



**POLITECHNIKA GDAŃSKA**  
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji  
i Informatyki



---

**Sławomir Jerzy Ambroziak**

**Badania i analiza  
uwarunkowań propagacyjnych  
w środowisku przemysłowym**

Rozprawa doktorska

Promotor:

dr hab. inż. Ryszard Katulski, prof. PG  
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji  
i Informatyki  
Politechnika Gdańska

Gdańsk, 2012



## *Spis treści*

<b>WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ</b>	<b>3</b>
------------------------------------	----------

---

### **ROZDZIAŁ 1.**

<b>WPROWADZENIE</b>	<b>9</b>
---------------------	----------

---

<b>1.1. ZAGADNIENIE PROJEKTOWANIA RUCHOMYCH SYSTEMÓW ŁĄCZNOŚCI BEZPRZEWODOWEJ W ŚRODOWISKU UPZEMYSŁOWIONYM</b>	<b>10</b>
<b>1.2. CELE I TEZY ROZPRAWY</b>	<b>12</b>
<b>1.3. KRÓTKIE OMÓWIENIE GŁÓWNYCH CZĘŚCI ROZPRAWY</b>	<b>13</b>

### **ROZDZIAŁ 2.**

#### **POMIAROWE BADANIA PROPAGACYJNE**

<b>W RZECZYWISTYCH WARUNKACH DUŻEGO TERMINALU KONTENEROWEGO</b>	<b>15</b>
---	-----------

---

<b>2.1. METODOLOGIA WYKONYWANYCH BADAŃ POMIAROWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM ZALECEŃ ITU-R</b>	<b>16</b>
2.1.1. OPIS ENERGETYCZNY RADIOWEGO ŁĄCZA POMIAROWEGO	16
2.1.2. STANDARYZACJA APARATURY BADAWCZEJ	20
2.1.3. STANDARYZACJA PROCEDUR POMIAROWYCH	24
<b>2.2. PROJEKT SYSTEMU POMIAROWEGO</b>	<b>26</b>
2.2.1. STACJONARNA CZĘŚĆ NADAWCZA STANOWISKA POMIAROWEGO	26
2.2.2. RUCHOMA CZĘŚĆ ODBIORCZA STANOWISKA POMIAROWEGO	27
2.2.3. OPROGRAMOWANIE RUCHOMEJ CZĘŚCI ODBIORCZEJ STANOWISKA POMIAROWEGO	34
<b>2.3. OPIS I WSTĘPNA CHARAKTERYSTYKA WYKONANYCH BADAŃ</b>	<b>37</b>
2.3.1. CHARAKTERYSTYKA BADANEGO ŚRODOWISKA UPZEMYSŁOWIONEGO	37
2.3.2. OPIS PRZEPROWADZONYCH BADAŃ	40
2.3.3. WSTĘPNA CHARAKTERYSTYKA WYKONANYCH BADAŃ	40

### **ROZDZIAŁ 3.**

<b>OPIS ANALIZY STATYSTYCZNEJ WYNIKÓW BADAŃ PROPAGACYJNYCH</b>	<b>51</b>
--	-----------

---

<b>3.1. WSTĘPNE PRZETWARZANIE DANYCH POMIAROWYCH</b>	<b>51</b>
<b>3.2. WIELOWYMIAROWA ANALIZA REGRESJI LINIOWEJ</b>	<b>52</b>
3.2.1. PROCEDURA BADANIA REGRESJI	53
3.2.2. PRZYPADEK REGRESJI LINIOWEJ Z JEDNĄ ZMIENNĄ NIEZALEŻNĄ	54
3.2.3. MODEL WIELORAKIEJ REGRESJI LINIOWEJ	60
<b>3.3. METODY STATYSTYCZNEJ OCENY WYNIKÓW BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH</b>	<b>64</b>
3.3.1. BADANIE ISTOTNOŚCI RÓŻNICY POMIĘDZY DWIEMA PRÓBAMI	64
3.3.2. BADANIE ISTOTNOŚCI REGRESJI LINIOWEJ I JEJ WSPÓŁCZYNNIKÓW	65
3.3.3. BADANIE PRZYSTAWALNOŚCI WYNIKÓW EKSPERYMENTALNYCH DO MODELU	67

## **ROZDZIAŁ 4.**

### **ANALIZA PRZYDATNOŚCI ZNANYCH MODELI PROPAGACYJNYCH** **69**

---

<b>4.1. CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH ZNANYCH MODELI PROPAGACYJNYCH</b>	<b>70</b>
4.1.1. MODEL DLA SYSTEMÓW DOSTĘPOWYCH PRACUJĄCYCH W TERMINALU KONTENEROWYM	70
4.1.2. MODEL COST 231 WALFISCHA-IKEGAMIEGO	72
4.1.3. MODELE ITU-R P.1411	76
4.1.4. MODEL ITU-R P.1411 DLA SYTUACJI NLOS1 W ŚRODOWISKACH MIEJSKICH	79
4.1.5. MODEL ITU-R P.1411 DLA SYTUACJI NLOS1 W ŚRODOWISKACH PODMIEJSKICH	83
<b>4.2. ANALIZA PORÓWNAWCZA WYBRANYCH ZNANYCH MODELI PROPAGACYJNYCH</b>	<b>85</b>
4.2.1. ANALIZA MODELU DLA SYSTEMÓW DOSTĘPOWYCH W TERMINALU KONTENEROWYM	86
4.2.2. ANALIZA MODELU COST 231 WALFISCHA-IKEGAMIEGO	91
4.2.3. ANALIZA MODELU ITU-R P.1411 DLA ŚRODOWISK MIEJSKICH	93
4.2.4. ANALIZA MODELU ITU-R P.1411 DLA ŚRODOWISK PODMIEJSKICH	96
<b>4.3. STATYSTYCZNE DOPASOWANIE WYBRANYCH MODELI PROPAGACYJNYCH</b>	<b>98</b>
4.3.1. DOPASOWANIE MODELU DLA SYSTEMÓW DOSTĘPOWYCH PRACUJĄCYCH NA TERENIE TERMINALU KONTENEROWEGO	100
4.3.2. DOPASOWANIE MODELU COST 231 WALFISCHA-IKEGAMIEGO	107
4.3.3. DOPASOWANIE MODELU ITU-R P.1411 DLA ŚRODOWISK MIEJSKICH	111
4.3.4. DOPASOWANIE MODELU ITU-R P.1411 DLA ŚRODOWISK PODMIEJSKICH	116
4.3.5. PORÓWNANIE WYBRANYCH MODELI PRZED I PO STATYSTYCZNYM DOPASOWANIU – WYKAZANIE TEZY POMOCNICZEJ	122

## **ROZDZIAŁ 5.**

### **NOWY EMPIRYCZNY MODEL TŁUMIENIA PROPAGACYJNEGO DLA TERMINALU KONTENEROWEGO** **125**

---

<b>5.1. OKREŚLENIE CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCYCH NA TŁUMIENIE PROPAGACYJNE</b>	<b>125</b>
<b>5.2. UJĘCIE ANALITYCZNE NOWEGO EMPIRYCZNEGO MODELU TŁUMIENIA PROPAGACYJNEGO</b>	<b>130</b>
<b>5.3. ANALIZA NOWEGO MODELU EMPIRYCZNEGO</b>	<b>136</b>
5.3.1. ANALIZA MODELU RTK DLA OBSZARU LOS	136
5.3.2. ANALIZA MODELU RTK DLA OBSZARU KONTENEROWEGO	144
5.3.3. ANALIZA MODELU RTK DLA OBSZARU POZAKONTENEROWEGO	152
5.3.4. ANALIZA MODELU RTK DLA WSZYSTKICH OBSZARÓW	160
<b>5.4. ANALIZA PORÓWNAWCZA MODELU RTK Z WYBRANYMI MODELAMI I OCENA JEGO PRZYDATNOŚCI</b> – WYKAZANIE TEZY	<b>162</b>

### **PODSUMOWANIE** **167**

---

### **LITERATURA** **171**

---

## Wykaz ważniejszych oznaczeń

- $\alpha$  – poziom istotności testu statystycznego
- $b$  – średni odstęp między budynkami
- $\beta$  – wektor zawierający współczynniki regresji
- $\beta_i$  –  $i$ -ty współczynnik regresji
- $\hat{\beta}$  – wektor zawierający estymatory współczynników regresji
- $\hat{\beta}_i$  – estymator  $i$ -tego współczynnika regresji
- $D$  – długość ortodromiczna między pozycjami na kuli ziemskiej
- $D(\hat{\beta}_1), D(\hat{\beta}_2)$  – odchylenia standardowe estymatorów  $\hat{\beta}_1$  i  $\hat{\beta}_2$
- $d$  – długość trasy propagacyjnej
- $d_l$  – odległość między miejscem instalacji anteny stacji bazowej a pierwszym rzędem pól składowych przeznaczonych dla kontenerów
- $d_R$  – odległość między miejscem instalacji anteny stacji bazowej a końcem ostatniego rzędu pól składowych przeznaczonych dla kontenerów
- $\Delta h_{SR}$  – różnica pomiędzy średnią wysokością budynków a wysokością zawieszenia anteny stacji ruchomej
- $\Delta h_{SB}$  – różnica pomiędzy wysokością zawieszenia anteny stacji bazowej a średnią wysokością budynków
- $\epsilon$  – wektor zawierający składniki losowe regresji
- $f$  – częstotliwość sygnału radiowego
- $F$  – statystyka testowa
- $F_\alpha$  – wartość krytyczna testu  $F$  na poziomie istotności  $\alpha$
- $\varphi$  – kąt nadejścia fali radiowej do anteny stacji ruchomej, kąt orientacji ulicy
- $\varphi^2$  – współczynnik indeterminacji
- $\varphi_{SB}$  – szerokość geograficzna miejsca instalacji anteny stacji bazowej

- $\varphi_{SR}$  – szerokość geograficzna miejsca aktualnego położenia anteny stacji ruchomej
- $G$  – zysk energetyczny anteny odniesienia w skali logarytmicznej
- $g$  – zysk energetyczny anteny odniesienia w skali liniowej
- $G_{AN}$  – zysk energetyczny pomiarowej anteny nadawczej
- $G_{AO}$  – zysk energetyczny pomiarowej anteny odbiorczej
- $H_0$  – statystyczna hipoteza zerowa
- $H_1$  – statystyczna hipoteza alternatywna
- $h_{k,t}$  – średnia wysokość stosu kontenerów na obszarze terminalu kontenerowego
- $h_{k,i}$  – średnia wysokość stosu kontenerów w  $i$ -tym rzędzie pól składowych
- $h_{k,d}$  – średnia wysokość stosu kontenerów na drodze propagacji sygnału radiowego
- $h_{k,r+1}$  – średnia wysokość stosu kontenerów w rzędzie pól składowych znajdującym się za stacją ruchomą
- $h_{SB}$  – wysokość zawieszenia anteny stacji bazowej
- $h_{SR}$  – wysokość zawieszenia anteny stacji ruchomej
- $h_{sr}$  – średnia wysokość przeszkód terenowych (stosów kontenerów, budynków) na trasie propagacji sygnału radiowego
- $k$  – liczba zmiennych objaśniających modelu regresji
- $l$  – długości trasy propagacji fali radiowej nad budynkami
- $L_{dod}$  – tłumienie dodatkowe wynikające z rzeczywistych warunków propagacyjnych
- $L_K$  – tłumienie fali radiowej w obszarze kontenerowym
- $L_{LOS}$  – tłumienie fali radiowej w obszarze LOS
- $L_{msd}$  – tłumienie wynikające z odbić sygnału radiowego od powierzchni ścian budynków
- $L_{PK}$  – tłumienie fali radiowej w obszarze pozakontenerowym
- $L_{RTK}$  – tłumienie fali radiowej obliczone przy użyciu modelu RTK
- $L_s$  – tłumienie systemowe (ang. *system loss*)

