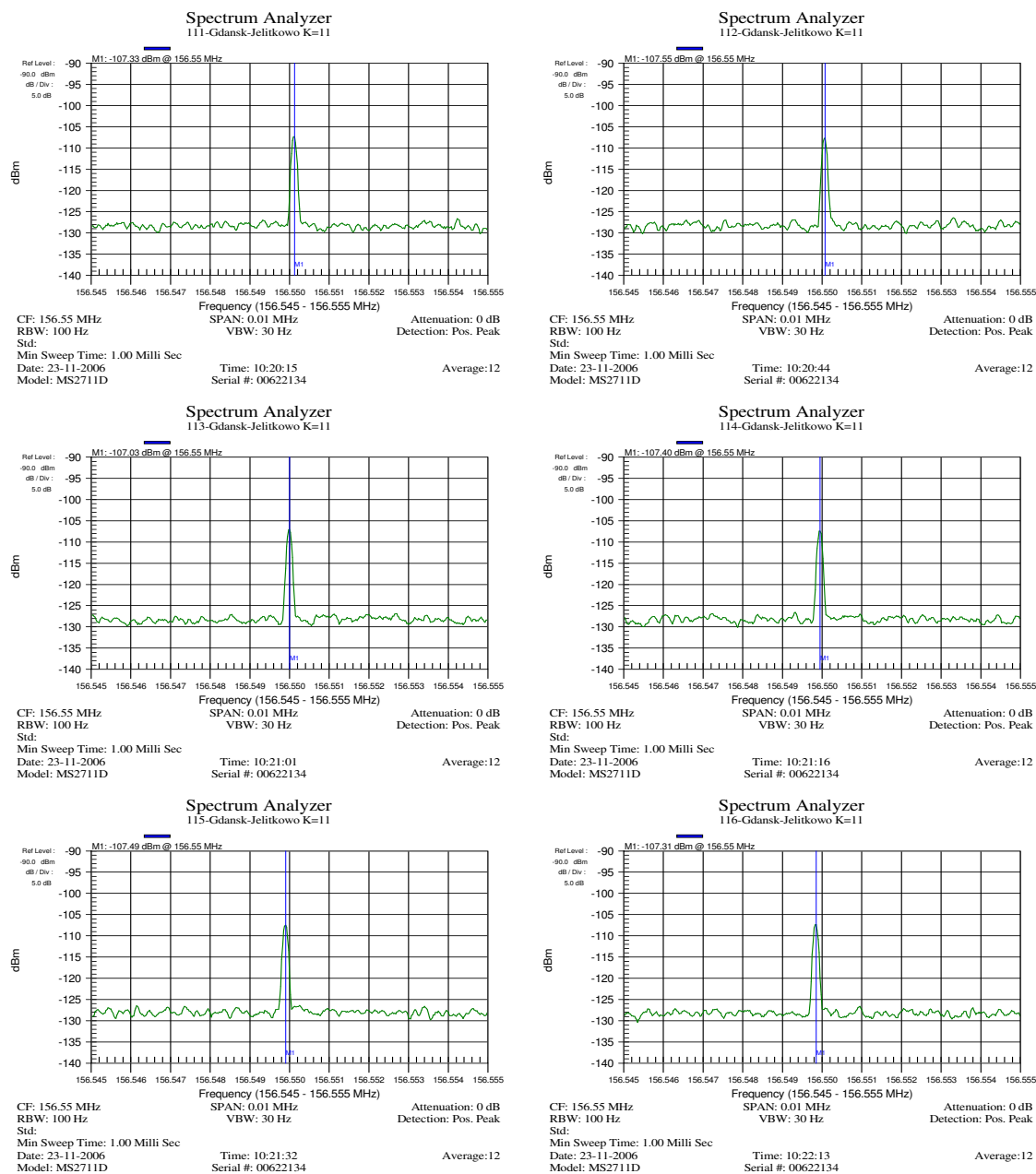
Jak wynika z przeprowadzonych analiz i zapytań ofertowych napływających do Pracowni Radiokomunikacji Morskiej w Gdańsku, wiele przestarzałych systemów radiokomunikacyjnych, funkcjonujących dla potrzeb radiokomunikacji morskiej, a w szczególności łączności operacyjnej oraz łączności w niebezpieczeństwie Morskiej Służby Poszukiwania i Ratownictwa SAR, Urzędu Morskiego w Gdyni oraz Morskiego Oddziału Straży Granicznej, musi ulec szybkiej modernizacji wynikającej ze zobowiązań państw członkowskich Unii Europejskiej. Większość z wymienionych systemów pracuje właśnie w/w zakresie częstotliwości morskiego pasma VHF.

W związku z powyższym istnieje potrzeba zweryfikowania narzędzi projektowych, w szczególności stosowanych modeli propagacyjnych do szacowania zasięgów nadbrzeżnych stacji nadawczo-odbiorczych w morskim paśmie VHF. Możliwie dobrze opisujący uwarunkowania propagacyjne na trasach morskich model stanowi często element decydujący o prognozowanej jakości świadczonych usług w tego typu systemach.

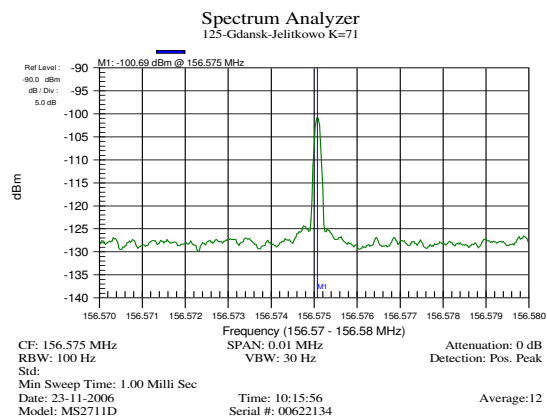
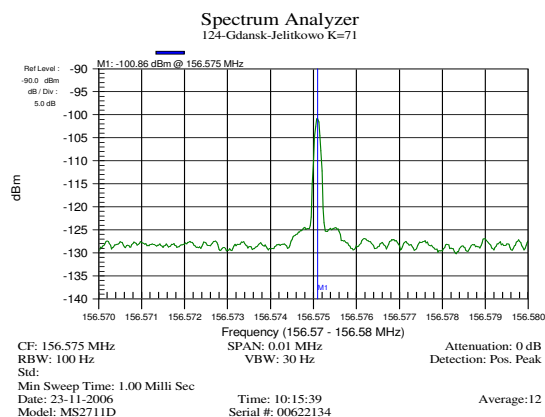
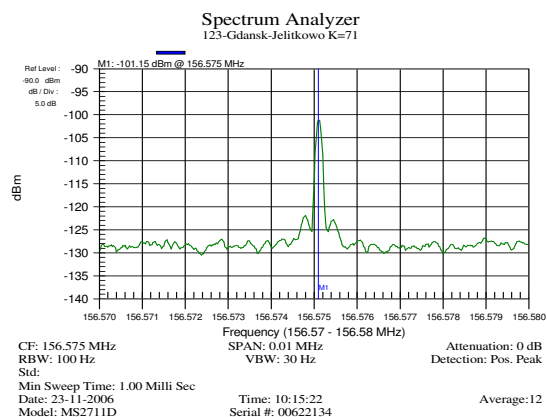
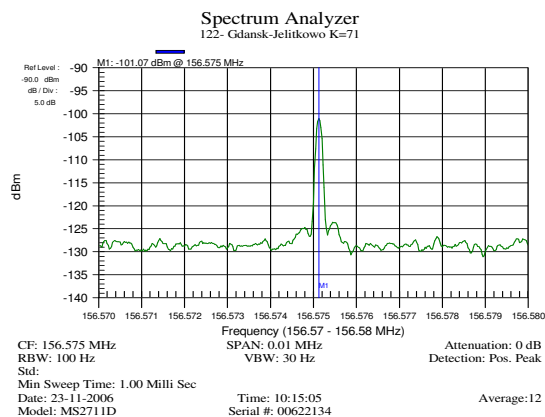
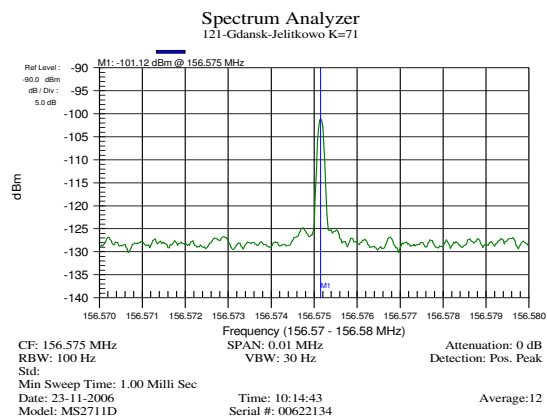
Jak wynika ze zgromadzonego materiału pomiarowego, zagadnienie empirycznej weryfikacji zalecanych przez ITU modeli propagacyjnych dla tras morskich jest procesem droгим i złożonym, wymagającym znacznie większej liczby reprezentatywnych wyników pomiarowych wzdłuż całego polskiego wybrzeża Morza Bałtyckiego.

Niniejsza praca statutowa przyczyniła się do opracowania i przetestowania procedur pomiarowych i stanowi punkt wyjścia do przeprowadzenia kompleksowych pomiarów propagacyjnych w morskim paśmie VHF.

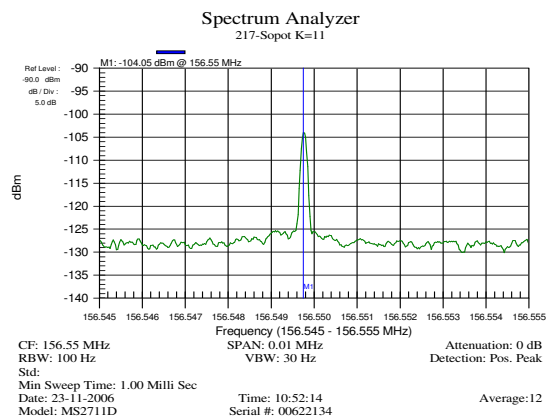
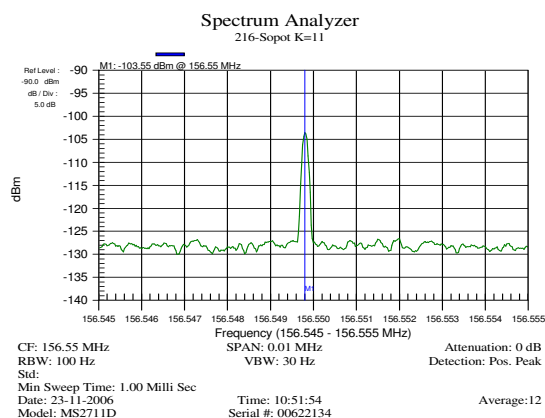
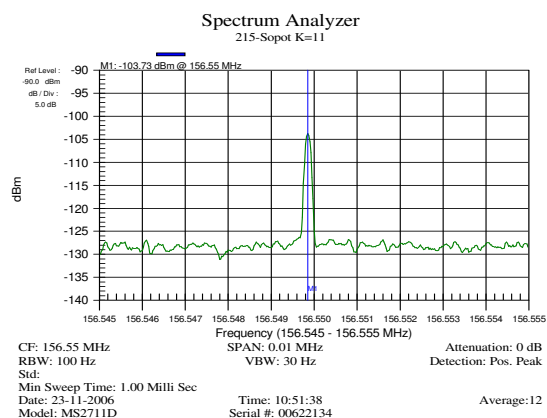
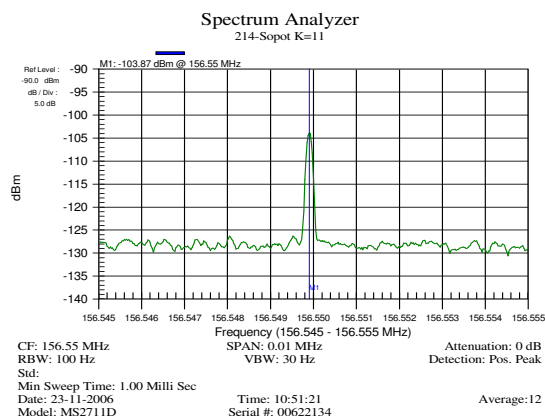
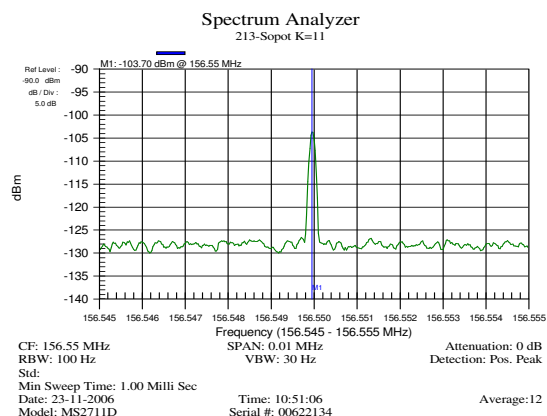
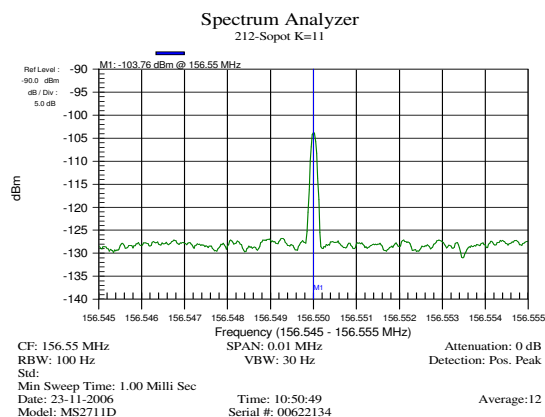
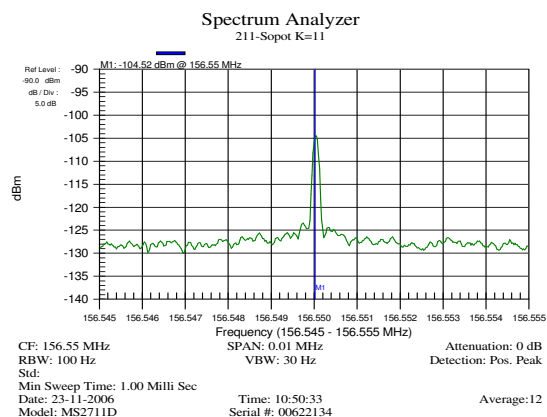
Prezentacja wyników pomiarowych.



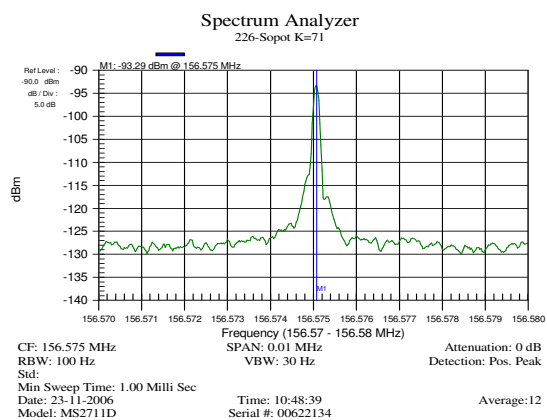
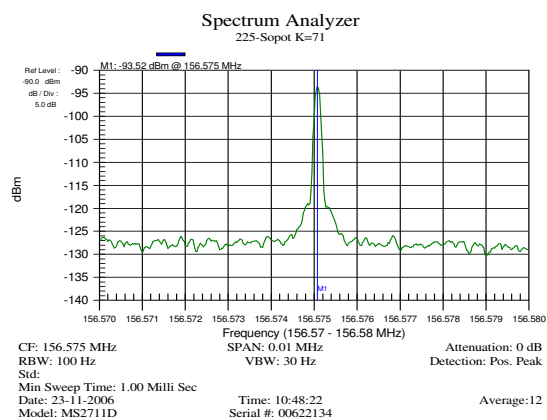
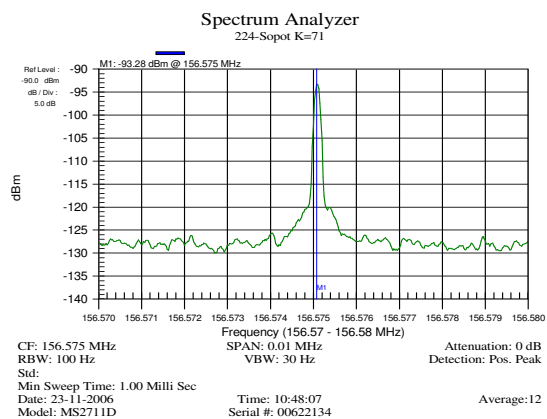
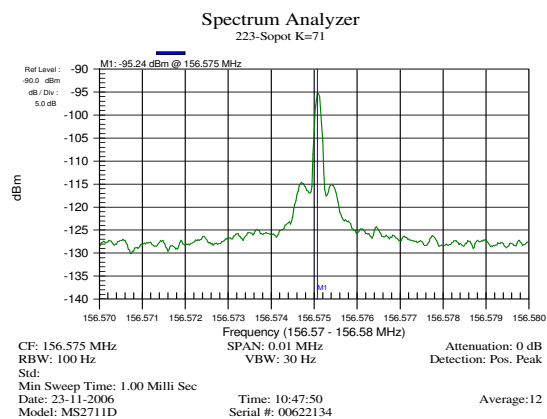
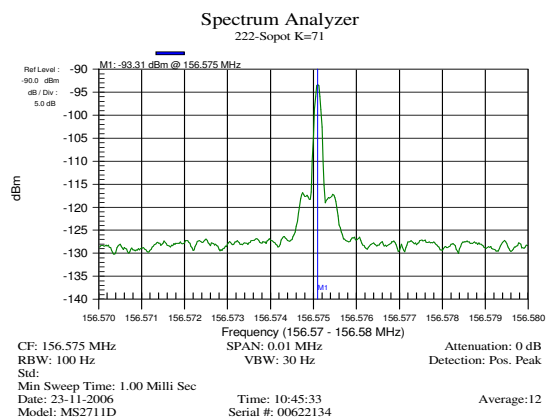
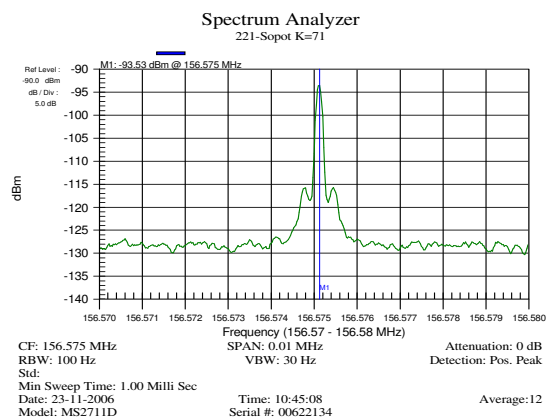
Rys. 9. Pomiary mocy sygnału w punkcie Gdańsk-Jelitkowo, kanał 11, seria 1-6.



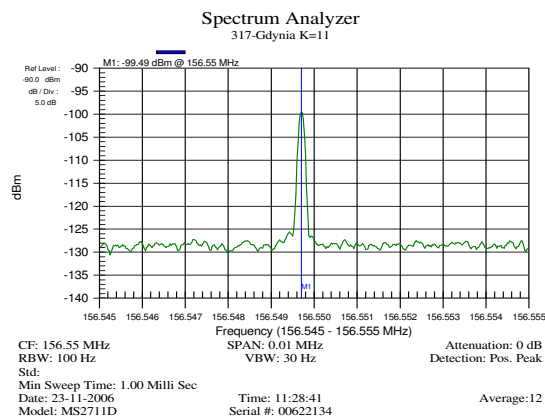
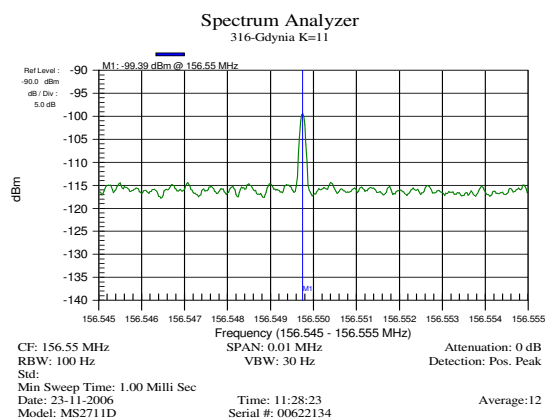
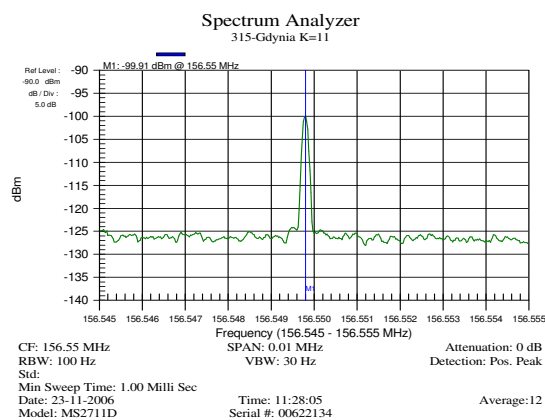
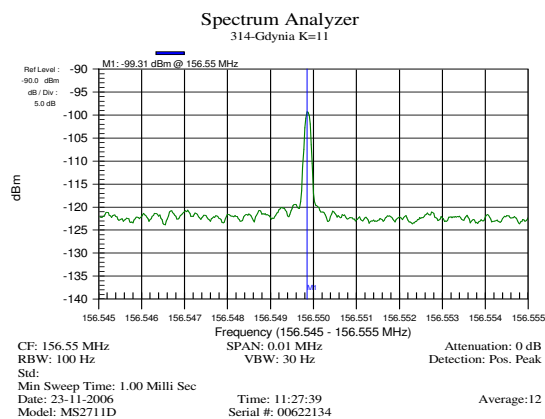
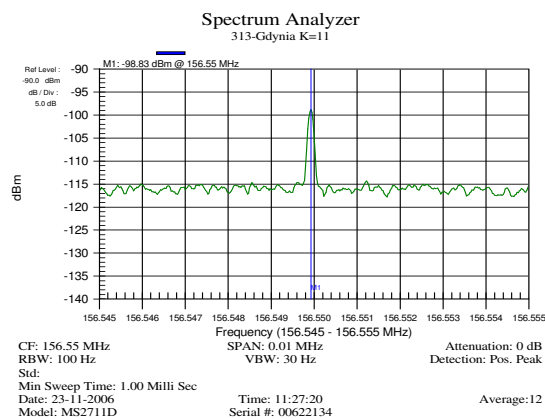
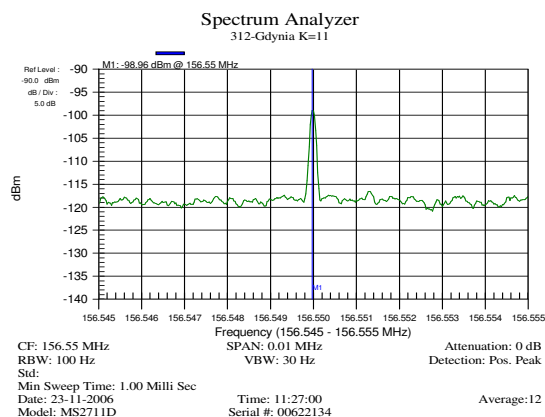
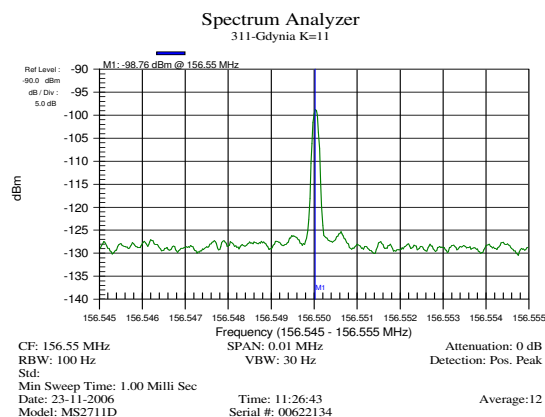
Rys. 10. Pomiary mocy sygnału w punkcie Gdańsk-Jelitkowo, kanał 71, seria 1-5.