- $L_T$  – tłumienie całkowite łącza pomiarowego (ang. *total loss*)
- $L_m$  – tłumienie antenowego toru nadawczego
- $L_{to}$  – tłumienie antenowego toru odbiorczego
- $L_{ori}$  – empiryczny współczynnik korekcyjny, zależny od kąta orientacji ulicy
- $L_{p,i}$  – pomierzona wartość tłumienia propagacyjnego w  $i$ -tym łączy radiowym
- $L_{p,śr}$  – wartość średnia pomierzonego tłumienia propagacyjnego
- $L_{o,i}$  – obliczona wartość tłumienia propagacyjnego w  $i$ -tym łączy radiowym
- $L, L_{prop}$  – tłumienie propagacyjne
- $L_{rts}$  – tłumienie występujące wskutek dyfrakcji i rozproszenia sygnału radiowego na krawędziach dachów budynków
- $L_{wp}$  – tłumienie propagacyjne wolnej przestrzeni
- $\lambda$  – długość fali sygnału radiowego
- $\lambda_{SB}$  – długość geograficzna miejsca instalacji anteny stacji bazowej
- $\lambda_{SR}$  – długość geograficzna miejsca aktualnego położenia anteny stacji ruchomej
- $ME$  – błąd średni (ang. *Mean Error*)
- $n, N$  – liczebność próby
- $P_{nad}$  – moc dostarczana na zaciski pomiarowej anteny nadawczej wyrażona w wartościach względnych
- $p_{nad}$  – moc dostarczana na zaciski pomiarowej anteny nadawczej wyrażona w wartościach bezwzględnych
- $P_{NP}$  – moc dostarczana przez nadajnik pomiarowy wyrażona w wartościach względnych
- $p_{NP}$  – moc dostarczana przez nadajnik pomiarowy wyrażona w wartościach bezwzględnych
- $P_{odb}$  – moc dostępna na zaciskach pomiarowej anteny odbiorczej wyrażona w wartościach względnych
- $p_{odb}$  – moc dostępna na zaciskach pomiarowej anteny odbiorczej wyrażona w wartościach bezwzględnych

- $P_{OP}$  – moc dostępna na wejściu odbiornika pomiarowego wyrażona w wartościach względnych
- $p_{OP}$  – moc dostępna na wejściu odbiornika pomiarowego wyrażona w wartościach bezwzględnych
- $P_{OP}^i$  – mediana wartości mocy sygnału pomiarowego na wejściu odbiornika dla  $i$ -tego podzbioru danych pomiarowych
- $r$  – numer rzędu pól składowych przed stacją ruchomą (licząc od stacji bazowej)
- $R$  – liczba wszystkich rzędów pól składowych na terenie terminalu kontenerowego
- $R^2$  – współczynnik determinacji
- $R_{popr}^2$  – poprawiony współczynnik determinacji
- $S$  – funkcja-kryterium metody najmniejszych kwadratów
- $s_{\hat{\beta}_i}$  – odchylenie standardowe  $i$ -tego estymatora współczynnika regresji ( $\hat{\beta}_i$ )
- $SEE, s_e$  – standardowy błąd estymacji (ang. *Standard Error of Estimate*)
- $S_i$  – powierzchniowy współczynnik zajętości  $i$ -tego rzędu pól składowych
- $S_t$  – powierzchniowy współczynnik zajętości terminalu kontenerowego
- $t$  – statystyka testowa
- $t_\alpha$  – wartość krytyczna testu  $t$  na poziomie istotności  $\alpha$
- $t_r$  – minimalny czas trwania pojedynczego pomiaru na danej częstotliwości
- $v$  – prędkość pojazdu pomiarowego
- $\mathbf{V}(\hat{\boldsymbol{\beta}})$  – macierz kowariancji wektora estymatorów  $\hat{\boldsymbol{\beta}}$
- $w$  – odstęp między budynkami, gdzie znajduje się stacja ruchoma
- $W_k$  – współczynnik korekcyjny części odbiorczej łączy pomiarowego
- $\mathbf{X}$  – macierz obserwacji zmiennych niezależnych
- $x_i$  –  $i$ -ta realizacja (obserwacja) zmiennej objaśniającej
- $\bar{x}$  – wartość średnia zmiennej objaśniającej, obliczona z próby
- $\mathbf{Y}$  – wektor obserwacji zmiennej zależnej



$\hat{\mathbf{Y}}$  – wektor wartości teoretycznych zmiennej zależnej

$\hat{y}_i$  –  $i$ -ta wartość zmiennej objaśnianej, oszacowana na podstawie przyjętego modelu regresji

$y_i$  – pomierzona  $i$ -ta realizacja (obserwacja) zmiennej objaśnianej

$\bar{y}$  – wartość średnia zmiennej objaśnianej, obliczona z próby

$Z$  – statystyka testowa

$Z_\alpha$  – wartość krytyczna testu  $Z$  na poziomie istotności  $\alpha$



# ***Rozdział 1.***

## ***Wprowadzenie***

Systemy łączności bezprzewodowej opierają się na transmisji różnego rodzaju informacji (np. sygnałów mowy, danych, itp.) przez ośrodek propagacji fal radiowych, którego parametry są w dużym stopniu niezależne od człowieka. Zarówno przetwarzanie i nadawanie wiadomości, jak ich odbiór i odtwarzanie zależą od układu i konstrukcji odpowiednich urządzeń. Warunki propagacji fal radiowych w bezprzewodowym medium transmisyjnym są zależne od wielu czynników i okoliczności, na które działanie ludzkie nie może mieć wpływu. W każdym miejscu, czasie i zakresie częstotliwości istnieją określone, w sensie statystycznym, warunki propagacyjne, których znajomość jest konieczna do projektowania i wykorzystywania systemów bezprzewodowych [16].

Również na obszarach uprzemysłowionych systemy łączności w coraz większym stopniu bazują na łączach bezprzewodowych, realizowanych w ramach różnych ruchomych systemów radiokomunikacyjnych. Takie podejście ma wiele zalet, jednakże wykorzystywane medium propagacyjne jest czynnikiem przysparzającym wielu trudności projektantom sieci bezprzewodowych, a niezawodność działania systemu radiowego, którego częścią jest kanał propagacyjny, jest określana również niezawodnością przejścia fali przez ten kanał [33]. Sprawą zasadniczą jest zatem konieczność wyznaczenia z określoną dokładnością tłumienia fali radiowej (tzw. tłumienia propagacyjnego [52]) w zindustrializowanym środowisku propagacyjnym, co jest niezbędne dla przeprowadzenia bilansu energetycznego łącza radiokomunikacyjnego, na czym opiera się projektowanie tego łącza z punktu widzenia spełnienia wymagań energetycznych [70]. Należy podkreślić, że badania propagacyjne w nietypowych środowiskach są jednym z wyzwań przyszłej telekomunikacji bezprzewodowej [27], a morski terminal kontenerowy jest z pewnością przykładem takiego środowiska propagacyjnego.

W niniejszym rozdziale opisane zostały zagadnienia związane z projektowaniem ruchomych systemów bezprzewodowych w środowisku uprzemysłowionym, następnie przedstawiono cel i tezę rozprawy, na końcu zaś omówiono główne jej części.

## **1.1. Zagadnienie projektowania ruchomych systemów łączności bezprzewodowej w środowisku uprzemysłowionym**

Podczas projektowania systemów telekomunikacyjnych bardzo istotne jest poznanie charakterystyki kanału transmisyjnego, którego własności propagacyjne mają decydujący wpływ na możliwą do osiągnięcia szybkość transmisji, czy też jej jakość. W związku z powyższym przed zaprojektowaniem dowolnego systemu telekomunikacyjnego – w tym też systemu radiokomunikacji ruchomej – projektant musi mieć świadomość własności kanału przez ten system wykorzystywanego [106]. Nie można zapominać, że łącze radiowe cechuje wiele niedogodności, m.in. duże tłumienia, niestabilne warunki transmisyjne, czy też podatność na zakłócenia [84].

Jednym z kluczowych parametrów kanału radiowego jest jego tłumienie propagacyjne, zdefiniowane w [45] jako stosunek zastępczej mocy promieniowanej izotropowo przez antenę nadawczą rozpatrywanego łącza radiowego i mocy dostępnej na zaciskach izotropowej anteny odbiorczej tego łącza. Innymi słowy, tłumienie propagacyjne określa ilościowo stopień osłabienia sygnału radiowego pomiędzy antenami łącza bezprzewodowego, z uwzględnieniem zysków energetycznych tych anten na rozpatrywanych kierunkach propagacji oraz przy założeniu dopasowania polaryzacyjnego tego łącza. Z tłumieniem propagacyjnym związane jest pojęcie zasięgu systemu radiokomunikacyjnego, które jest jednym z najważniejszych dla użytkownika, ale także jednym z najtrudniejszych do wyspecyfikowania [19].

W przypadku łącza radiowego pracującego w obrębie systemu ruchomego mamy do czynienia ze zmianą długości oraz geometrii trasy propagacyjnej, z nieregularnym ukształtowaniem terenu, różnorodnością jego zabudowy, czy też ze zmianami warunków atmosferycznych, przez co szacowanie tłumienia propagacyjnego takiego łącza staje się zadaniem niezwykle trudnym, które nie ma prostego analitycznego rozwiązania [80]. Stosując metody statystyczne w połączeniu z charakterystyką środowiska propagacyjnego pod względem właściwości elektromagnetycznych oraz znajomością zjawisk fizycznych, towarzyszących rozchodzeniu się fal możliwe jest opracowywanie modeli empirycznych, służących do szacowania tłumienia propagacyjnego z zadowalającą dokładnością.

Zagadnienia dotyczące modelowania tłumienia propagacyjnego dla systemów radiokomunikacji ruchomej zostały opisane przy pomocy licznych modeli propagacyjnych, z których w kontekście tematu rozprawy na szczególną uwagę zasługują modele

COST 231 Walfischa-Ikegami [31] oraz ITU-R P.1411 [44]. Jednakże modele te przeznaczone są do modelowania tłumienia propagacyjnego w środowisku miejskim, zarówno o charakterze silnie zurbanizowanym, jak i podmiejskim, a także dla obszarów wiejskich. Środowiska te w znacznym stopniu różnią się od uwarunkowań propagacyjnych mających miejsce na terenach uprzemysłowionych, których szczególnym przypadkiem jest terminal kontenerowy. Propagacja fal radiowych w tym środowisku odbywa się w obecności metalowych ścian, tworzonych przez kontenery ułożone w stosy o zróżnicowanej wysokości, a jak wiadomo fala elektromagnetyczna nie może przenikać przez materiały przewodzące na które pada, zatem niemal cała ich energia jest odbijana [96]. Nie bez znaczenia jest także zjawisko ugięcia fal radiowych na krawędziach tych stosów oraz propagacja fal w „kanionach” wyznaczonych przez równomiernie rozłożone ciągi komunikacyjne, służące do przemieszczania się ciągników kontenerowych i suwnic placowych.

Opracowanych zostało wiele modeli dla środowisk przemysłowych, jednak dotyczą one propagacji sygnału radiowego w środowiskach wewnątrzbudynkowych, takich jak fabryki [95, 102], huty metali [24], zamknięte parkingi [94], lotniska [23], tunele [111], czy też elektrownie atomowe [73]. W większości powyższe modele są modelami empirycznymi, opracowanymi na podstawie zbiorów danych pomiarowych o różnych liczebnościach. Wyjątkami są modele dla tych środowisk, w których przeprowadzenie badań jest bardzo trudno wykonalne lub wręcz niemożliwe, ze względu na ich charakter, np. elektrownia atomowa, czy też tunel. W literaturze przedmiotu można także znaleźć liczne prace dotyczące rozchodzenia się fal radiowych w środowiskach kopalnianych, między innymi [21, 87, 99], jednak i te stanowią zagadnienie bardzo odległe od problematyki otwartych środowisk przemysłowych.

Na świecie podjęte zostały także prace, których celem było opracowanie modeli dla szeroko pojętego środowiska kontenerowego, jednakże dotyczą one scenariuszy bardzo odmiennych od głównego przedmiotu niniejszej rozprawy. Dla przykładu w [109] zaproponowano model do predykcji strat propagacyjnych między etykietami RFID zamontowanymi na kontenerach a czytnikami zainstalowanymi na bramach wjazdowych do terminalu. Z kolei w [103] autorzy analizują propagację fal radiowych dla trzech scenariuszy bezprzewodowej transmisji danych: między sensorami umieszczonymi na zewnętrznej ścianie kontenera, między sensorem na zewnętrznej i na wewnętrznej ścianie kontenera oraz scenariusz, w którym sensor zamontowany na ścianie kontenera ustawionego

w stosie przesyła dane poprzez sieć GSM lub UMTS. Trzeci scenariusz – przez wzgląd na nieruchomość łącza radiowego – stanowi bardziej przypadek systemu stałego niż ruchomego. Ponadto autorzy nie proponują żadnego modelu opisującego zjawiska propagacyjne, ograniczając się jedynie do prezentacji wyników pomiarów. Zarówno zastosowane przez autorów publikacji [103] metody badawcze, jak i uzyskane wyniki były podczas konferencji EuCAP 2012 (ang. *European Conference on Antennas and Propagation*) w Pradze przedmiotem ożywionej dyskusji z autorem niniejszej rozprawy.