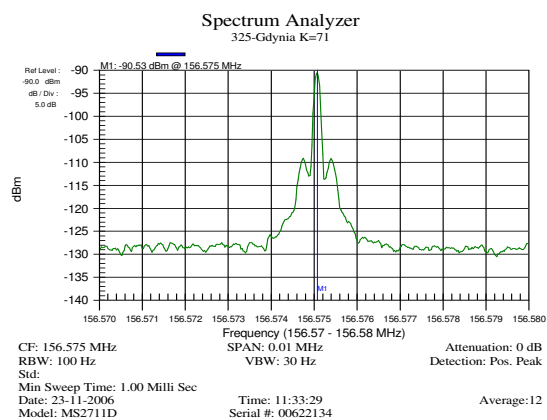
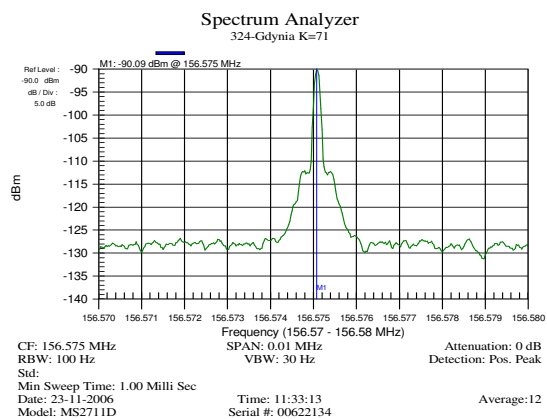
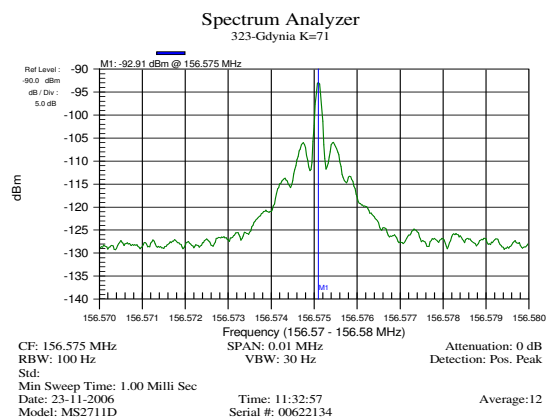
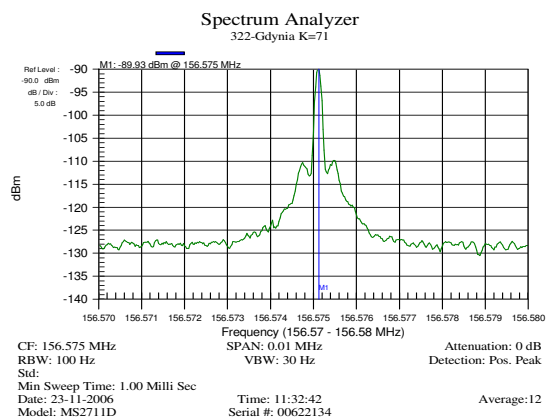
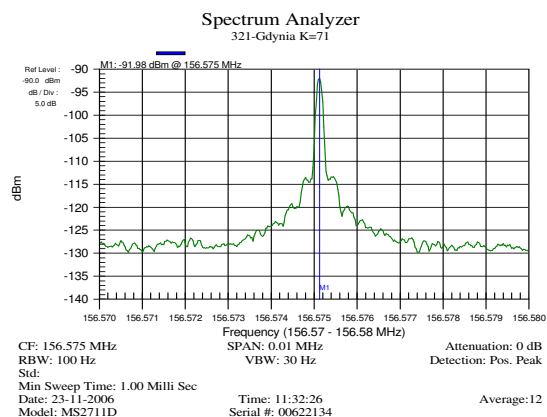
Rys. 11. Pomiar mocy sygnału w punkcie Sopot, kanał 11, seria 1-7.



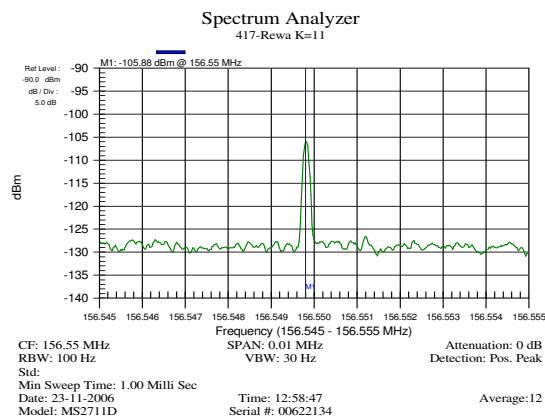
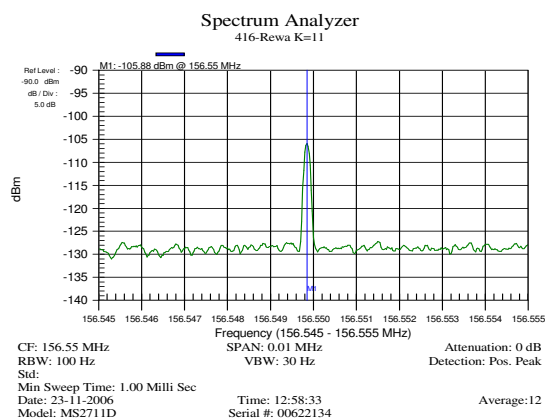
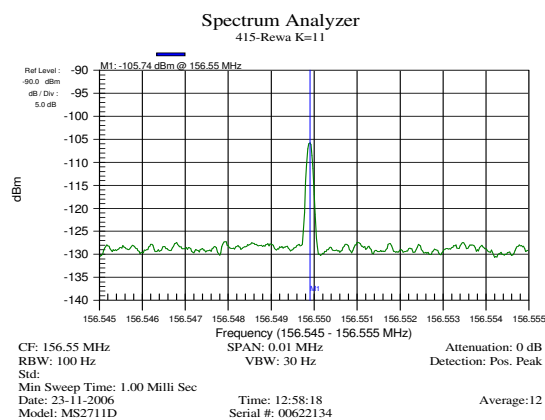
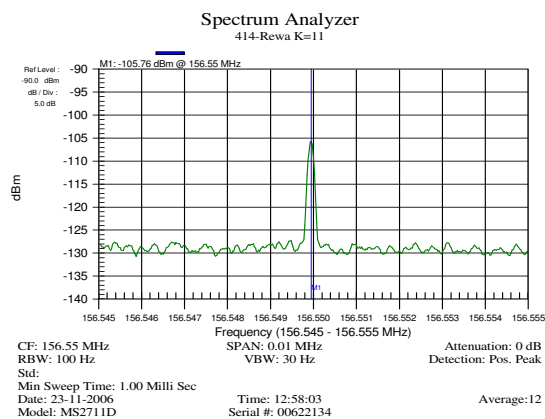
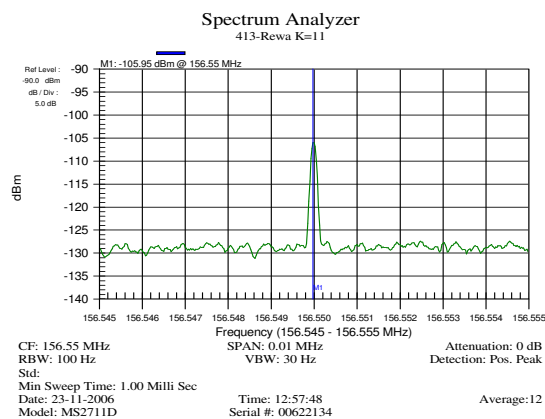
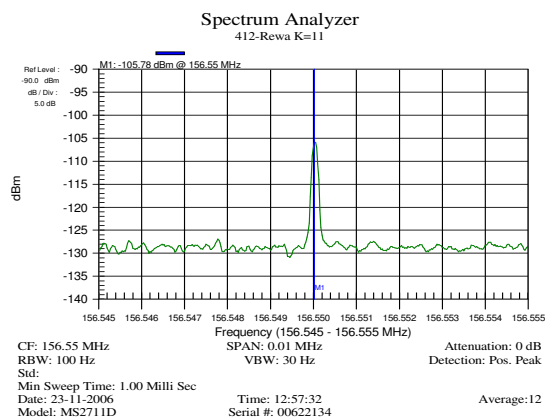
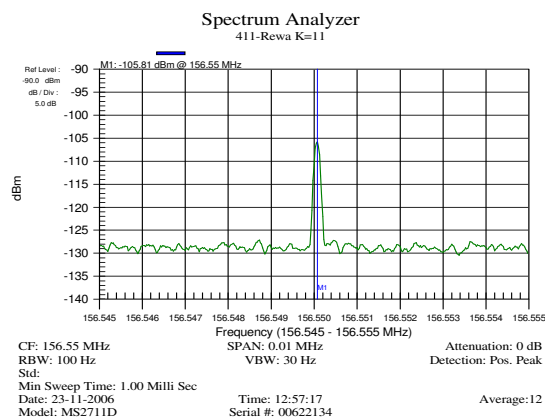
Rys. 12. Pomiar mocy sygnału w punkcie Sopot, kanał 71, seria 1-6.



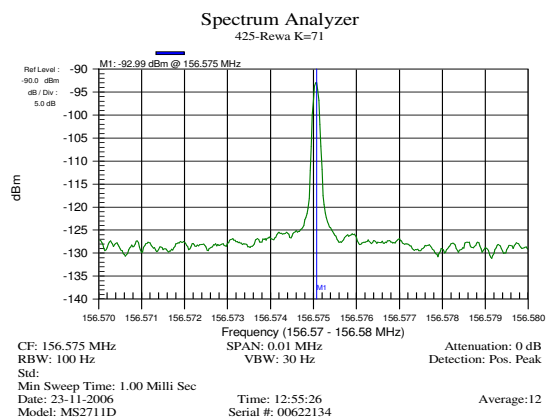
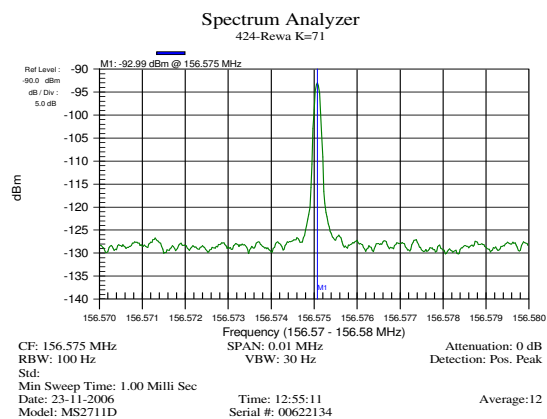
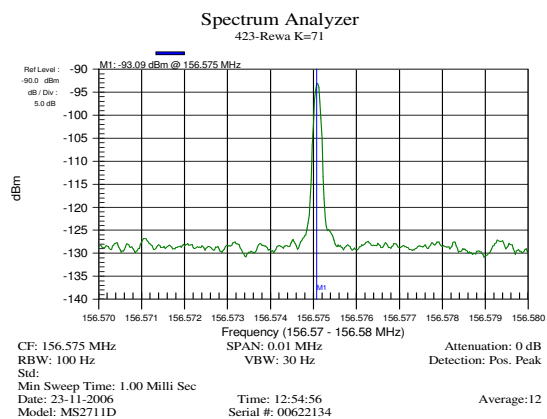
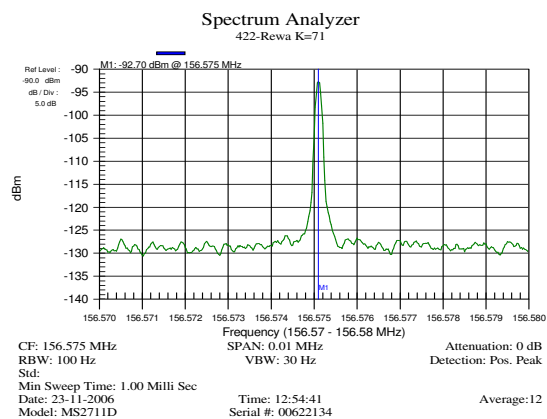
Rys. 13. Pomiary mocy sygnału w punkcie Gdynia, kanał 11, seria 1-7.



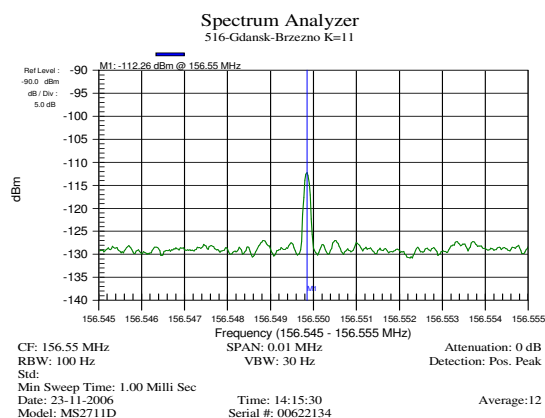
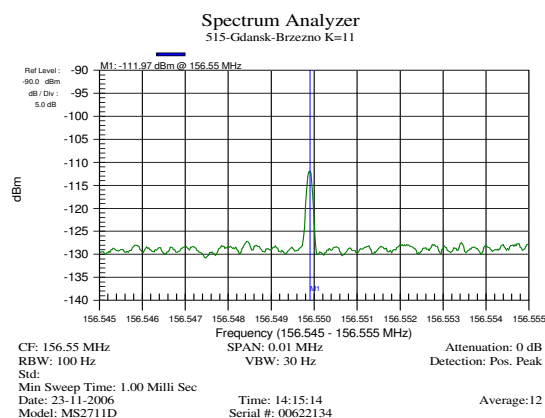
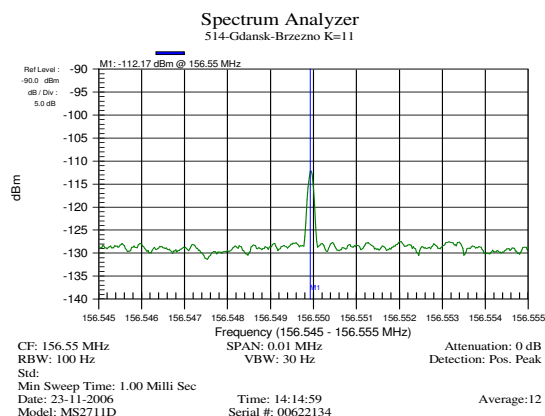
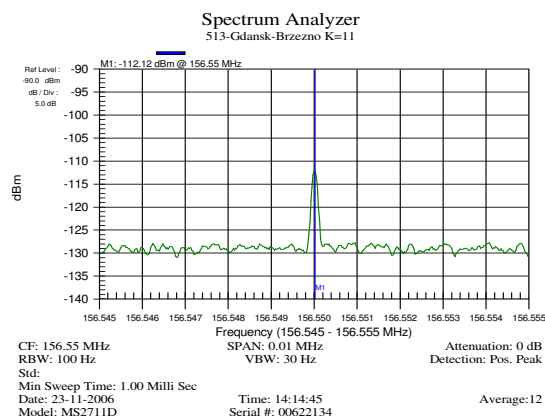
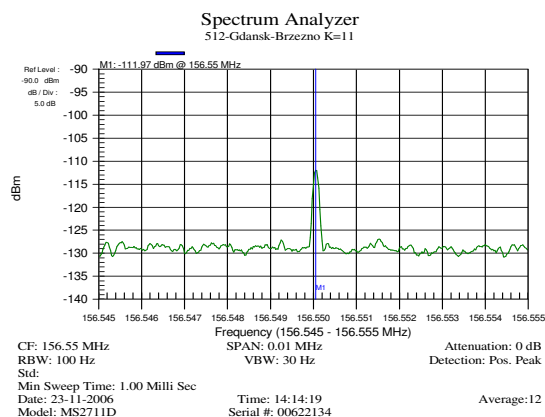
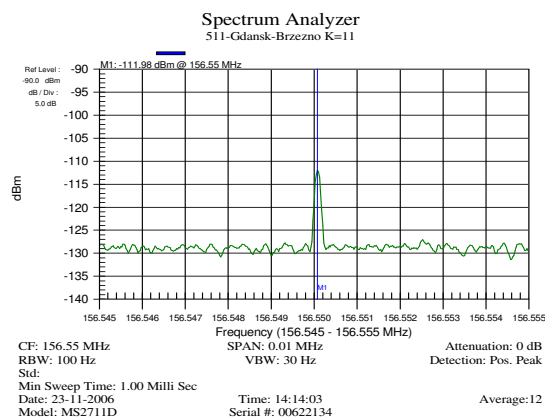
Rys. 14. Pomiary mocy sygnału w punkcie Gdynia, kanał 71, seria 1-5.



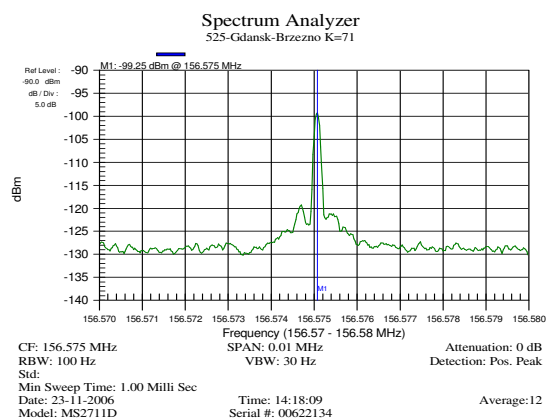
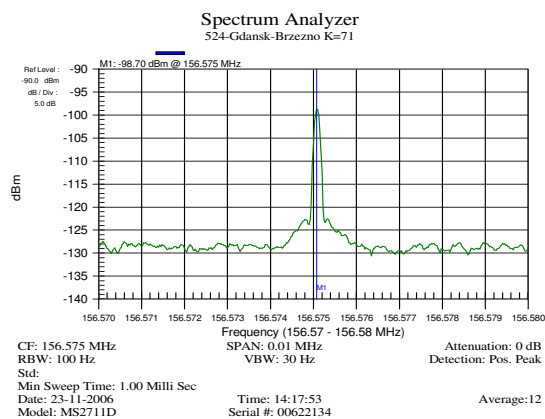
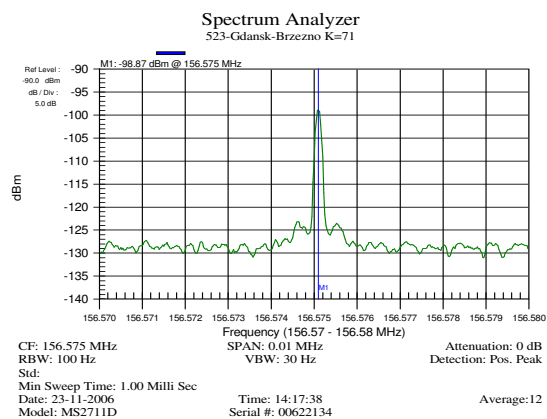
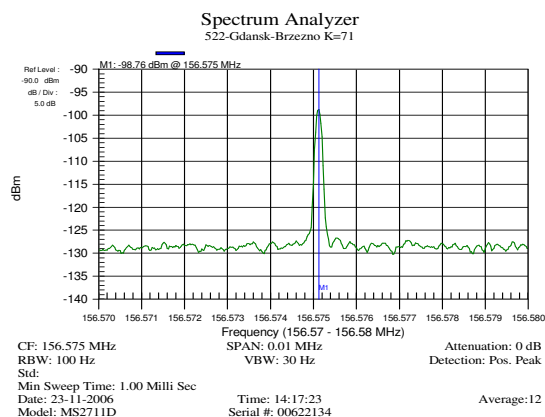
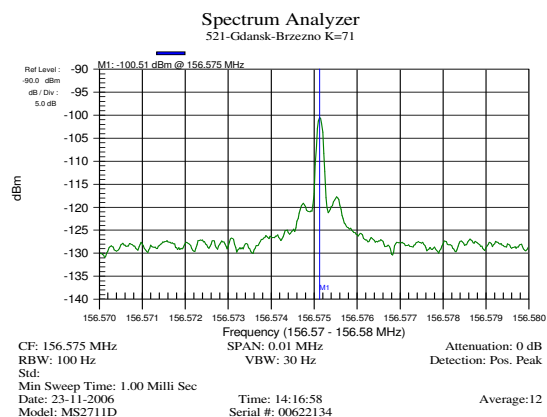
Rys. 15. Pomiar mocy sygnału w punkcie Rewa, kanał 11, seria 1-7.



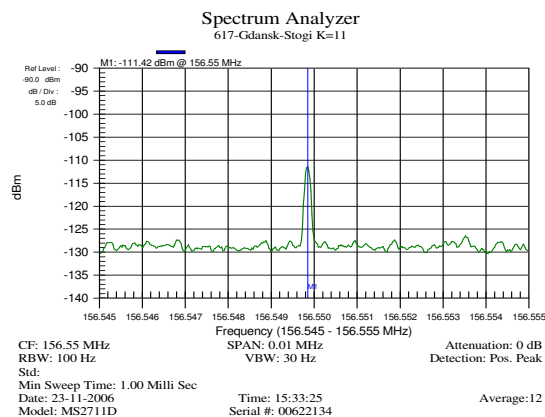
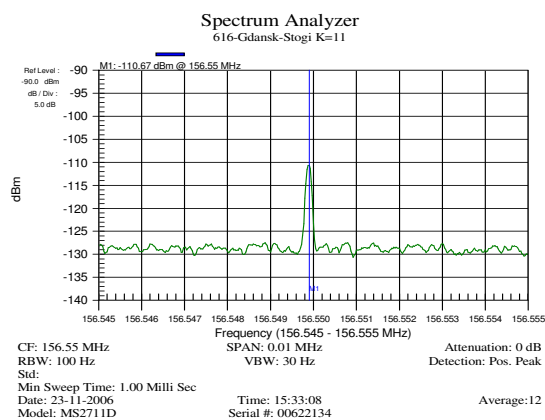
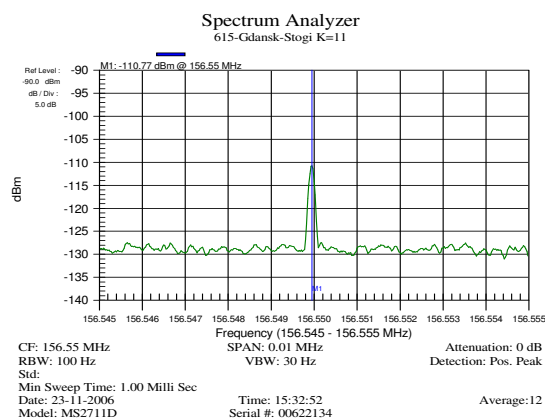
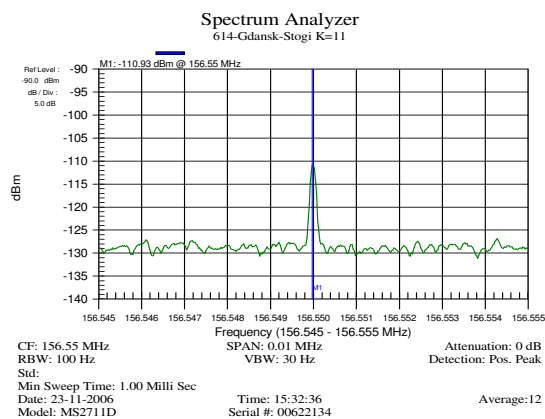
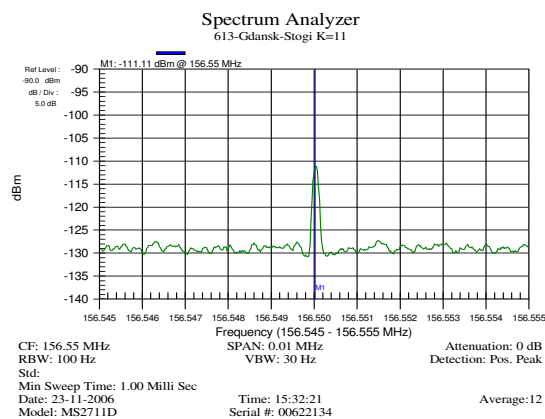
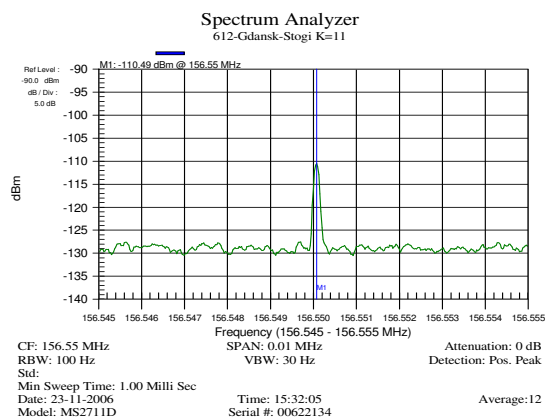
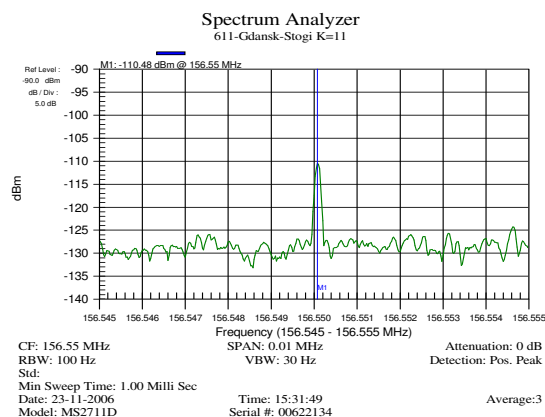
Rys. 16. Pomiary mocy sygnału w punkcie Rewa, kanał 71, seria 1-4.