Należy wspomnieć, iż podczas prac badawczych prowadzonych w Katedrze Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych Politechniki Gdańskiej opracowany został model propagacyjny dla terminalu kontenerowego [9, 66], jednakże przeznaczony on jest do modelowania tłumienia propagacyjnego w radiowych systemach dostępowych, których przykładem może być bezprzewodowy system monitorowania ładunków kontenerowych [63, 65, 68]. W ruchomych systemach radiokomunikacyjnych mamy do czynienia z użytkownikami poruszającymi się po terenie terminalu wzdłuż przeznaczonych do tego celu ciągów komunikacyjnych, a zjawiska mające wpływ na tłumienie sygnałów radiowych w tych warunkach są dużo bardziej złożone.

W takim stanie rzeczy istnieje potrzeba opracowania – na podstawie badań pomiarowych – empirycznego modelu tłumienia propagacyjnego dla środowiska uprzemysłowionego, jakim jest terminal kontenerowy, dla potrzeb projektowania ruchomych systemów bezprzewodowych pracujących w tym środowisku.

Niezwykle ważnym zastosowaniem nowego modelu propagacyjnego, obok wsparcia projektowania systemów bezprzewodowych do ochrony osób pracujących w warunkach niebezpiecznych [54], może być wspieranie usług lokalizacyjnych na obszarach uprzemysłowionych w warunkach zagrożenia życia ludzkiego [37].

## **1.2. Cele i tezy rozprawy**

Projektowanie ruchomych systemów radiowych w uprzemysłowionym środowisku terminalu kontenerowego jest zadaniem trudnym, natomiast projektanci pozbawieni są narzędzi matematycznych przeznaczonych do modelowania tłumienia propagacyjnego w tak specyficznym środowisku. Wiadomym jest fakt, że ze względu na podobieństwo struktury zabudowy terminalu kontenerowego z regularną zabudowa miejską, podczas projektowania powszechnie stosowane są znane modele propagacyjne, przeznaczone dla środowisk zurbanizowanych. Jednakże, co zostało dowiedzione w dalszej części niniej-

szej rozprawy, podejście takie powoduje znaczące błędy w szacowaniu tłumienia propagacyjnego, co może skutkować niewystarczającym pokryciem radiowym terminalu kontenerowego, bądź zakłócaniem pracy systemów bezprzewodowych pracujących w sąsiedztwie rozważanego obszaru.

W świetle powyższego, celem niniejszej rozprawy jest opracowanie wielowariantowego empirycznego modelu propagacyjnego przeznaczonego do modelowania z wymaganą dokładnością tłumienia fali radiowej w systemach radiokomunikacji ruchomej, w uprzemysłowionym środowisku propagacyjnym, na przykładzie morskiego terminalu kontenerowego. Model ten powinien uwzględniać uwarunkowania propagacyjne mające miejsce w tym środowisku w ruchomych łączach radiowych. Podstawą do osiągnięcia tego celu będzie udowodnienie prawdziwości następującej tezy:

Opracowanie nowego empirycznego modelu propagacyjnego umożliwi ze znacznie większą niż dotychczas dokładnością analizować tłumienie sygnału radiowego w ruchomych systemach radiokomunikacyjnych pracujących w środowisku uprzemysłowionym, zwłaszcza na terenach terminali kontenerowych.

Dodatkowo sformułowano następującą tezę pomocniczą: poprzez statystyczne dopasowanie wybranych znanych modeli propagacyjnych można uzyskać poprawę dokładności estymowania tłumienia fali radiowej dla potrzeb projektowania ruchomych systemów radiowych w warunkach terminalu kontenerowego.

### **1.3. Krótkie omówienie głównych części rozprawy**

Niniejsza rozprawa składa się z pięciu rozdziałów, podsumowania oraz spisu literatury. Bieżący (pierwszy) rozdział zawiera charakterystykę zagadnień związanych z projektowaniem ruchomych systemów łączności bezprzewodowej w środowisku uprzemysłowionym, którego przykładem jest terminal kontenerowy. Następnie sformułowane zostały główne cele i tezy rozprawy oraz omówione główne jej części.

W rozdziale drugim opisane zostały badania propagacyjne wykonane w rzeczywistych warunkach dużego terminalu kontenerowego. Przedstawiona została metodologia wykonanych badań, uwzględniająca zalecenia ITU-R oraz opisany został zaprojektowany specjalnie do tego celu system pomiarowy. Następnie scharakteryzowano badane środowisko oraz wstępne wyniki przeprowadzonych badań.

Rozdział trzeci zawiera opis wstępnego przetwarzania danych pomiarowych. W dalszej części scharakteryzowano analizę statystyczną wyników badań propagacyjnych, zawierającą szczegółowy opis procedury wielowymiarowej regresji linowej, która posłużyła jako narzędzie przy opracowywaniu nowego modelu oraz omówiono metody statystycznej oceny wyników badań eksperymentalnych.

W rozdziale czwartym, po wstępnej charakterystyce wybranych znanych modeli propagacyjnych, przedstawiona została analiza porównawcza pod kątem ich przydatności do szacowania tłumienia propagacyjnego w ruchomych systemach radiowych, pracujących w środowisku terminalu kontenerowego. Następnie przedstawione zostały wyniki statystycznego dopasowania tych modeli do warunków panujących w badanym środowisku i porównane zostały wyniki analizy statystycznej modeli przed i po dopasowaniu, co tym samym dowiodło słuszności pomocniczej tezy rozprawy.

Piąty, główny rozdział rozprawy zawiera pełną charakterystykę nowego modelu propagacyjnego. Na wstępie rozdziału określone zostały czynniki wpływające na tłumienie sygnału radiowego w analizowanym środowisku. W dalszej części przedstawione zostało ujęcie analityczne nowego empirycznego modelu oraz jego dogłębna analiza. W ostatniej części rozdziału przeanalizowano przydatność nowego modelu, a na podstawie analizy porównawczej nowego modelu z innymi modelami, dowiedziono słuszności głównej tezy rozprawy.

W ostatniej części pracy podsumowano wyniki przeprowadzonych badań, wskazując na użyteczność i zakres stosowalności nowego modelu.



## ***Rozdział 2.***

### ***Pomiarowe badania propagacyjne w rzeczywistych warunkach dużego terminalu kontenerowego***

Tematyka badań propagacyjnych jest podejmowana na świecie z kilku powodów. Jednym z nich jest konieczność opracowywania i wdrażania do praktyki nowych systemów radiokomunikacyjnych, pracujących przy coraz wyższych częstotliwościach. Z drugiej strony nowe systemy powstają także w od dawna eksploatowanych zakresach częstotliwości, które wymagają dokładniejszych analiz propagacyjnych aniżeli dotychczasowe. W rezultacie wykonuje się badania, których celem jest weryfikowanie i ulepszanie znanych już modeli propagacyjnych lub opracowywanie nowych [91].

Potrzeba tworzenia empirycznych modeli tłumienia propagacyjnego dla różnych środowisk pociąga za sobą konieczność gromadzenia wystarczająco licznych, reprezentatywnych zbiorów danych, zawierających informacje o tłumieniu propagacyjnym w określonych warunkach. W związku z powyższym aktualna jest problematyka przeprowadzania pomiarowych badań propagacyjnych w rzeczywistych środowiskach z uwzględnieniem zaleceń normatywnych, opisanych w literaturze przedmiotu, takich jak np. zalecenia ITU-R [45, 49, 50].

Jest rzeczą oczywistą, że dla przeprowadzenia pomiaru trzeba dysponować sprzętem pomiarowym i metodą pomiarową. Pierwszy z nich jest związany z fizyczno-materialną realizacją pomiaru, tzn. tworzy on bazę aparatury w formie przyrządów pomiarowych wraz z niezbędnym osprzętem i urządzeniami dodatkowymi. Drugi jest związany z wiedzą – metodologią pomiaru, tzn. tworzy zasadę działania całego układu pomiarowego i sposób przeprowadzenia pomiaru, ułożenia algorytmu postępowania, itp. W świetle powyższego należy stwierdzić, że zarówno sprzęt pomiarowy, jak i metoda pomiarowa stanowią dwa nieodzowne aspekty świadomie i poprawnie wykonanego procesu pomiarowego [34].

Na wstępie niniejszego rozdziału scharakteryzowano pod względem energetycznym podstawową postać łącza pomiarowego, omówiono wymagania dotyczące stosowa-

nej aparatury badawczej oraz procesu jej kalibracji, po czym przedstawiono wymagania normatywne w zakresie procedur pomiarowych, a także przetwarzania wyników.

Następnie zaprezentowano zaprojektowany i zrealizowany system pomiarowy, ze szczególnym uwzględnieniem wymagań standaryzacyjnych stawianych aparaturze oraz procedurom pomiarowym. Przedstawiono także algorytm oprogramowania konfiguracyjnego odbiornik oraz sterującego procesem przeprowadzania pomiarów.

W końcowej części rozdziału przedstawiono opis i wstępną charakterystykę pomiarowych badań propagacyjnych przeprowadzonych w latach 2008 i 2009 w Głębokowodnym Terminalu Kontenerowym w Gdańsku, nazywanym w dalszej części rozprawy DCT Gdańsk (*ang. Deepwater Container Terminal*).

## **2.1. Metodologia wykonywanych badań pomiarowych z uwzględnieniem zaleceń ITU-R**

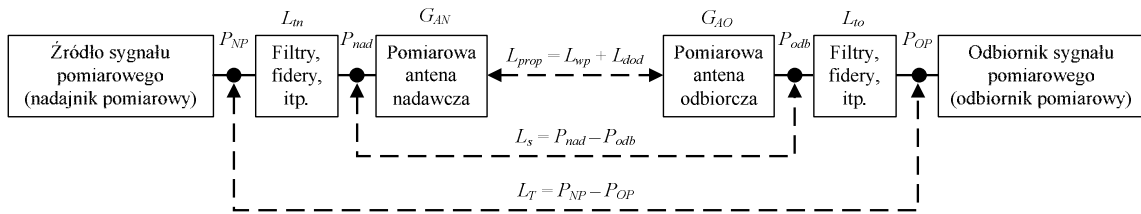
Zalecenia normatywne dotyczą nie tylko stosowanej terminologii i definicji poszczególnych wielkości występujących w łączu radiowym, ale także standaryzacji aparatury badawczej oraz metodologii przeprowadzania badań pomiarowych. Wszystkie powyższe zagadnienia zostały opisane w bieżącej części rozprawy.

### ***2.1.1. Opis energetyczny radiowego łącza pomiarowego***

Jak wiadomo, z transmisją sygnału pomiarowego w łączu radiowym związane jest znaczne obniżenie mocy tego sygnału, co skutkuje dużą różnicą między mocą sygnału wychodzącego z nadajnika, a pomierzoną mocą tego samego sygnału dostępną na wejściu odbiornika pomiarowego. Różnica ta zależy od wielu czynników, przede wszystkim od tłumienia powodowanego oddziaływaniem bezprzewodowego środowiska propagacyjnego, a także od strat mocy w antenowych liniach zasilających, strat wnoszonych przez pomiarowe urządzenia antenowe oraz strat powodowanych ewentualnymi niedopasowaniami impedancyjnymi, bądź polaryzacyjnymi. W związku z powyższym istnieje konieczność usystematyzowania terminologii i oznaczeń stosowanych podczas analizowania tłumienia propagacyjnego oraz jego składowych [12].

Omówienie takie można przedstawić posługując się schematem radiowego łącza pomiarowego, przedstawionym na rys. 2.1, gdzie uwzględniono wszystkie istotne czynniki wpływające na bilans energetyczny łącza pomiarowego, przy czym można tutaj wyróżnić:

- tłumienie całkowite ( $L_T$ ) tego łącza, pomiędzy wyjściem nadajnika a wejściem odbiornika pomiarowego,
- tłumienie systemowe ( $L_s$ ) jego części, pomiędzy wejściem anteny nadawczej a wyjściem anteny odbiorczej,
- tłumienie propagacyjne sygnału pomiarowego ( $L_{prop}$ ) w postaci fali radiowej w środowisku propagacyjnym,
- tłumienie propagacyjne wolnej przestrzeni ( $L_{wp}$ ), które z kolei jest podstawowym składnikiem tłumienia propagacyjnego.



Rys. 2.1. Podstawowa struktura radiowego łącza pomiarowego

Tłumienie całkowite łącza pomiarowego, oznaczone jako  $L_T$  [dB] (ang. *total loss*), określone jest jako różnica mocy  $P_{NP}$  [dBW] dostarczanej przez nadajnik pomiarowy i mocy  $P_{OP}$  [dBW] dostępnej na wejściu odbiornika pomiarowego, mając na uwadze to, że transmisja odbywa się z wykorzystaniem rzeczywistej instalacji antenowej oraz w rzeczywistych warunkach propagacyjnych [45]. Zależność tę można wyrazić w poniższy sposób:

$$L_T[\text{dB}] = P_{NP}[\text{dBW}] - P_{OP}[\text{dBW}] = 10 \log \left( \frac{P_{NP}[\text{W}]}{P_{OP}[\text{W}]} \right), \quad (2.1)$$

gdzie małe litery, tzn.  $p_{NP}$  oraz  $p_{OP}$ , oznaczają moce odpowiednio na wyjściu nadajnika pomiarowego oraz na wejściu odbiornika pomiarowego. Mogą one być wyrażone w wartościach bezwzględnych, np. w [W], lub w wartościach względnych [53], np. w [dBW], wówczas oznaczane są one dużymi literami, odpowiednio  $P_{NP}$  oraz  $P_{OP}$ . Dla porządku należy dodać, że przez stosowany w całości niniejszej rozprawy zapis „log  $x$ ” rozumie się logarytm dziesiętny liczby  $x$ , tzn. logarytm przy podstawie 10 ( $\log_{10} x$ ) [101].

Tłumienie całkowite łącza pomiarowego uwzględnia wszystkie czynniki mające wpływ na pomiar mocy sygnału pomiarowego, tzn. rzeczywiste tłumienie propagacyjne badanego środowiska, zyski energetyczne rzeczywistych anten, straty wprowadzane do

tego łącza przez linie zasilające, itp. Znajomość wymienionych składowych tłumienia całkowitego jest niezbędna do tego, aby poprawnie wyznaczyć pomierzoną wartość tłumienia propagacyjnego.

Z kolei tłumienie systemowe,  $L_s$  [dB] (ang. *system loss*) [45], określane jest jako różnica mocy  $P_{nad}$  [dBW] dostarczanej na zaciski pomiarowej anteny nadawczej oraz mocy  $P_{odb}$  [dBW] dostępnej na zaciskach pomiarowej anteny odbiorczej, co poprzez analogię do wyrażenia (2.1), można zapisać w poniższy sposób:

$$L_s [dB] = P_{nad} [dBW] - P_{odb} [dBW] = 10 \log \left( \frac{P_{nad} [W]}{P_{odb} [W]} \right). \quad (2.2)$$

Tłumienie systemowe, oprócz tłumienia środowiska propagacyjnego, uwzględnia także wpływ stosowanych do badań pomiarowych anten rzeczywistych, czyli ich zyski energetyczne, uwzględniające charakterystyki kierunkowe, a także zachodzące w antenach straty cieplne. Tłumienie to nie uwzględnia natomiast tłumień wprowadzanych przez filtry, linie zasilające, uziemienia, itp. zarówno w torze nadawczym – wówczas jest to tłumienie  $L_m$  [dB], oraz w torze odbiorczym – wówczas jest to tłumienie  $L_{to}$  [dB]. Mając na uwadze rys. 2.1 można relację pomiędzy tłumieniem całkowitym  $L_T$  i wymienionymi tłumieniami  $L_m$  i  $L_{to}$  zapisać w poniższy sposób:

$$L_s [dB] = L_T [dB] - L_m [dB] - L_{to} [dB]. \quad (2.3)$$

Natomiast na tłumienie środowiska propagacyjnego  $L_{prop}$  [dB] składa się tłumienie propagacyjne wolnej przestrzeni  $L_{wp}$  [dB] oraz tłumienie dodatkowe  $L_{dod}$  [dB], wynikające z rzeczywistych warunków propagacyjnych, odbiegających od idealnej wolnej przestrzeni, co można wyrazić w następujący sposób:

$$L_{prop} [dB] = L_{wp} [dB] + L_{dod} [dB]. \quad (2.4)$$

Na wartość tłumienia dodatkowego  $L_{dod}$  wpływ mają zjawiska zachodzące w badanym rzeczywistym środowisku propagacyjnym. Do najważniejszych z nich, z punktu widzenia procedur pomiarowych, można zaliczyć:

- przejrzystość trasy propagacyjnej, wynikająca ze wzajemnego położenia pierwszej strefy Fresnela i przeszkód występujących na trasie propagacji sygnału radiowego pomiędzy antenami łącza [70],
- dyfrakcja fal radiowych,

- tłumienie w deszczu oraz we mgle,
- zjawisko wielodrogowości, jako przyczyna zaników fali radiowej.

Zależność (2.4) dotyczy przypadku promieniowania izotropowego, tzn. nie uwzględnia właściwości anten rzeczywistych, zwłaszcza właściwości kierunkowych oraz zachodzących w antenie strat energetycznych na ciepło, co uwzględnione jest w jej zysku energetycznym [70].

Uwzględniając zatem zyski energetyczne anten pomiarowych oraz bilans energetyczny pomiarowego łącza radiowego, tłumienie środowiska propagacyjnego inaczej można wyrazić w poniższy sposób:

$$L_{prop}[dB] = P_{nad}[dBW] - P_{odb}[dBW] + G_{AN}[dBi] + G_{AO}[dBi], \quad (2.5)$$

gdzie  $G_{AN}$  i  $G_{AO}$  oznaczają zyski energetyczne anten pomiarowych, odpowiednio nadawczej oraz odbiorczej i wyrażone są w [dBi] (decybelach względem anteny izotropowej). Zyski anten odniesienia oraz typowych anten pomiarowych zestawiono w tab. 2.1.

Tab. 2.1. Zyski typowych anten odniesienia [45]

Antena odniesienia	$g$	$G = 10 \log g$ [dBi]
Antena izotropowa w wolnej przestrzeni	1	0
Dipol Hertza w wolnej przestrzeni	1,5	1,75
Dipol półfalowy w wolnej przestrzeni	1,65	2,15
Dipol Hertza lub krótka antena prętowa nad idealnie przewodzącą płaszczyzną	3	4,8
Antena ćwierćfalowa nad idealnie przewodzącą płaszczyzną	3,3	5,2

Jak wiadomo, wolna przestrzeń propagacyjna stanowi przypadek idealnego środowiska propagacyjnego, otwartego i wolnego od przeszkód terenowych, charakteryzującego się brakiem wpływu podłoża na rozchodzenie się fali radiowej, środowiska całkowicie jednorodnego i nie absorbującego energii pola elektromagnetycznego [70], a także wolnego od wpływu innych systemów radiowych [81].

Zakładając warunki wolnej przestrzeni propagacyjnej oraz odległość  $d$  [m] pomiędzy antenami łącza pomiarowego znacznie większą niż długość fali  $\lambda$  [m] badanego sygnału pomiarowego, tłumienie wolnej przestrzeni, oznaczane symbolem  $L_{wp}$  [dB], określone jest zależnością [46]:

$$L_{wp} [dB] = 20 \log \left( \frac{4\pi \cdot d[m]}{\lambda[m]} \right). \quad (2.6)$$

Po zastąpieniu długości fali częstotliwością  $f$  [MHz] sygnału radowego równanie (2.6) można zapisać w sposób następujący:

$$\begin{aligned} L_{wp} [dB] &= 20 \log f [MHz] + 20 \log d [km] + 32,4 = \\ &= 20 \log f [MHz] + 20 \log d [m] - 27,6. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Powyższa postać zależności na tłumienie wolnej przestrzeni jest częściej stosowana w praktyce [70].

### 2.1.2. Standaryzacja aparatury badawczej

W celu ujednolicenia wyników badań pomiarowych w zakresie częstotliwości od 9kHz do 3GHz i powyżej (aż do 40GHz), ITU-R zaleca w dokumencie [50] odpowiedni sposób instalacji i kalibracji układów pomiarowych, który przy dodatkowym założeniu braku szumów własnych zastosowanego odbiornika, braku szumów powodowanych zjawiskami atmosferycznymi oraz braku zewnętrznych interferencji, pozwala osiągnąć następujące dokładności pomiarów:

- dla zakresu od 9 kHz do 30 MHz:  $\pm 2$  dB,
- dla zakresu od 30 MHz do 3 GHz:  $\pm 3$  dB,

przy czym mówiąc o pomiarach, mamy na myśli pomiary w punkcie odbioru: mocy sygnału na wejściu odbiornika wynikającej z powierzchniowej gęstości mocy fali elektromagnetycznej w punkcie umieszczenia anteny odbiorczej, napięcia na zaciskach odbiornika wynikającego z natężenia pola elektrycznego w punkcie umieszczenia anteny odbiorczej lub prądu płynącego przez odbiornik, wynikającego z natężenia pola magnetycznego w punkcie umieszczenia anteny odbiorczej. I tak, dla instalacji odbiorczej reagującej na powierzchniową gęstość mocy fali elektromagnetycznej, na wejściu odbiornika otrzymujemy moc  $P_{OP}$ , która stanowi podstawę do wyznaczenia tłumienia propagacyjnego  $L_{prop}$  badanego środowiska, zgodnie z zależnością (2.9). Analogiczne równania można zapisać dla przypadku korzystania z anten reagujących na składową elektryczną lub magnetyczną pola elektromagnetycznego, wówczas zależności wyrażane będą w stosunku napięć lub prądów, a nie mocy.

Typ stosowanej anteny odbiorczej może mieć wpływ na rodzaj odbiornika pomiarowego – wielkość elektryczna, mierzona przez odbiornik pomiarowy powinna odpowiadać wielkości elektrycznej sygnału na wyjściu anteny odbiorczej, dla którego antena ta była wzorcowana. Dla przykładu, przy antenie prętowej o określonej w trakcie wzorcowania długości skutecznej, odbiornik powinien mierzyć napięcie, zaś antena stożkowa, dla której producent podał zysk energetyczny przy określonej częstotliwości, może współpracować wprost z odbiornikiem mierzącym moc sygnału.

Zalecenie [50] zawiera przykłady anten odbiorczych do stosowania w różnych zakresach częstotliwości. Dla częstotliwości poniżej 30 MHz zalecane jest stosowanie krótkich prętowych anten pomiarowych o polaryzacji pionowej, reagujących na składową elektryczną pola elektromagnetycznego, bądź elektrycznie małych anten pętlowych, reagujących na składową magnetyczną tego pola. W przypadku krótkiej anteny prętowej może być zastosowany promiennik o długości krótszej niż ćwierć fali oraz ekwiwalentnej płaszczyźnie przewodzącej zbudowanej albo z elementów o długości co najmniej dwukrotnie większej od długości promiennika i rozłożonych względem siebie nie rzadziej niż co  $30^\circ$ , albo ze skończonej płaszczyzny przewodzącej. Istnieje również możliwość wykorzystania anteny stożkowej o pionowej polaryzacji i podobnej konstrukcji sztucznej ziemi, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie większego zysku energetycznego anteny, niż w przypadku anteny prętowej.

Dla zakresu częstotliwości od 30 MHz do 1 GHz zaleca się stosowanie krótkich anten prętowych, dipoli półfalowych, bądź anten kierunkowych, przy czym należy pamiętać, żeby pomiarowa antena odbiorcza miała taką samą polaryzację, co pomiarowa antena nadawcza. Natomiast dla częstotliwości powyżej 1 GHz zaleca się stosowanie anten kierunkowych, względnie krótkich anten prętowych.

Należy mieć na uwadze fakt, że wysokość zawieszenia anten ma znaczący wpływ na wyniki pomiarów, co jest skutkiem wpływu ziemskiego podłoża propagacyjnego na tłumienie sygnału. I tak, jeżeli anteny zainstalowane są w bezpośredniej bliskości podłoża, to fala przyjmuje postać fali powierzchniowej, co prowadzi do jej depolaryzacji i – co za tym idzie – strat związanych z niedopasowaniem polaryzacyjnym w łączu radiowym. Dodatkowo tłumienie propagacyjne zwiększa się wskutek strat związanych z wnikaniem fali radiowej w podłoże [70]. Aby zminimalizować wpływ podłoża ziemskiego na propagację sygnału, antenę nadawczą należy instalować na odpowiedniej wysokości tak, aby promieniowana fala radiowa miała postać fali przestrzennej. W związku

z powyższym ITU-R zaleca, dla częstotliwości z zakresu od 30 MHz do 1 GHz, instalowanie pomiarowej anteny nadawczej na wysokości minimum 10 m nad poziomem terenu [50]. Zalecana wysokość zawieszenia pomiarowej anteny odbiorczej zawiera się w zakresie od 1,5 m do 3 m nad poziomem terenu [49], co ma związek z wysokościami montażu anten terminali ruchomych w rzeczywistych systemach radiokomunikacyjnych.

Odbiornik pomiarowy przede wszystkim powinien charakteryzować się stabilnością swoich parametrów elektrycznych (m.in. wzmocnienia, częstotliwości, szerokości pasma częstotliwości), decydujących o jakości pomiaru poziomu sygnału pomiarowego (jego napięcia, prądu lub mocy) na wejściu odbiornika. Lokalne oscylatory odbiornika powinny charakteryzować się niskim szumem fazowym, natomiast wymagany zakres dynamiczny odbiornika pomiarowego powinien być większy niż 60 dB, a pasmo częstotliwościowe odbiornika powinno być na tyle szerokie, aby umożliwić odbiór zasadniczych części widma mierzonego sygnału. Metoda pomiaru sygnału pomiarowego jest uzależniony od szerokości jego pasma oraz od zastosowanej modulacji. Wartości wymaganego pasma częstotliwościowego odbiornika oraz metody pomiaru dla przykładowych sygnałów zostało zestawione w tab. 2.2.