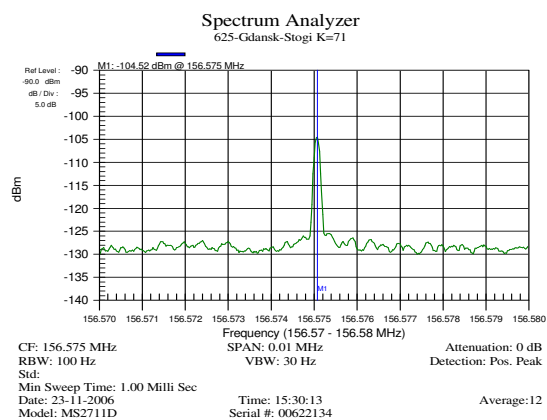
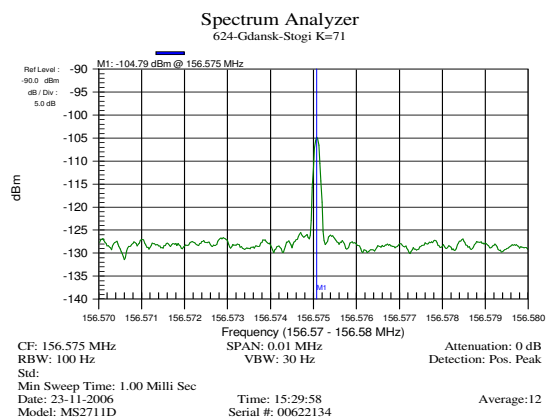
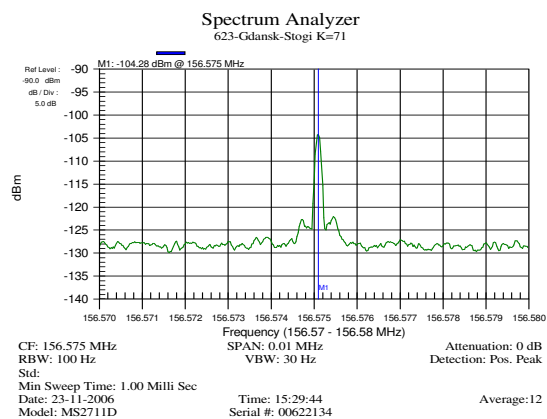
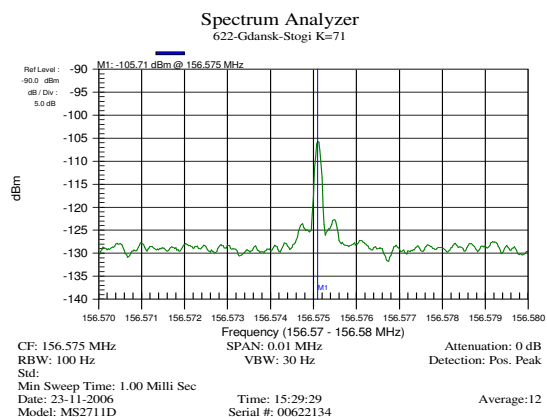
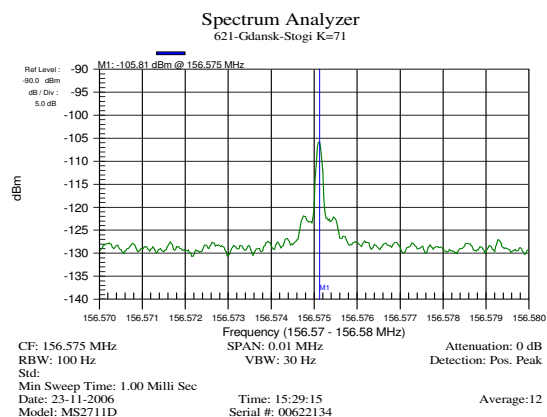
Rys. 17. Pomiary mocy sygnału w punkcie Gdańsk-Brzeźno, kanał 11, seria 1-6.



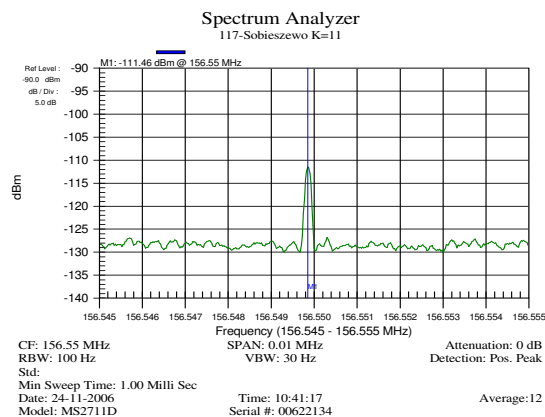
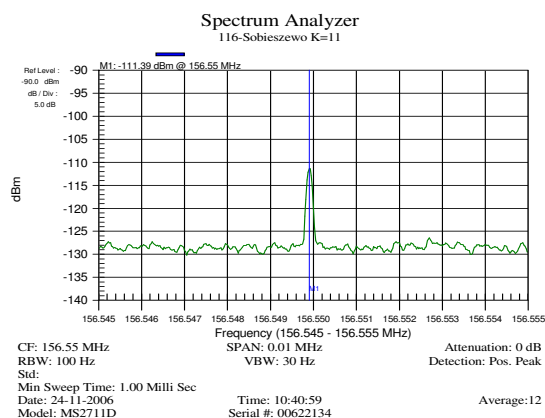
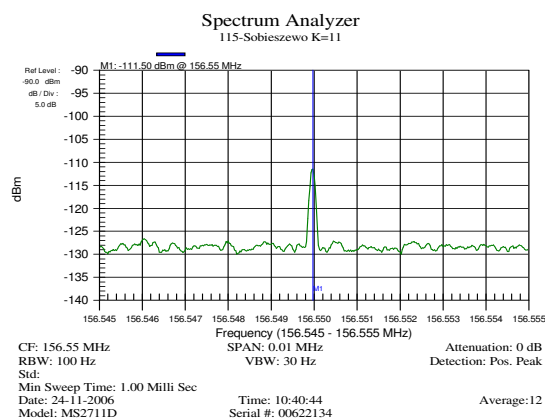
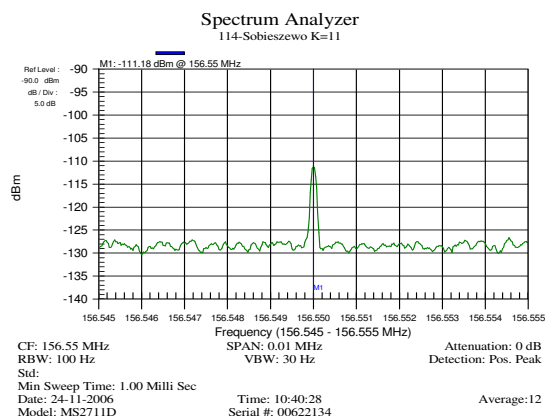
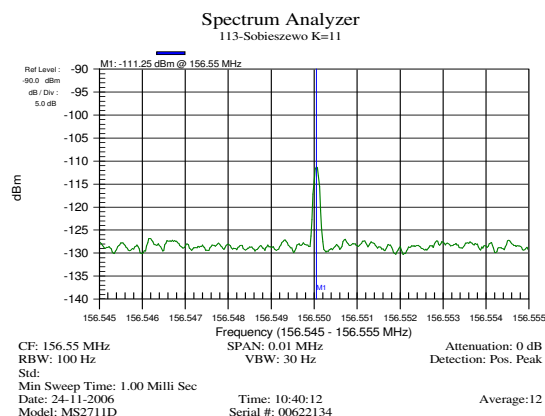
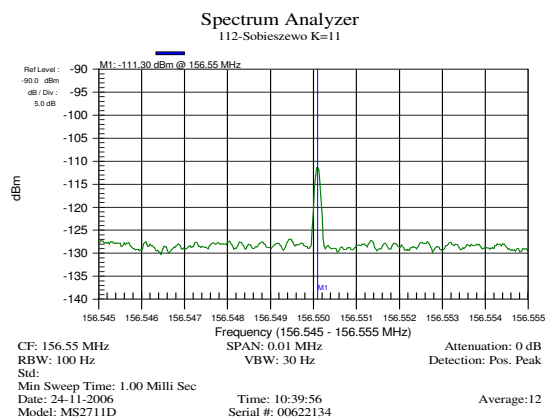
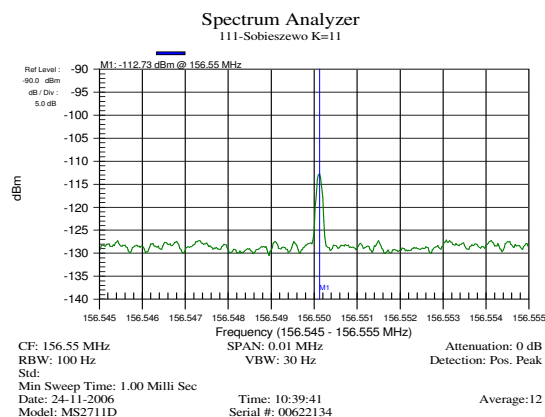
Rys. 18. Pomiary mocy sygnału w punkcie Gdańsk-Brzeźno, kanał 71, seria 1-5.