Tab. 2.2. Wymagania dotyczące odbiornika pomiarowego dla przykładowych sygnałów [49]

Przykładowy typ sygnału	Minimalne pasmo odbiornika [kHz]	Metoda pomiaru sygnału
AM DSB	9 lub 10	Uśrednianie liniowe
AM SSB	2,4	Wartość szczytowa
Radiofonia rozsiewcza FM	170 lub większe	Uśrednianie liniowe (lub logarytmiczne)
Sygnał analogowy TV	200 lub większe	Wartość szczytowa
GSM	300	Wartość skuteczna (r.m.s.)
DAB	1 500	
DVB-T		
System: 6 MHz	6 000	
7 MHz	7 000	
8 MHz	8 000	
TETRA	30	
UMTS	3 840	
Modulacja wąskopasmowa FM		Uśrednianie liniowe (lub logarytmiczne)
Odstęp międzykanałowy:		
12,5kHz	7,5	
20kHz	12	
25kHz	12	



Często w roli odbiornika pomiarowego może być wykorzystywany odpowiednio skonfigurowany analizator widma sygnału, którego praca dodatkowo może być zautomatyzowana. Odbiornik pomiarowy wraz z całą częścią odbiorczą łącza pomiarowego może być zmontowany na pojeździe, bądź ewentualnie na wózku pomiarowym, którego mobilność pozwala na pomiary propagacyjno-zasięgowe na całym badanym obszarze.

Zarówno poszczególne urządzenia łącza pomiarowego, jak i elementy mające wpływ na jego całkowite tłumienie (filtry, fidery, itp.) przechodzą etap wzorcowania, jako jeden z etapów ich produkcji. Mimo wszystko zalecane jest, aby przed każdorazowym zestawieniem łącza pomiarowego wykonać kalibrację zarówno części nadawczej, jak i części odbiorczej jako integralnych całości [50], dzięki czemu uwzględniony zostanie wpływ wszystkich elementów radiowego łącza pomiarowego, włączając w to tłumienia wnoszone przez zastosowane uziemienia, maszty, itp. Przedstawiony poniżej przykład procedur kalibracyjnych odnosi się do przypadku pomiaru tłumienia propagacyjnego w oparciu o pomiar mocy sygnału pomiarowego.

Kalibracja części nadawczej polega na takim ustawieniu wartości mocy sygnału  $P_{NP}$  na wyjściu nadajnika pomiarowego, aby na zaciskach wejściowych anteny nadawczej otrzymać zakładaną podczas badań wartość mocy  $P_{nad}$ .

W procesie kalibracji części odbiorczej mierzona jest różnica między mocą sygnału dostępnego na zaciskach wyjściowych pomiarowej anteny odbiorczej, a mocą sygnału na wejściu odbiornika pomiarowego, co – po uwzględnieniu zysku energetycznego pomiarowej anteny odbiorczej – pozwala wyznaczyć współczynnik korekcyjny,  $W_k$  [dB], części odbiorczej łącza, zgodnie z poniższą zależnością (patrz rys. 2.1.):

$$W_k [dB] = L_{to} [dB] - G_{AO} [dBi] = P_{odb} [dBW] - P_{OP} [dBW] - G_{AO} [dBi]. \quad (2.8)$$

Mając na względzie rys. 2.1, z którego wynika, że  $P_{odb} = P_{OP} + L_{to}$  oraz wyrażenie (2.5), po prostych przekształceniach możemy zapisać, że:

$$L_{prop} [dB] = P_{nad} [dBW] + G_{AN} [dBi] - P_{OP} [dBW] - W_k [dB]. \quad (2.9)$$

Zależność (2.9) ma szczególne znaczenie z punktu widzenia praktycznego wyznaczania tłumienia środowiska propagacyjnego na podstawie wyników pomiarów mocy  $P_{OP}$  sygnału pomiarowego na wejściu odbiornika pomiarowego, przy znanym zysku energetycznym  $G_{AN}$  anteny nadawczej oraz przy wyznaczonych w procesie kalibracji warto-

ściach mocy  $P_{nad}$  doprowadzonej do zacisków wejściowych pomiarowej anteny nadawczej i współczynnika korekcyjnego  $W_k$ .

W przypadku, kiedy łącze pomiarowe jest zestawione na stałe, zalecanym jest jego ponowne kalibrowanie przynajmniej raz w roku, bądź za każdym razem, kiedy wymieniana była którakolwiek z jego części [50].

### **2.1.3. Standaryzacja procedur pomiarowych**

Przyczyny przeprowadzania badań pomiarowych mogą być różne, m.in. w celu opracowywania empirycznych modeli tłumienia propagacyjnego, bądź też uzyskania informacji o pokryciu radiowym na określonym terenie, które to informacje mogą służyć do zwiększenia efektywności zarządzania zasobami radiowymi, sprawdzenia przez regulatora poprawności wykorzystywania zasobów radiowych przez określone podmioty, itp. Mając wzgląd na powyższe, w zaleceniu ITU-R [49] ujednolicone zostały metody wykonywania pomiarów oraz sposób zapisu i prezentacji ich wyników.

Zalecanym jest, aby punkty pomiarowe dobierać w sposób, który umożliwi uzyskanie wyników pomiarów, odzwierciedlających powolne zmiany powierzchniowej gęstości mocy pola elektromagnetycznego (zjawisko zaników wolnych), a także powinny uwzględniać chwilowe osobliwości (zjawisko zaników szybkich) w rozkładzie gęstości mocy tegoż pola. W związku z powyższym zalecane jest, aby punkty pomiarowe wybierane były na trasie propagacji fali radiowej co  $0,8\lambda$ , przy czym  $\lambda$  oznacza długość fali badanego sygnału. Zalecany odcinek trasy, na której pomiary powinny być każdorazowo uśredniane wynosi  $40 \lambda$  [49]. Takie podejście pozwala uzyskiwać rzeczywiste wartości średnie wielkości mierzonej (np. mocy na wejściu odbiornika) z dokładnością 1 dB i dla 90% przedziału ufności [30, 42, 78, 80].

Pomiary mogą również być wykonywane automatycznie w sytuacji, gdy układ pomiarowy się przemieszcza, przy czym prędkość  $v$  [km/h] pojazdu pomiarowego nie jest dowolna i zależy od częstotliwości  $f$  [MHz] badanego sygnału oraz minimalnego czasu  $t_r$  [s] trwania pojedynczego pomiaru, wykonywanego na tej częstotliwości, zgodnie z poniższą zależnością [49]:

$$v[\text{km/h}] \leq \frac{864}{f[\text{MHz}] \cdot t_r[\text{s}]} \quad (2.10)$$

W celu znalezienia zależności tłumienia propagacyjnego w danym środowisku od odległości odbiornika od stacji bazowej, wynik każdego pomiaru należy powiązać z miejscem jego wykonania. W tym celu należy wykorzystać system pozycjonowania, który umożliwi odczyt bieżącej pozycji odbiornika pomiarowego, przy czym zalecane jest zastosowanie jednego z trzech systemów wymienionych w rekomendacji ITU-R [49]. Preferowanym podczas badań pomiarowych systemem pozycjonowania jest system GPS (ang. *Global Positioning System*). W przypadku braku możliwości określenia pozycji przy użyciu systemu GPS, zaleca się wykorzystywać system nawigacji zliczeniowej, którego działanie polega na określaniu pozycji na podstawie znajomości punktu początkowego, informacji o przebytej odległości oraz kierunku ruchu. Możliwe jest także stosowanie obu systemów jednocześnie.

W związku z dużą niestacjonarnością medium propagacyjnego, wynik pojedynczego pomiaru nie jest wiarygodny, ani powtarzalny. W takim stanie rzeczy, wyniki pomiarów powinny być sklasyfikowane pod względem prawdopodobieństwa przekroczenia określonej wartości mocy sygnału odbieranego. Wartość tego prawdopodobieństwa zawiera się w zakresie 1-99%, jednakże typowymi wartościami tego parametru są: 1%, 10%, 50%, 90% i 99%. Dla celów badań propagacyjno-zasięgowych zalecane jest wykorzystywanie mediany, czyli wartości środkowej uporządkowanego podzbioru wyników pomiarów, której prawdopodobieństwo przekroczenia przez inne wyniki z tego podzbioru wynosi 50% [49]. W praktyce wiąże się to z wyznaczeniem mediany  $P_{OP}^i$  wartości mocy sygnału pomiarowego na wejściu odbiornika dla  $i$ -tego podzbioru danych pomiarowych, utworzonego z  $n$  wyników pomiarów, zebranych na trasie o długości  $40 \lambda$  zgodnie z poniższą zależnością:

$$P_{OP}^i = \begin{cases} P_{OP, \frac{n+1}{2}}^i & , \text{dla } n \text{ nieparzystych,} \\ \frac{1}{2} \left( P_{OP, \frac{n}{2}}^i + P_{OP, \frac{n}{2}+1}^i \right) & , \text{dla } n \text{ parzystych,} \end{cases} \quad (2.11)$$

przy czym  $P_{OP,1}^i \leq P_{OP,2}^i \leq P_{OP,3}^i \leq \dots \leq P_{OP,n-1}^i \leq P_{OP,n}^i$  jest uporządkowanym w kolejności niemalejącej podzbiorem  $n$  wyników pomiarów mocy sygnału pomiarowego na wejściu odbiornika, a  $n$  jest liczbą pomiarów wykonanych na  $i$ -tym ( $i=1,2,3,\dots$ ) odcinku badanej trasy propagacji.

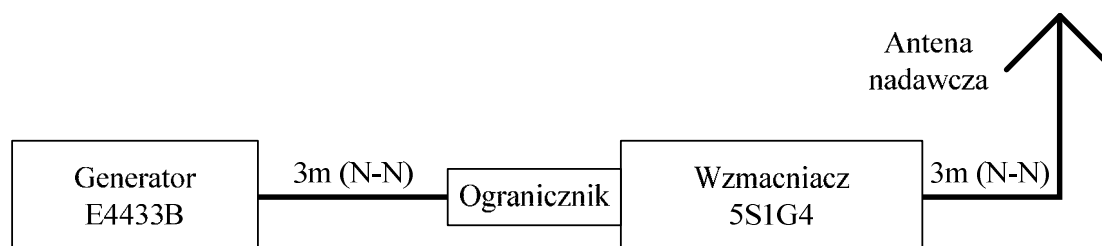
Proces wyznaczania median może odbywać się w czasie rzeczywistym, w trakcie wykonywania badań pomiarowych, przy czym zapisywane są tylko wyznaczone wartości medianowe mierzonego sygnału. Istnieje także możliwość zapisywania wszystkich wyników w określonych punktach pomiarowych i wyznaczanie wartości medianowych po zakończeniu badań. Wyniki uzyskane przy zastosowaniu obu metod mogą być dalej wykorzystane do modelowania tłumienia badanego środowiska propagacyjnego, bądź określania pokrycia radiowego określonego systemu bezprzewodowego na badanym obszarze.

## 2.2. Projekt systemu pomiarowego

Na podstawie przedstawionych wymagań normatywnych i doświadczeń z wcześniejszych badań pomiarowych prowadzonych na Politechnice Gdańskiej, zaprojektowano i zrealizowano uniwersalne, mobilne stanowisko do badań propagacyjno-zasięgowych w terenie, które zostało zastosowane do pomiarów tłumienia propagacyjnego w warunkach terminalu kontenerowego DCT Gdańsk. Opracowany zestaw pomiarowy składa się z dwóch części: stacjonarnej części nadawczej oraz ruchomej części odbiorczej.

### 2.2.1. Stacjonarna część nadawcza stanowiska pomiarowego

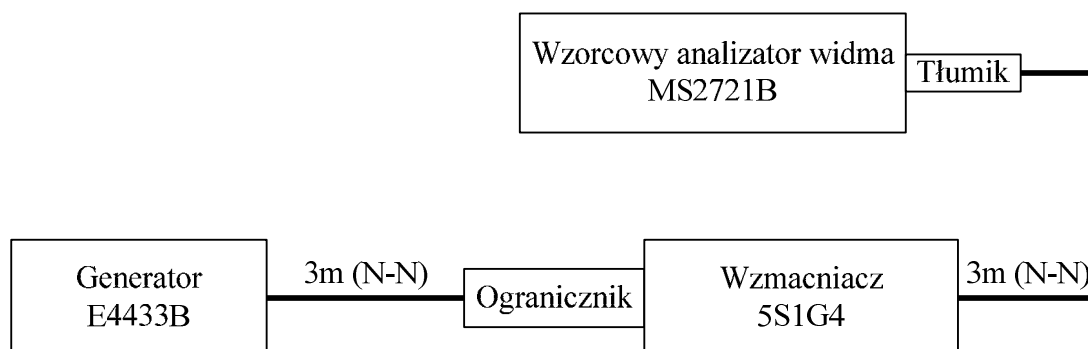
Część nadawcza stanowiska pomiarowego (rys. 2.2) składa się z generatora sygnałowego E4433B firmy Agilent Technologies połączonego z pomiarową anteną nadawczą poprzez wzmacniacz mocy w.cz. 5S1G4 firmy Amplifier Research. Do połączeń poszczególnych elementów stanowiska zastosowano dwa trzymetrowe fidery N-N firmy Hubner+Suhner. Generator sygnałowy stanowi źródło sygnału pomiarowego, którego propagację w danym środowisku chcemy badać. Ogranicznik (N9355B firmy Agilent Technologies) na wejściu wzmacniacza ma za zadanie ograniczenie zbyt dużego poziomu mocy sygnału z generatora, co związane jest z zabezpieczeniem wzmacniacza w.cz. przed uszkodzeniem wskutek ewentualnego błędnego skonfigurowania generatora.



Rys. 2.2. Schemat blokowy stacjonarnej części nadawczej stanowiska pomiarowego

Generator sygnałowy wraz ze wzmacniaczem stanowi źródło sygnału pomiarowego o mocy  $P_{NP}$  (patrz rys. 2.1), który podawany jest poprzez trzymetrowy fider na zaciski pomiarowej anteny nadawczej. Zastosowana została prętowa antena ćwierćfalowa, zaprojektowana i wykonana w sposób umożliwiający zmianę długości promiennika, która to antena została opisana w podrozdziale 2.2.2 niniejszej rozprawy. Podczas badań pomiarowych wysokości zawieszenia anteny nadawczej były różne, jednakże zawsze były one większe od 10 m nad poziomem terenu [50], aby zminimalizować wpływ ziemskiego podłoża propagacyjnego na tłumienie fali radiowej.

W celu przygotowania części nadawczej zestawu pomiarowego do badań, w miejsce anteny podłączono – poprzez tłumik 8491B firmy Agilent Technologies o tłumieniu 20 dB – wzorcowy analizator widma, zgodnie z rys. 2.3.



Rys. 2.3. Schemat blokowy zestawu kalibracyjnego części nadawczej

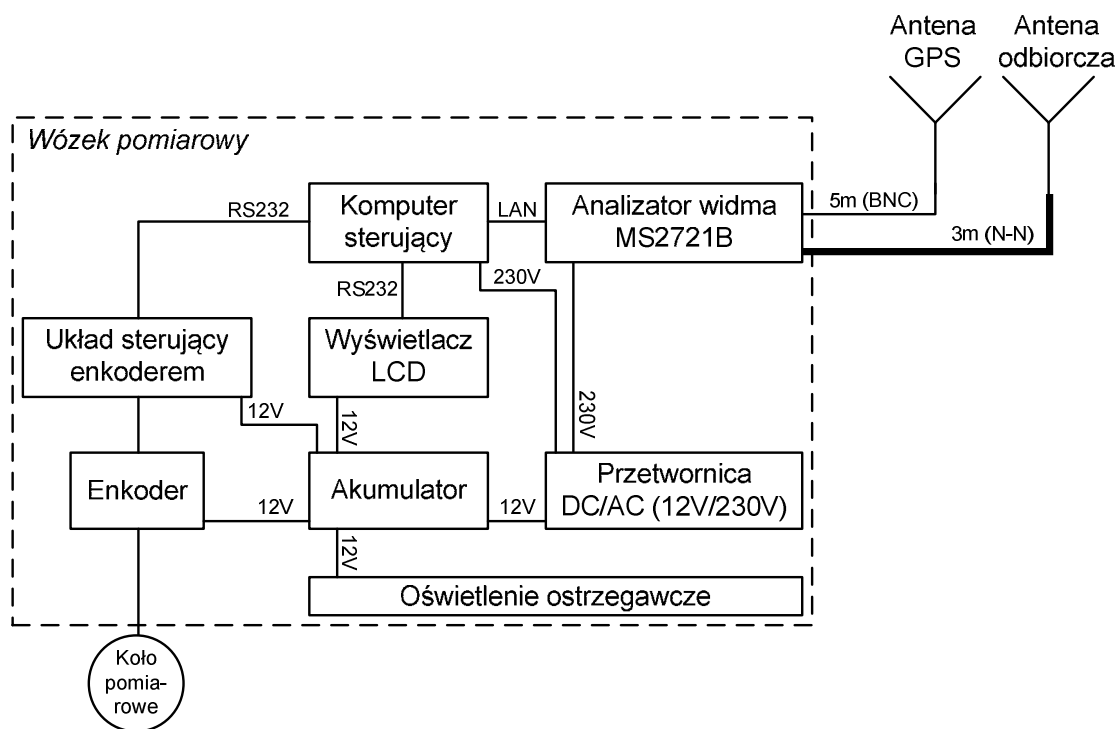
Zmieniając ustawienia generatora i wzmacniacza w.cz. oraz uwzględniając tłumienie tłumika na wejściu analizatora, ustawiono żadaną moc  $P_{nad}$  badanego sygnału. Należy podkreślić, że w rzeczywistym układzie pomiarowym zastosowano te same urządzenia i fidery, które podlegały procesowi kalibracji.

### 2.2.2. Ruchoma część odbiorcza stanowiska pomiarowego

Oryginalne ruchome stanowisko pomiarowe do badań propagacyjno-zasięgowych zostało opisane przez autora niniejszej rozprawy m.in. w [7, 8]. Składa się ono z następujących części:

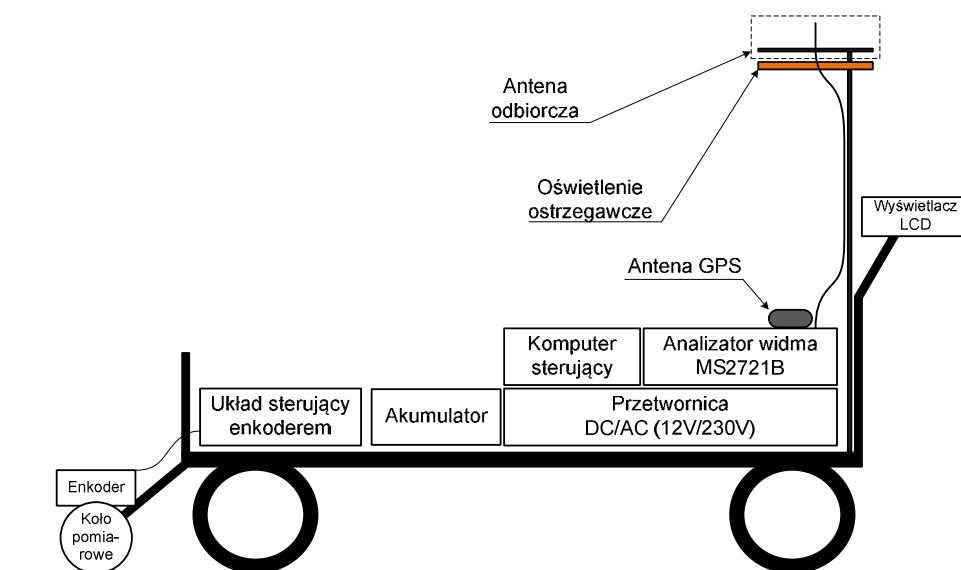
- analizator widma pełniący rolę odbiornika radiowego sygnału pomiarowego,
- anteny służące do odbioru mierzonego sygnału oraz sygnałów systemu GPS przeznaczonego do wyznaczania aktualnej pozycji,
- komputer przemysłowy sterujący pracą stanowiska,

- enkoder obrotowy z układem sterującym jego pracą oraz kołem pomiarowym,
- dodatkowe urządzenia peryferyjne (wyświetlacz LCD, oświetlenie ostrzegawcze),
- źródła zasilania.



Rys. 2.4. Schemat blokowy ruchomej części odbiorczej zestawu pomiarowego

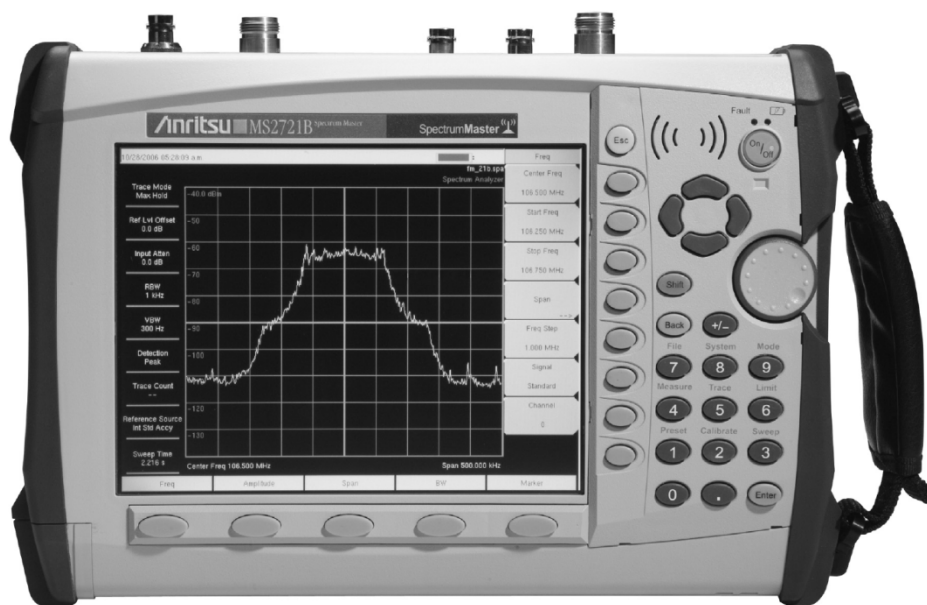
Na rys. 2.4 przedstawiony został schemat blokowy ruchomej części odbiorczej, natomiast na rys. 2.5 w sposób schematyczny przedstawiono jej budowę.



Rys. 2.5. Budowa mobilnego stanowiska pomiarowego do badań propagacyjno-zasięgowych

Urządzenia pomiarowe, sterujące, a także większość innych elementów układu umieszczone zostały na specjalnym wózku, natomiast enkoder i koło pomiarowe zainstalowane zostały za nim w sposób umożliwiający jego łatwe prowadzenie przez operatora.

Rolę odbiornika pomiarowego pełni analizator widma sygnału typu MS2721B, firmy Anritsu (rys. 2.6), który mierzy moc sygnału radiowego dostępnego na jego wejściu, wynikającą z powierzchniowej gęstości mocy fali elektromagnetycznej w punkcie umieszczenia anteny odbiorczej. Zastosowany analizator charakteryzuje się dużym zakresem dynamicznym, rozumianym jako różnica między maksymalnym a minimalnym poziomem mocy sygnału, jaki – bez zmiany ustawień – może być mierzony na jego wejściu. Wartość tego parametru jest nie mniejsza niż 95 dB. Dodatkowo analizator ten umożliwia pomiary mocy sygnałów radiowych o częstotliwościach z zakresu od 9 kHz do 7,1 GHz.



Rys. 2.6. Wygląd analizatora widma Anritsu MS2721B [39]

Zarówno samo zastosowanie analizatora widma do zautomatyzowanych pomiarów, jak i parametry wybranego urządzenia, pozostają w zgodzie z wymaganiami zdefiniowanymi w zaleceniu [50]. W celu powiązania wyniku każdego pomiaru z miejscem jego wykonania, zastosowany jest odbiornik systemu GPS zintegrowany z analizatorem MS2721B. Globalny system pozycjonowania (GPS) wymieniany jest w zaleceniu [49], jako preferowany system, który należy stosować w badaniach pomiarowych.

Mobilne stanowisko pomiarowe zostało wyposażone w dwie anteny odbiorcze. Pierwsza z nich służy do odbioru badanych sygnałów radiowych, nadawanych przez stacjonarną część nadawczą łącza pomiarowego (wyposażoną w antenę nadawczą tego sa-

meo typu, co odbiorcza). Jest to monopól antenowy w postaci anteny prętowej ćwierćfalowej, zaopatrzonej w tzw. ground plane – sztuczną powierzchnię ziemi. Zdecydowano się na taką antenę ze względu na fakt, że anteny tego typu są powszechnie stosowane w radiokomunikacji z powodu dookólnej charakterystyki promieniowania [22]. Antena ta została zaprojektowana w sposób umożliwiający zmianę jej długości, co pozwala na wykonywanie pomiarów dla różnych częstotliwości sygnału radiowego. Ground plane zrealizowany został jako płaszczyzna przewodząca w kształcie koła. Parametry opisywanej anteny zestawione zostały w tab. 2.3. Na potrzeby dotychczas przeprowadzanych badań wykonane zostały promienniki dla czterech częstotliwości rezonansowych, jednakże należy podkreślić, że – w zależności od potrzeb – można rozszerzyć ten zbiór.