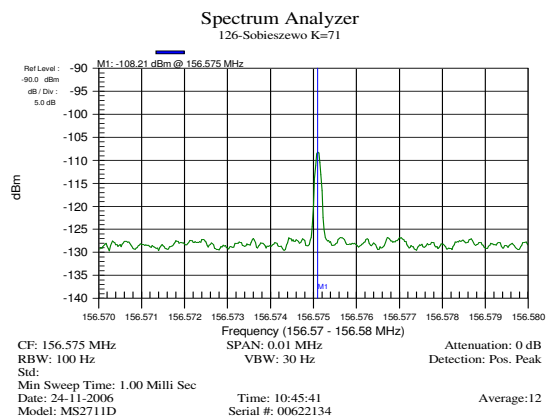
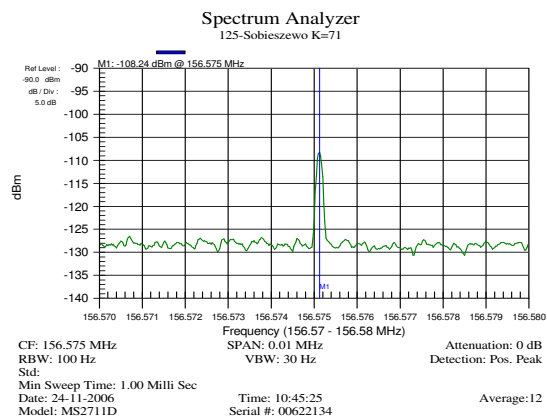
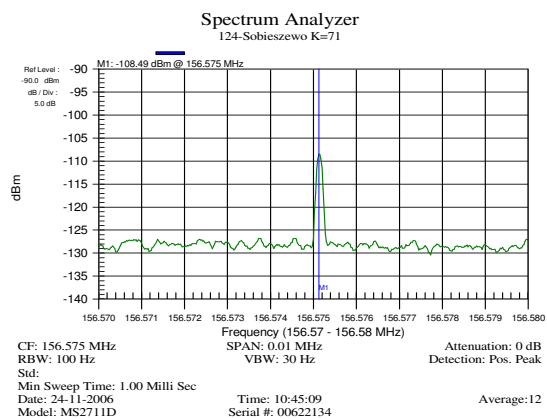
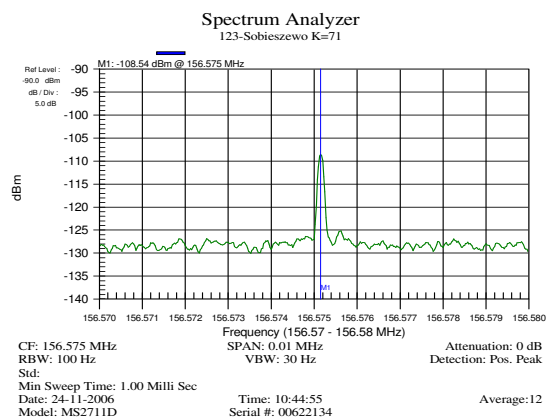
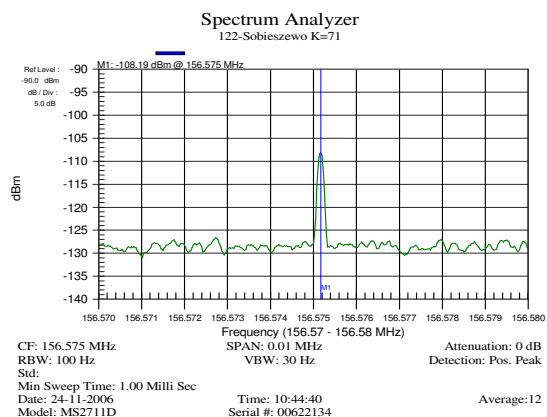
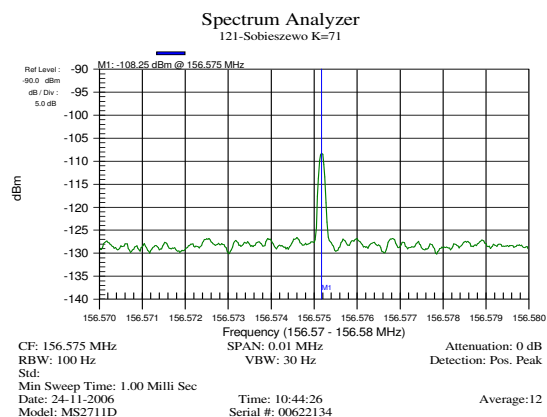
Rys. 19. Pomiary mocy sygnału w punkcie Gdańsk-Stogi, kanał 11, seria 1-7.



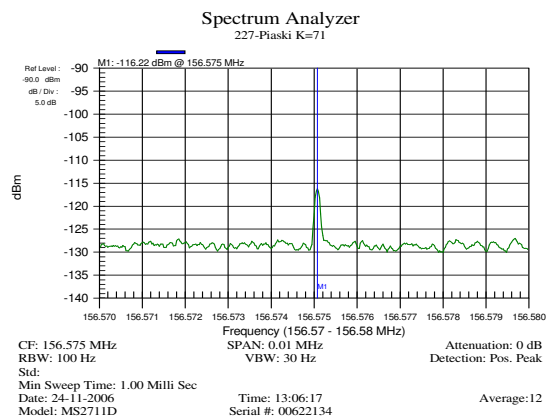
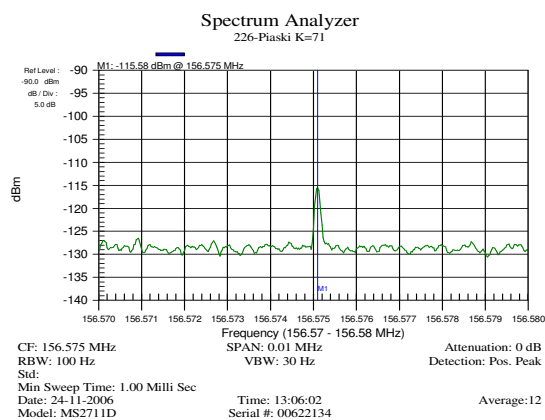
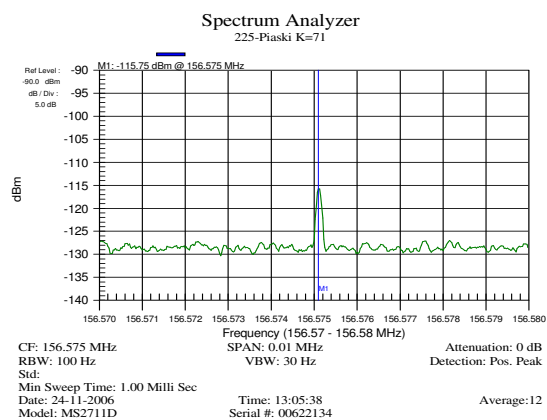
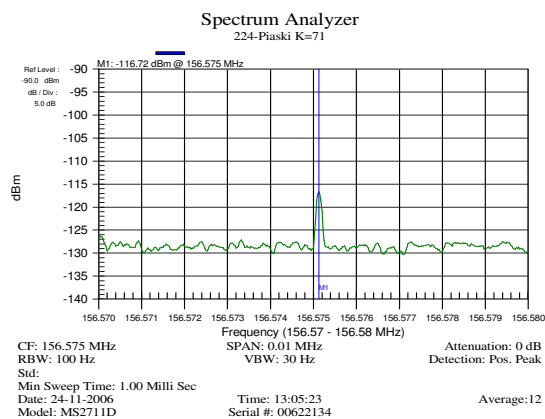
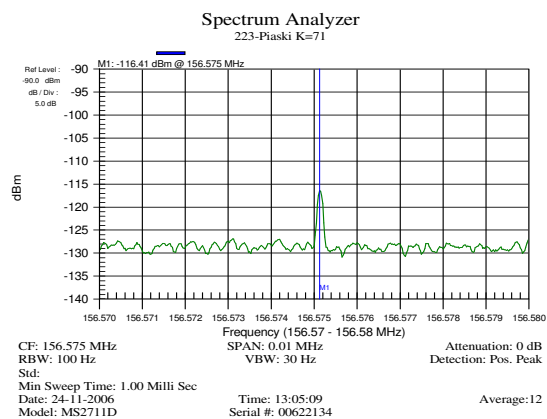
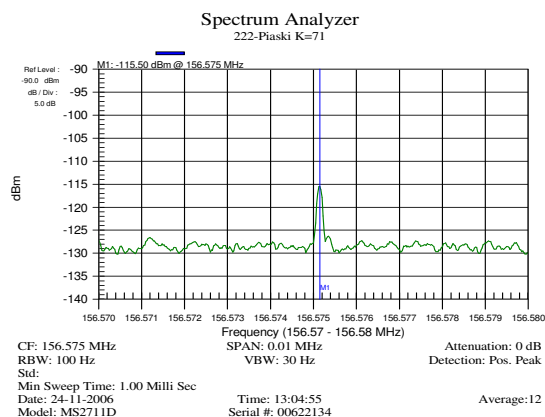
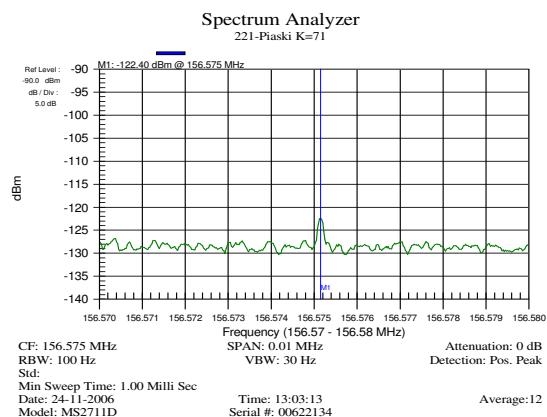
Rys. 20. Pomiar mocy sygnału w punkcie Gdańsk-Stogi, kanał 71, seria 1-5.



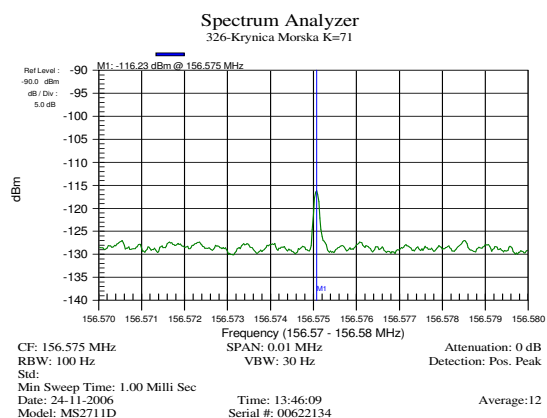
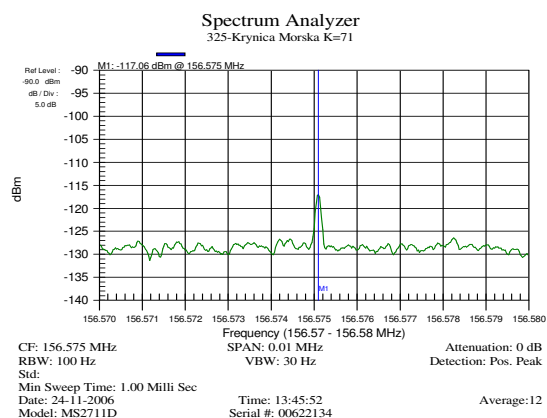
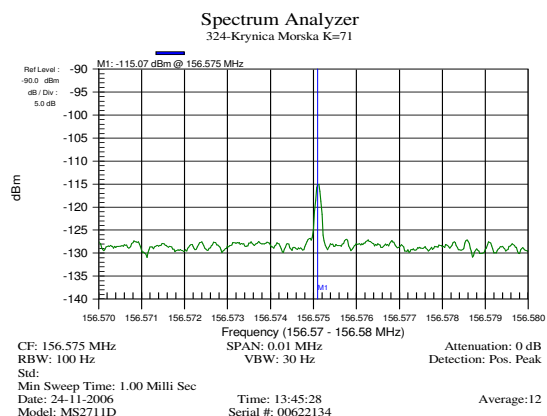
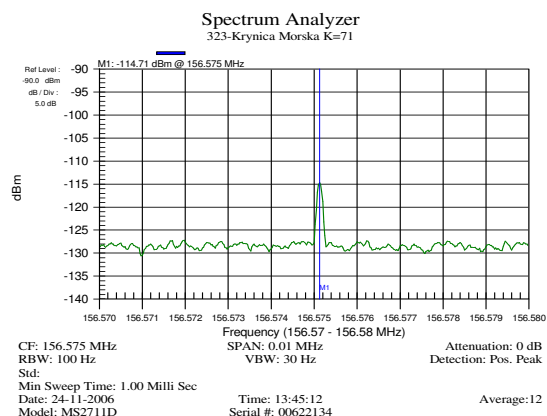
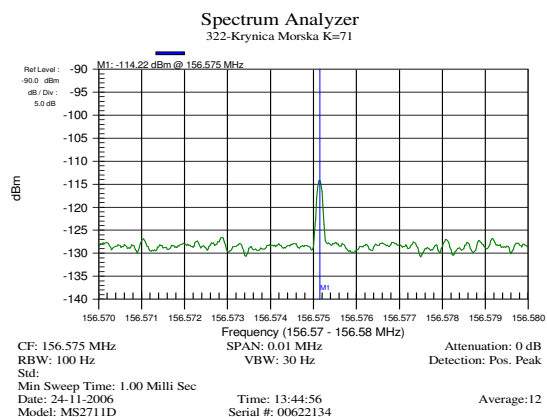
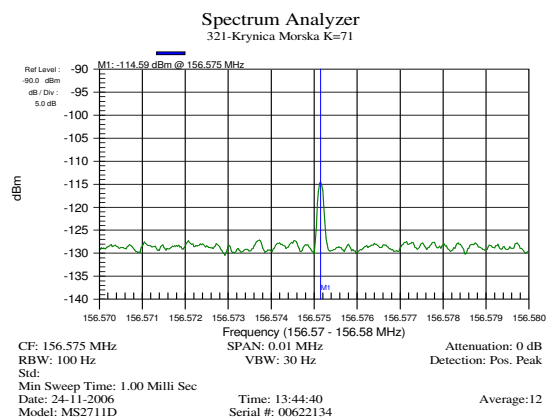
Rys. 21. Pomiary mocy sygnału w punkcie Sobieszewo, kanał 11, seria 1-7.