Tab. 2.3. Parametry nadawczej/odbiorczej anteny pomiarowej

Częstotliwość [MHz]	Długość promiennika [cm]	Współczynnik fali stojącej	Zysk energetyczny [dBi]
500	15	1,86	2,3
1000	7,5	1,05	
2000	3,7	1,05	
4000	1,8	1,5	

Pomiary zysków energetycznych anten zrealizowano w oparciu o metodę polegającą na porównaniu mocy  $P_{AB}$  sygnału odebranego dostępnego na wyjściu anteny badanej oraz mocy  $P_W$  sygnału odebranego dostępnego na wyjściu anteny wzorcowej o znanym zysku  $G_W$ , przy niezmienniej mocy promieniowanej przez antenę nadawczą [40]. W takim przypadku zysk  $G_{AB}$  badanej anteny wyraża się następująco:

$$G_{AB} [dBi] = G_W [dBi] - P_W [dBm] + P_{AB} [dBm]. \quad (2.12)$$

Dużą zaletą tej metody jest możliwość pomiaru zysku energetycznego dowolnej anteny bez znajomości tłumienia propagacyjnego między anteną nadawczą i odbiorczą [40].

Antena odbiorcza połączona jest z analizatorem widma za pośrednictwem fidera SUKOTEST 18A o długości 3 m, którego wartości tłumienia dla badanych częstotliwości zestawione zostały w tab. 2.4. Wysokość zawieszenia anteny odbiorczej, w zależności od długości masztu, może wynosić od 1,5 m do 3 m, dzięki czemu spełnione są wymagania zawarte w zaleceniu [49].



Tab. 2.4. Tłumienia fidera antenowego SUKOTEST 18A firmy Hubner+Suhner

Częstotliwość [MHz]	Długość fidera [m]	Tłumienie [dB]
500	3	0,65
1000		0,88
2000		1,26
4000		1,85

Drugą z anten zastosowanych w stanowisku pomiarowym jest aktywna, miniaturowa antena GPS, połączona z wejściem odbiornika tego systemu za pośrednictwem kabla RG174 o długości 5m.

Komputer sterujący wraz z odpowiednim oprogramowaniem służy do automatycznego sterowania pracą analizatora widma (poprzez interfejs Ethernet) oraz gromadzenia wyników pomiarów, co pozostaje w zgodzie z [50]. W opisywanym stanowisku badawczym zastosowano komputer przemysłowy TF-AEC-6911-A1 firmy AAEON (rys. 2.7). Komputer ten poprzez interfejs RS232 odbiera z układu sterującego enkoderem sygnały wyzwalające kolejne pomiary, a także w sposób ciągły wysyła do wyświetlacza LCD zestawu danych, informujące obsługę stanowiska o bieżących wartościach mierzonych parametrów i stanie całego stanowiska badawczego.



Rys. 2.7. Wygląd komputera przemysłowego TF-AEC-6911-A1 firmy AAEON [107]

Dane pomiarowe gromadzone są w pamięci komputera sterującego w postaci plików zawierających: ewentualny komentarz dotyczący danej serii badawczej, np. częstotliwość mierzonego sygnału, informacje o konfiguracji analizatora widma oraz wyniki pomiarów, tj.:

- drogę przebytą przez wózek pomiarowy,
- zmierzoną wartość mocy sygnału na wejściu analizatora,

- współrzędne geograficzne miejsca, w którym wykonany został pomiar,
- datę i czas wykonania pomiaru, z dokładnością do pojedynczych sekund.

Wygląd przykładowego pliku wynikowego, edytowanego przy użyciu programu Microsoft Office Excel, przedstawiony został na rys. 2.8.

Konfiguracja pomiaru			
AverageCount:	1	Liczba powtórzeń pomiaru do uśrednienia/poszukiwania maximum	
AverageType:	NONE	Typ uśredniania	
BandwidthResolution:	1000	Szerokość pasma pomiaru	
BandwidthVideo:	1000	Szerokość pasma video	
CorrectionImpedance:	50	Impedancja wejściowa, jeśli różna od 50 lub 75 to wyniki będą przeliczane	
CorrectionOffset:	0	Jeśli impedancja jest różna od 50 lub 75 to wynik jest przeskalowany o podaną wartość	
DetectorFunction:	RMS	Tryb pracy detektora	
FrequencyCenter:	500000000.0	Częstotliwość środkowa	
FrequencySpan:	10000.0	Zakres częstotliwości na wykresie	
ChannelPowerBandwidth:	10000.0	Szerokość kanału do pomiaru	
PowerAttenuation:	0	Tłumienie sygnału	
PowerAttenuationAuto:	0	Tłumienie wejściowy włączony automatycznie	
PowerGain:	0	Wewnętrzny przedwzmacniacz analizatora	
PowerUnit:	DBM	Jednostki	
SweepTime:	0.000050	Minimalny czas pojedynczego pomiaru (s)	

Wyniki pomiarów				
Dropa [m]	Wartosc [dBm]	Ser. geogr. [N]	Dlug. geogr. [E]	Data i czas pomiaru
0.000	-55.93	54.3865697210	18.7188574205	Wed Sep 16 08:22:02 2009
0.480	-50.19	54.3865697210	18.7188574205	Wed Sep 16 08:22:04 2009
0.960	-50.79	54.3865697210	18.7188471760	Wed Sep 16 08:22:05 2009
1.440	-64.62	54.3865663062	18.7188505908	Wed Sep 16 08:22:06 2009
1.920	-54.76	54.3865697210	18.7188505908	Wed Sep 16 08:22:07 2009
2.404	-53.83	54.3865594765	18.7188471760	Wed Sep 16 08:22:08 2009
2.880	-50.05	54.3865594765	18.7188488834	Wed Sep 16 08:22:09 2009

Rys. 2.8. Struktura pliku zawierającego wyniki pomiarów

Dzięki informacjom o drodze przebytej przez wózek pomiarowy możliwe jest wyznaczanie odcinków trasy propagacji sygnału radiowego, na których wyniki pomiarów powinny być uśredniane zgodnie z wytycznymi zawartymi w [49] i [80]. Kolumna *Wartosc* zawiera wyniki pomiaru mocy sygnału radiowego na wejściu analizatora widma, wyrażone w określonych podczas konfiguracji stanowiska jednostkach, zwykle [dBm]. Długość i szerokość geograficzna odczytywane z odbiornika GPS zapisywane są w stopniach i ułamkach stopnia, według układu współrzędnych WGS-84 (ang. *World Geodetic System '84*). Data i czas pomiaru są zapisywane z uwzględnieniem przesunięcia pomiędzy czasem środkowoeuropejskim a wschodnioeuropejskim. Pliki o takiej strukturze są wygodne do przetwarzania w arkuszach kalkulacyjnych, bądź jako źródło danych wejściowych dla programów służących do obróbki statystycznej.

Zgodnie z [49] zaleca się, aby punkty pomiarowe były wybierane na trasie propagacji fali radiowej co  $0,8 \lambda$ . Ponadto odcinek trasy, na której wyniki pomiarów powinny być każdorazowo uśredniane, wynosi  $40 \lambda$ , co zostało przedstawione w podrozdziale 2.1.3 niniejszej rozprawy. W takim stanie rzeczy konieczne było wyposażenie mobilnego

stanowiska badawczego w mechanizm umożliwiający wyzwalanie pomiarów w odpowiednich punktach na trasie propagacji sygnału radiowego. Zrealizowane to zostało dzięki zastosowaniu enkodera obrotowego GI 356 firmy Baumer, sprzężonego z układem sterującym jego pracą oraz z kołem pomiarowym. Dzięki temu możliwe jest przeliczanie kąta obrotu tego koła na odległość liniową, pokonywaną przez stanowisko badawcze i wysyłanie – co określoną odległość – do komputera sterującego impulsów wyzwalających kolejne pomiary mocy sygnału na wejściu analizatora widma.

Osoby obsługujące stanowisko badawcze mają możliwość obserwacji w czasie rzeczywistym – przy pomocy wyświetlacza LCD – bieżących wyników pomiarów, przebytego dystansu, aktualnej pozycji geograficznej oraz prędkości wózka pomiarowego. Ostatni parametr powinien stanowić przedmiot szczególnej uwagi operatora aparatury, ze względu na wymóg zawarty w zaleceniu [49], dotyczący maksymalnej prędkości pojazdu w trakcie realizacji procedur pomiarowych. Dla przypomnienia prędkość ta zależy od częstotliwości sygnału pomiarowego oraz minimalnego czasu trwania pojedynczego pomiaru, zgodnie z zależnością (2.10). Należy także mieć na uwadze fakt, że ze względu na wymogi BHP, w trakcie wykonywania pomiarów powinna być zapewniona dobra widzialność wózka pomiarowego przez innych użytkowników znajdujących się na obszarze prowadzonych badań. Aspekt ten jest szczególnie istotny w przypadku badań prowadzonych na terenach uprzemysłowionych, jak np. terminale kontenerowe, gdzie ma miejsce duże natężenie ruchu ciężarówek i ciągników kontenerowych, które z kolei mogą stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa zespołu obsługującego sprzęt pomiarowy. W związku z powyższym stanowisko wyposażone zostało w oświetlenie ostrzegawcze, zamocowane na maszcie anteny odbiorczej, w najwyższym możliwym punkcie pod powierzchnią przewodzącą anteny (patrz rys. 2.5). Oświetlenie to wykonane jest w oparciu na energooszczędnych modułach LED, dzięki czemu konieczność stosowania oświetlenia nie wpływa znacząco na czas pracy stanowiska pomiarowego na jednym akumulatorze.

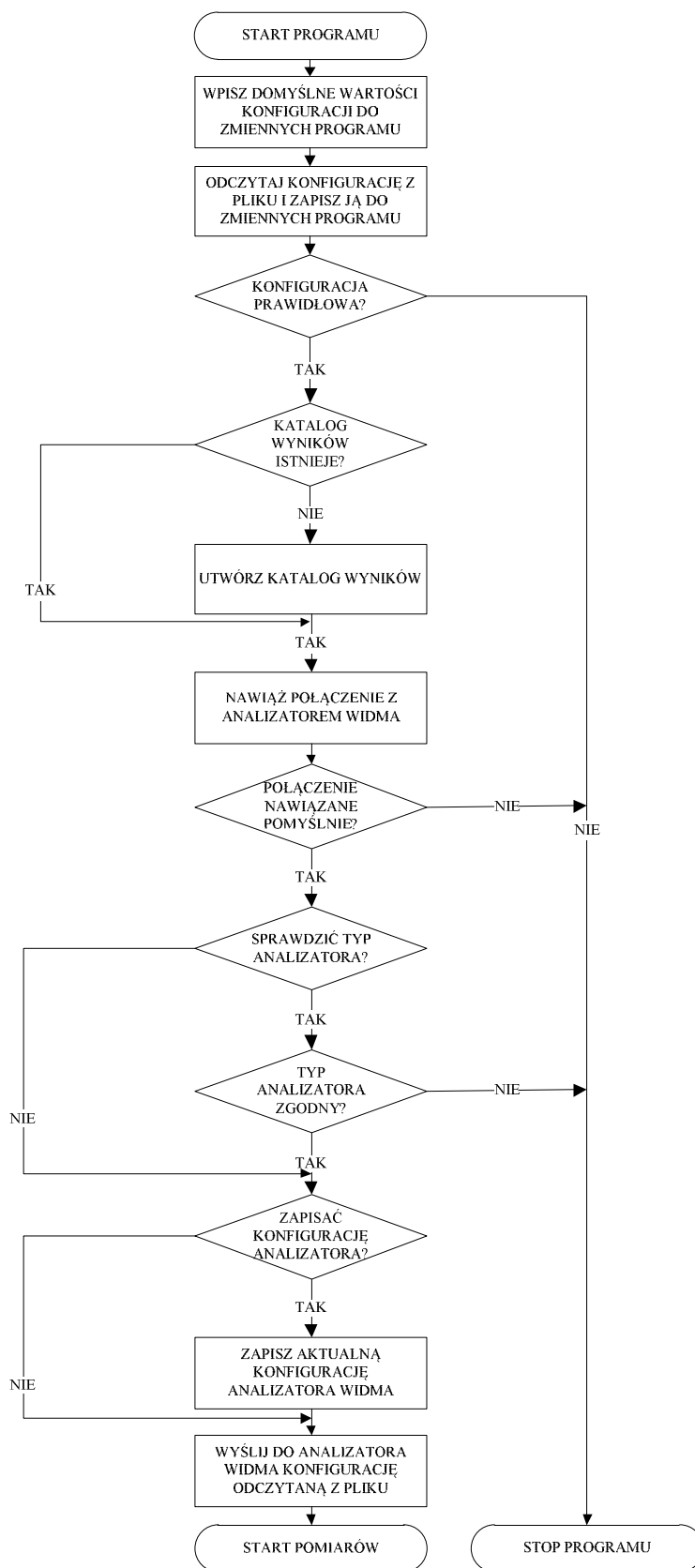
Urządzenia wchodzące w skład opisywanego stanowiska wymagają dwóch źródeł zasilania. Zarówno enkoder, jak i układ sterujący jego pracą, a także wyświetlacz LCD oraz oświetlenie ostrzegawcze są zasilane stałoprądowo. W tym celu stanowisko pomiarowe zostało wyposażone w akumulator EP 40-12 o pojemności 40 Ah i napięciu 12 V, który oprócz wyżej wymienionych urządzeń, zasila także przetwornicę DC/AC 12V/230V o mocy wyjściowej 600 W, służącą do zasilania analizatora widma oraz komputera sterującego jego pracą. Pojemność wytypowanego akumulatora pozwala na nie-

przerwaną pracę urządzeń przez 8 godzin, co w przypadku dotychczas przeprowadzanych badań było całkowicie wystarczające.