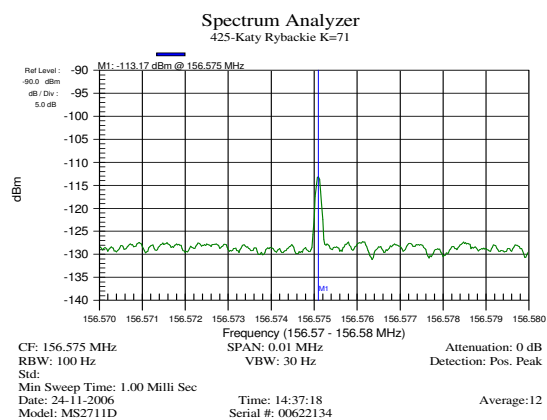
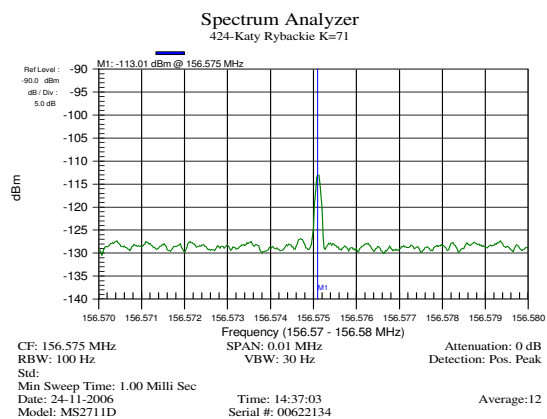
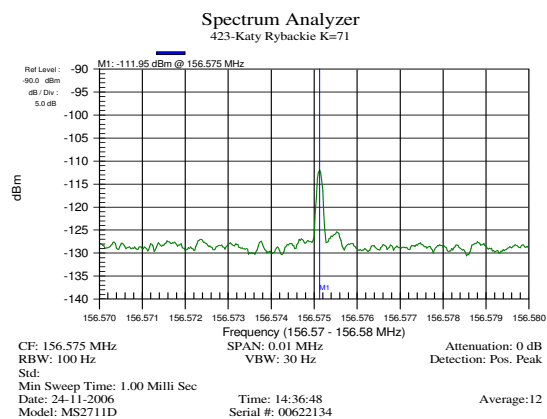
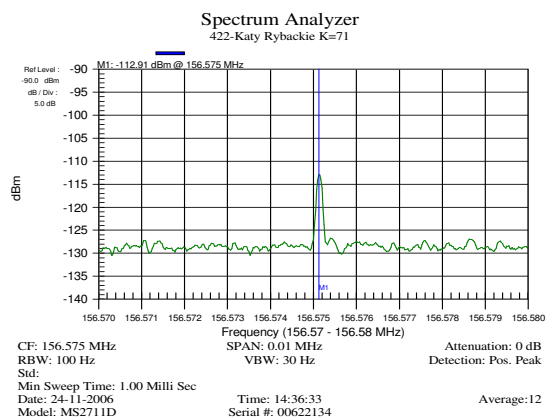
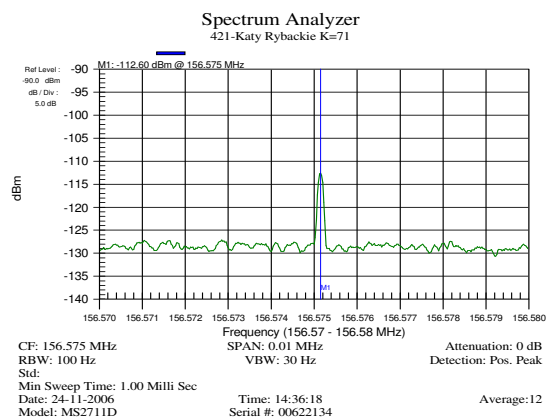
Rys. 22. Pomiar mocy sygnału w punkcie Sobieszewo, kanał 71, seria 1-6.



Rys. 23. Pomiary mocy sygnału w punkcie Piaski, kanał 11, seria 1-7.



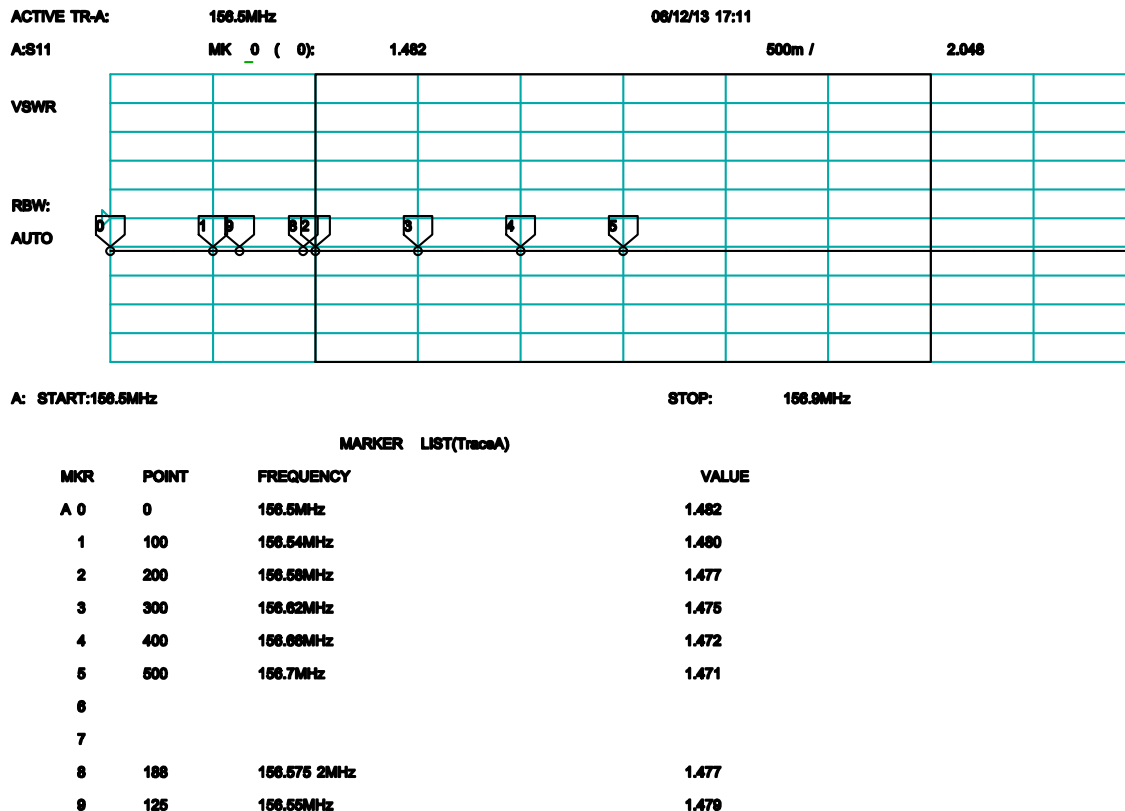
Rys. 24. Pomiary mocy sygnału w punkcie Krynica Morska, kanał 11, seria 1-6.



Rys. 25. Pomiaru mocy sygnału w punkcie Kąty Rybackie, kanał 11, seria 1-5.

Pomiary współczynnika fali stojącej oraz tłumienności kabla pomiarowego,

Pomiary współczynnika fali stojącej (VSWR) oraz tłumienności kabla pomiarowego, po stronie odbiorczej, wykonano przy pomocy analizatora obwodów firmy ANRITSU typu MS4661A (nr seryjny: MT 13770, nr inwentarzowy: 47/2/362). Na rysunku 26 przedstawiono zobrazowanie pomiaru współczynnika fali stojącej.



Rys. 26. Pomiar współczynnika fali stojącej na wyjściu anteny pomiarowej.

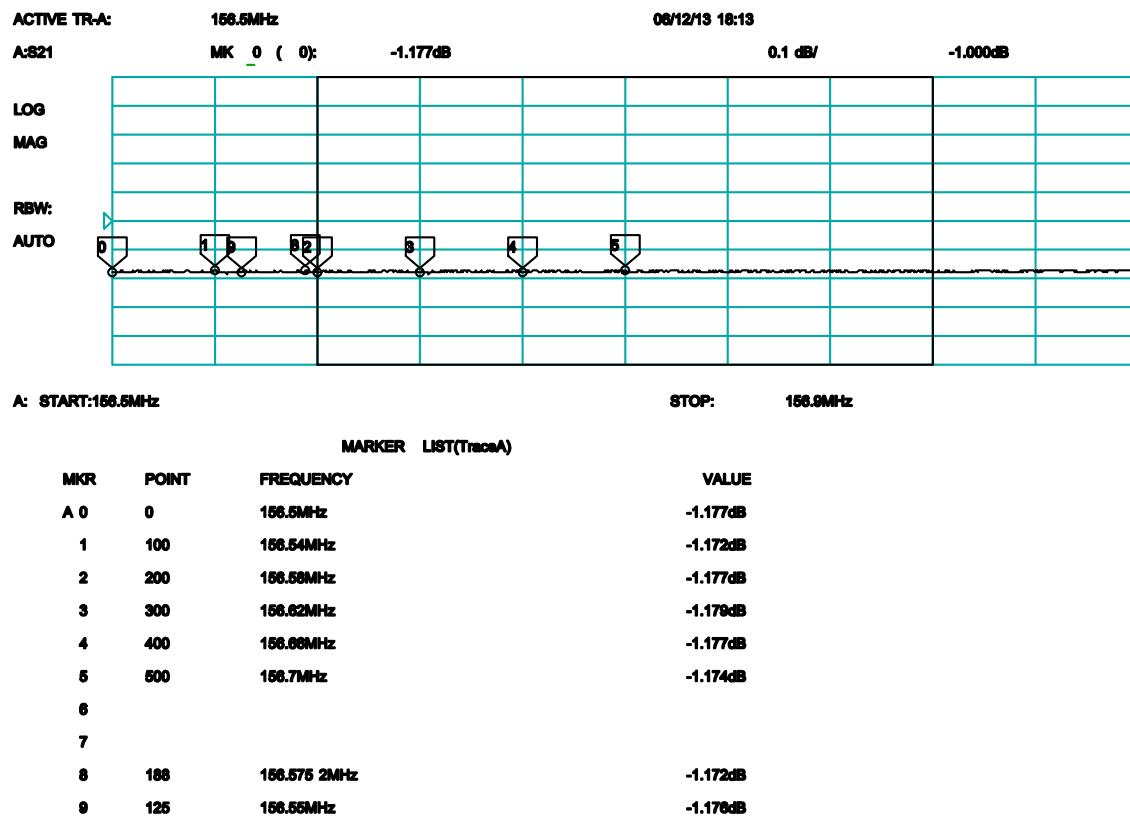
Na podstawie pomiarów, przyjęto, że współczynnik fali stojącej $VSWR = 1,478$. Następnie wyznaczono współczynnik odbicia $|\Gamma| = 0,193$, wg zależności:

$$|\Gamma| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (16)$$

Natomiast, tłumienność niedopasowania $M = 0,165dB$, określono przy pomocy wzoru:

$$M = -10\log(1 - |\Gamma|^2) \quad (17)$$

Na rysunku 27 przedstawiono zobrazowanie pomiaru tłumienności przewodu antenowego stosowanego po stronie odbiorczej.



Rys. 27. Pomiar tłumienności przewodu pomiarowego.

Na podstawie pomiaru tłumienności, przyjęto, że tłumienność kabla pomiarowego w interesującym zakresie częstotliwości wynosi $F = 1,175dB$.

Analiza regresji wielowymiarowej

Poniższe rozważania wzorowane są na [8].

Rozważając na wstępie zagadnienie w sposób ogólny założmy, że rozpatrujemy zmienną losową $(k+1)$ wymiarową o postaci:

$$(Y, X_1, X_2, \dots, X_k) \quad (18)$$

gdzie:

Y – wektor obserwacji dla zmiennej losowej zależnej,

X_1, X_2, \dots, X_k – wektory obserwacji dla zmiennych niezależnych,

k – liczba zmiennych niezależnych.

W pracy wektor Y odpowiada wyznaczonym na podstawie badań pomiarowych wartościom tłumienia propagacyjnego, a wektory X_i odpowiadają zmiennym wyrażonym poprzez długość trasy propagacji, wysokości zawieszenia anteny nadawczej oraz częstotliwość.

Opis zależności zmiennej losowej zależnej Y i zmiennych niezależnych X_1, X_2, \dots, X_k odpowiada klasycznemu modelowi regresji liniowej, jeżeli dla każdego układu wartości x_1, x_2, \dots, x_k warunkowe rozkłady zmiennej Y mają średnie:

$$E(Y | x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k + \beta_{k+1} \quad (19)$$

gdzie:

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ – współczynniki regresji,

β_{k+1} – wartość stała regresji,

oraz wariancje:

$$D^2(Y | x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) = \sigma^2 \quad (20)$$

Klasyczny model regresji liniowej wymaga, aby obserwacji zmiennej losowej Y dokonywać przy ustalonych z góry wartościach zmiennych niezależnych X . Oznacza to, że próbę losową, stanowiącą podstawę sformułowania i oszacowania modelu, określa n (liczebność próby) łącznych obserwacji o postaci:

$$(Y_i, x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{ik}) \quad (21)$$

przy czym gdzie $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Model regresji liniowej wielowymiarowej wyjaśniający obserwacje dla zmiennej losowej Y można zapisać następująco:

$$Y_i = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \beta_{k+1} + \varepsilon_i \quad (22)$$

gdzie:

$i = 1, 2, 3, \dots, n$,

ε_i – zmienne losowe, spełniające zależności:

$$E\varepsilon_i = 0,$$

$$D^2(\varepsilon_i) = E\varepsilon_i^2 = \sigma^2,$$

$$\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = E\varepsilon_i \varepsilon_j = 0 \quad \text{dla } i \neq j.$$

Dla wygody stosowania powyższy model regresji liniowej wielowymiarowej można zapisać w postaci macierzowej, która przyjmuje postać następującą:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} & 1 \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_{k+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (23)$$

czyli jako:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (24)$$

gdzie:

y – wektor obserwacji wektora losowego Y , o wymiarze $(n \times 1)$,

X – macierz obserwacji zmiennych niezależnych (nielosowych), o wymiarze $(n \times (k+1))$,

β – wektor współczynników regresji, o wymiarze $((k+1) \times 1)$,

ε – wektor składników losowych, o wymiarze $(n \times 1)$.

Pozostałe założenia modelu liniowej regresji wielowymiarowej przyjmują postać macierzową: $E\varepsilon = 0$ oraz $E\varepsilon\varepsilon^T = \sigma^2 I$, gdzie 0 – wektor zerowy, o wymiarze $(n \times 1)$, a I – macierz jednostkowa stopnia n

Z określenia macierzy $E\varepsilon\varepsilon^T$ wynika, że element stojący na przecięciu k -tego wiersza i l -tej kolumny jest równy $E\varepsilon_k \varepsilon_l$, czyli oznacza kowariancję składników losowych ε_k i ε_l . Dotyczy to wszystkich elementów macierzy $E\varepsilon\varepsilon^T$ i stąd nosi ona nazwę macierzy kowariancji składników losowych. Można też zauważyć, że dla $k=l$ mamy $E\varepsilon_k^2$, a więc na głównej przekątnej macierzy $E\varepsilon\varepsilon^T$ znajdują się wariancje składników losowych.

Ponadto X jest macierzą o ustalonych elementach (tzn. elementy macierzy X nie są zmiennymi losowymi, tzw. macierz planu), natomiast rząd macierzy X wynosi $k+1$, przy czym ilość obserwacji n musi być co najmniej równa $k+1$. Można to zapisać:

$$r(X) = k+1 \leq n \quad (25)$$

Zapis ten oznacza, że do estymacji parametrów modelu potrzebnych jest co najmniej $k+1$ obserwacji.

Wyrażenie S , podlegające w metodzie najmniejszych kwadratów minimalizacji, przyjmuje w zapisie macierzowym postać:

$$S = \varepsilon^T \varepsilon = (y - X\beta)^T (y - X\beta) \quad (26)$$

Różniczkując S względem wektora β , otrzymuje się wektor:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = -2X^T y + 2X^T X \beta \quad (27)$$

Przyrównując wektor określony równaniem (29) do wektora 0 prowadzi to, do układu równań normalnych o postaci:

$$X^T X \hat{\beta} = X^T y \quad (28)$$

Powyższy układ równań normalnych w macierzowej postaci rozwiniętej jest następujący:

$$\begin{bmatrix} \sum x_{i1}^2 & \sum x_{i1}x_{i2} & \dots & \sum x_{i1}x_{ik} & \sum x_{i1} \\ \sum x_{i2}x_{i1} & \sum x_{i2}^2 & \dots & \sum x_{i2}x_{ik} & \sum x_{i2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum x_{ik}x_{i1} & \sum x_{ik}x_{i2} & \dots & \sum x_{ik}^2 & \sum x_{ik} \\ n & \dots & \dots & \dots & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_{i1}Y_i \\ \sum x_{i2}Y_i \\ \dots \\ \sum Y_i \end{bmatrix} \quad (29)$$

Mnożąc lewostronnie równanie macierzowe (28) przez $(X^T X)^{-1}$, otrzymamy rozwiązanie układu równań (28):

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (30)$$

czyli wektor estymatorów wektora współczynników regresji β .

Uzyskanie jednoznacznego rozwiązania układu równań normalnych wymaga, aby macierz $(X^T X)$ była nieosobliwa, stąd warunek (25), co do rzędu macierzy X staje się oczywisty.

Dysponując wektorem $\hat{\beta}$, który jest określony równaniem (30) można wyznaczyć, wartości teoretyczne zmiennej losowej Y ze wzoru:

$$\hat{y} = X \hat{\beta} \quad (31)$$

oraz wektor reszt:

$$e = y - \hat{y} \quad (32)$$

Suma kwadratów reszt ma, w ogólnym przypadku, następującą wartość oczekiwaną:

$$Ee^T e = \sigma^2 (n - k - 1) \quad (33)$$

Na podstawie powyższej zależności otrzymujemy następujący nieobciążony estymator parametru σ^2 o postaci:

$$s_e^2 = \frac{e^T e}{n - k - 1} \quad (34)$$

Implementacja modelu regresji liniowej do analizy regresji wielowariantowego modelu empirycznego

Wielowariantowy model empiryczny opracowany w ramach pracy jest modelem o wielu zmiennych niezależnych. Do jego analizy, w tym do wyznaczania współczynników regresji, wykorzystano macierzowe ujęcie modelu regresji z wieloma zmiennymi niezależnymi. Niemniej, ze względu na stosunkowo dużą liczbę danych pomiarowych tj. dla próby o liczebności $n = 1500$ zaplanowano proces obliczeniowy wspomagany komputerowo przy użyciu programu napisanego w języku C/C++.

Dla prezentowanej w pracy sytuacji tłumienia propagacyjnego określono, badaną drogą analizy regresji wielowymiarowej, funkcję postaci:

$$L = a \log(d) + b \log(h_1) + c \log(f) + d \quad (35)$$

gdzie :

L – tłumienie trasy propagacyjnej [dB],

d – długość trasy propagacyjnej [km],

h_1 – wysokość zawieszenia anteny stacji nadawczej [m],

f – częstotliwość [MHz],

a, b, c, d – poszukiwane wartości współczynników.

Pojedynczym elementem obserwacji losowej zmiennej zależnej Y , dla tak określonej funkcji jest:

$$Y_i = L_{pom,i} \quad (36)$$

gdzie:

$L_{pom,i}$ – wyznaczone na podstawie pomiarów tłumienie trasy propagacyjnej [dB],

$i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Wektor obserwacji y (wzór (24)) składa się z n takich obserwacji losowych zmiennych niezależnych, i przyjmuje postać:

$$y = \begin{bmatrix} L_{pom,1} \\ L_{pom,2} \\ \dots \\ L_{pom,n} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Natomiast macierz obserwacji na zmiennych niezależnych X ma wymiar $(n \times (k+1))$, gdzie n jest liczebnością próby a k jest liczbą zmiennych opisujących funkcję regresji. W rozpatrywanej w pracy sytuacji, w nawiązaniu do wzoru (35) $k = 3$. Zatem macierz zmiennych niezależnych ma postać:

$$X = \begin{bmatrix} (\log(d))_{11} & (\log(h_1))_{12} & (\log(f))_{13} & 1 \\ (\log(d))_{21} & (\log(h_1))_{22} & (\log(f))_{23} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\log(d))_{n1} & (\log(h_1))_{n2} & (\log(f))_{n3} & 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

Wektor współczynników regresji β przyjmuje postać:

$$\beta = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (39)$$

Z warunku określonego wzorem (25) liczebność próby n musi być co najmniej równa $k+1$, czyli w świetle powyższego co najmniej 4.

W celu wyznaczenia wektora $\hat{\beta}$ (równanie (30)), czyli estymatorów wektora współczynników regresji β , należy wyznaczyć po kolei macierz $(X^T X)$, po czym dokonać jej odwrócenia $(X^T X)^{-1}$ oraz wyznaczyć wektor $(X^T y)$ i ostatecznie wykonać mnożenie macierzy $(X^T X)^{-1}$ przez wektor $(X^T y)$. W ten sposób zostają wyznaczone poszukiwane współczynniki regresji a, b, c, d .

Bibliografia

- [1] ITU-R Recommendation P.1546-2, *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz*, 2005.
- [2] „Międzynarodowa Konwencja o Bezpieczeństwie Życia na Morzu”, 1974 SOLAS, Tekst ujednolicony, 1998 z późniejszymi poprawkami, Polski Rejestr Statków, Gdańsk 1998.
- [3] „*Handbook on the Global Maritime Distress and Safety System*”, IMO, Londyn, 1995.
- [4] Rezolucja IMO A.704.17, IMO, Londyn.
- [5] *Performance Standards for VHF equipment*, IMO, Londyn.
- [6] *Performance Standards for VHF-DSC equipment*, IMO, Londyn.
- [7] Specyfikacja CCIR 370.
- [8] Kiedrowski A. *Specyfika propagacji fal radiowych w systemie dostępowym w warunkach miejskich*, Rozprawa Doktorska, Warszawa, 2004.
- [9] Katulski R.J., *Projektowanie stacji radiokomunikacyjnej*. Przegląd Telekomunikacyjny nr 10/2002.
- [10] Pawłowski W., *Uwarunkowania propagacyjne w współczesnej łączności morskiej*, Technologie Informacyjne, Zeszyty Naukowe Wydziału ETI, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2004.
- [11] Pawłowski W., *Modele propagacyjne dla radiokomunikacji morskiej w świetle dokumentów ITU-R*, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji KKRRiT'02, Gdańsk, 2002.
- [12] Pawłowski W., *Propagacja fal radiowych w paśmie 30-3000 MHz ze szczególnym uwzględnieniem warunków morskich*, VIII Krajowa Konferencja Naukowo-Dydaktyczna "Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania i łączności", Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2001.
- [13] Pawłowski W., *Modele propagacyjne dla tras morskich w paśmie 1-3 GHz.*, VIII Sympozjum Wojskowej Techniki Morskiej, VIII SWTm'01 "Osiągnięcia i perspektywiczne zamierzenia w dziedzinie wojskowej techniki morskiej", Centrum Techniki Morskiej, Gdynia, 2001.
- [14] Saunders S.R., *Antennas & Propagation for Wireless Communication Systems*, John Wiley & Sons, 1999.