### **2.2.3. Oprogramowanie ruchomej części odbiorczej stanowiska pomiarowego**

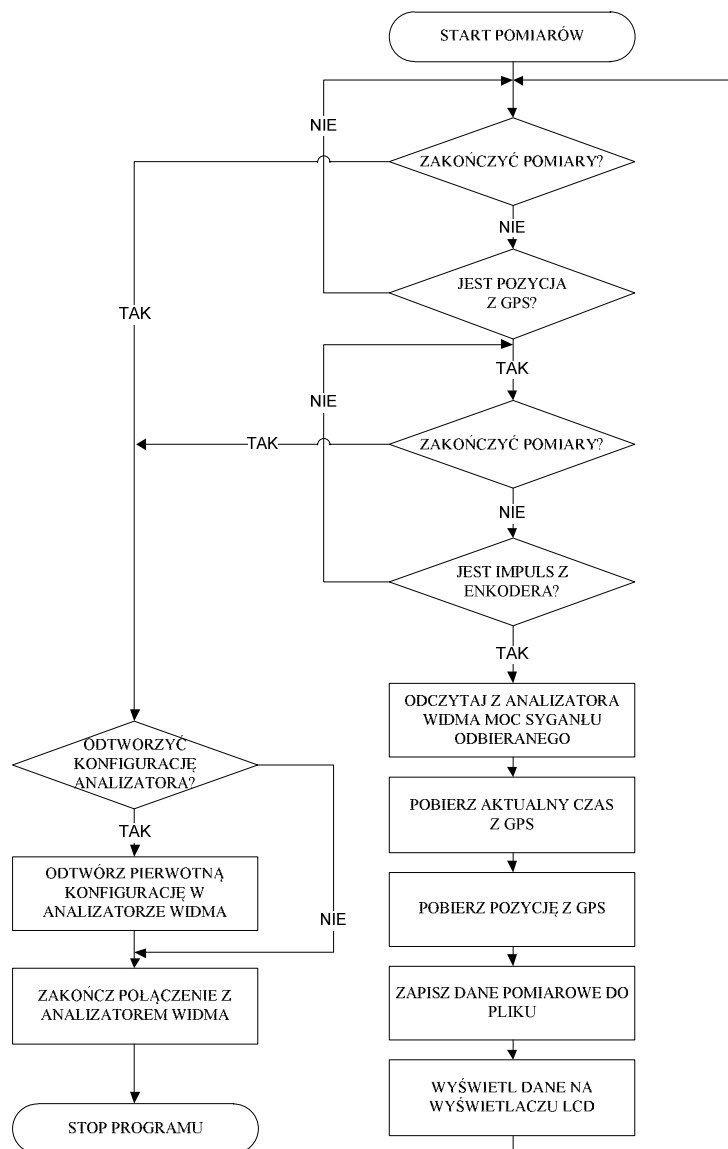
W celu zwiększenia efektywności prowadzonych badań propagacyjno-zasięgowych opracowane zostało oprogramowanie umożliwiające automatyzację pomiarów mocy sygnału radiowego na wejściu analizatora widma sygnału oraz powiązywanie wyników pomiarów z długością trasy propagacji, obliczoną na podstawie danych odebranych przez odbiornik GPS. Oprogramowanie to pracuje pod kontrolą systemu operacyjnego Linux i umożliwia określenie częstotliwości środkowej i szerokości pasma analizowanego sygnału, sposobu jego pomiaru i uśredniania wyników. Program działa według opracowanego algorytmu, opisanego w dalszej części podrozdziału. Ze względu na swój rozmiar, schemat blokowy algorytmu został podzielony na dwie części, tj.: konfigurującą odbiornik pomiarowy oraz sterującą pracą odbiornika pomiarowego.

Konfiguracja systemu pomiarowego odbywa się zgodnie z algorytmem przedstawionym na rys. 2.9. Na początku działania programu do odpowiednich zmiennych wpisane zostają początkowe wartości parametrów konfiguracyjnych. W kolejnym kroku odczytywany jest plik konfiguracyjny, a parametry w nim zawarte zapisywane są do odpowiednich zmiennych programu. Jeśli podczas odczytu pliku konfiguracyjnego wystąpią błędy, praca programu zostaje zatrzymana. W przypadku braku błędów sprawdzane jest, czy w pamięci komputera sterującego utworzony został wcześniej katalog przeznaczony na wyniki pomiarów – jeśli nie, to jest on tworzony. Następnie nawiązywana jest komunikacja z analizatorem widma. Niepowodzenie nawiązania połączenia skutkuje zatrzymaniem działania programu. W kolejnym kroku sprawdzany jest typ analizatora widma, jeśli taka opcja została zaznaczona w pliku konfiguracyjnym. Jeżeli typ analizatora jest niezgodny z typem urządzenia zadeklarowanym w pliku, działanie programu zostaje przerwane. Przed skonfigurowaniem analizatora, jego pierwotne ustawienia są zapisywane w pamięci, jeśli została zaznaczona związana z tym opcja w pliku konfiguracyjnym. W przeciwnym przypadku konfiguracja pierwotna zostaje usunięta. Po zdalnym ustawieniu parametrów konfiguracyjnych odbiornika, program przechodzi do fazy pomiarów.



Rys. 2.9. Algorytm konfiguracji odbiornika pomiarowego

Algorytm sterowania pracą odbiornika pomiarowego przedstawiony został na rys. 2.10. Rozpoczyna się on od sprawdzenia, czy użytkownik zgłosił żądanie zakończenia programu. Jeśli tak, to program przechodzi do procedury zakończenia pomiarów. W przeciwnym razie sprawdzana jest dostępność danych z odbiornika GPS.



Rys. 2.10. Algorytm sterowania odbiornikiem pomiarowym

W przypadku, gdy akwizycja danych tego odbiornika jeszcze się nie zakończyła, bądź odbiornik znajduje się poza obszarem widoczności odpowiedniej, niezbędnej do ustalenia pozycji liczby satelitów, działanie programu jest zawieszane do czasu, aż dostępne będą dane z odbiornika GPS, bądź też, gdy użytkownik zgłosi żądanie przerwania pracy programu. Za każdym razem, kiedy układ sterujący enkoderem wysłał do komputera impuls wyzwalający kolejny pomiar, odczytywana jest pomierzona przez analizator widma moc

sygnału radiowego dostępna na jego wejściu, natomiast z odbiornika GPS pobierane są: aktualny czas i pozycja geograficzna. Następnie dane te są ze sobą powiązywane i zapisywane w pliku wynikowym. Po wykonaniu pomiarów i zapisaniu wyników do pliku, program wraca na początek pętli pomiarowej. Po zebraniu odpowiedniej liczby danych pomiarowych użytkownik może zainicjować procedurę zakończenia pomiarów. Rozpoczyna się ona od sprawdzenia przez program czy zapamiętana została pierwotna konfiguracja analizatora widma. Jeśli tak, to konfiguracja ta jest odtwarzana, po czym połączenie z analizatorem widma jest rozłączane i program kończy swoje działanie.

Tak wykonany i zaprogramowany ruchomy układ badawczy umożliwia zgromadzenie dużej liczby danych dotyczących różnych przypadków propagacyjnych w badanym środowisku. Odpowiednia obróbka statystyczna zebranych danych pozwala na wyznaczenie – po uwzględnieniu mocy sygnału na zaciskach wejściowych anteny nadawczej, zysków energetycznych anten pomiarowych oraz strat w torach nadawczym i odbiorczym łącza radiowego [12] – tłumienia propagacyjnego, zdefiniowanego w [45].

### **2.3. Opis i wstępna charakterystyka wykonanych badań**

W niniejszym podrozdziale przedstawione zostało badane środowisko, krótki opis przeprowadzonych badań oraz ich wstępna charakterystyka.

#### ***2.3.1. Charakterystyka badanego środowiska uprzemysłowionego***

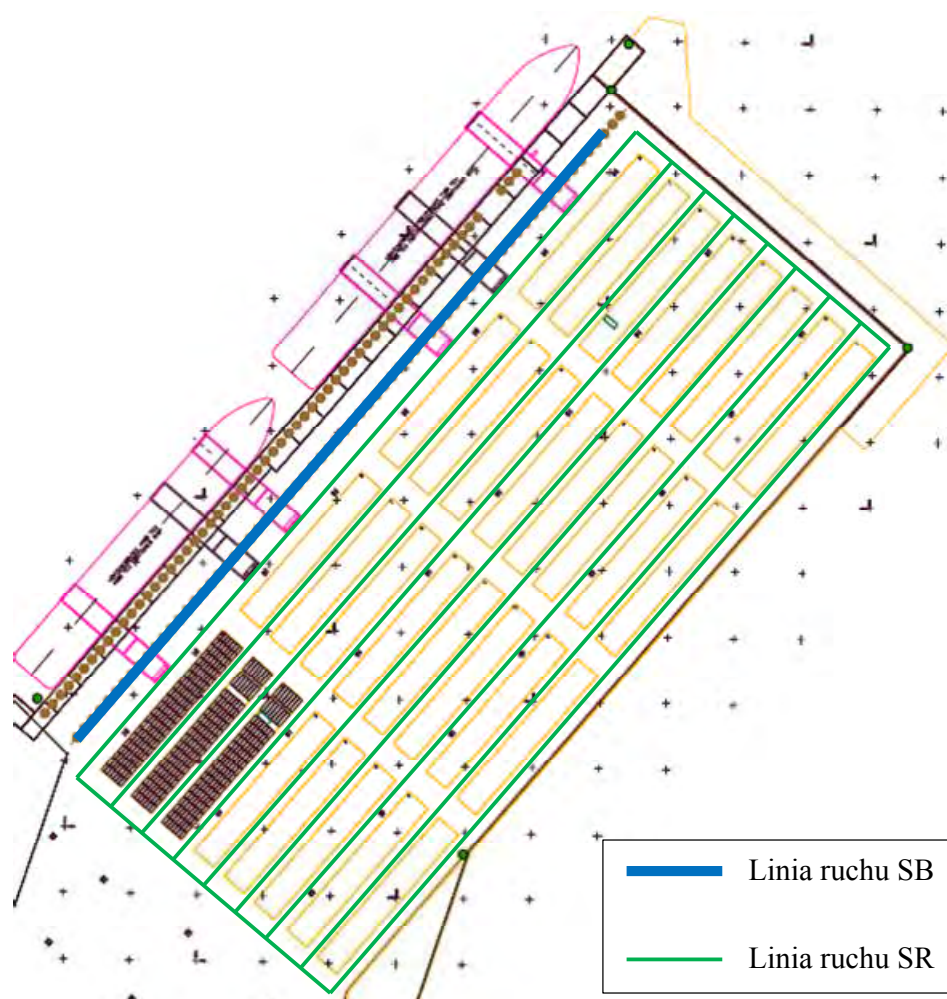
Zaprezentowany w poprzednim podrozdziale system pomiarowy został zastosowany podczas badań przeprowadzonych w szczególnym przypadku środowiska uprzemysłowionego, jakim jest terminal kontenerowy DCT Gdańsk, zbudowany na sztucznym półwyspie otoczonym z trzech stron wodami Zatoki Gdańskiej (rys. 2.11).



Rys. 2.11. Zdjęcie lotnicze terminalu kontenerowego DCT Gdańsk [108]



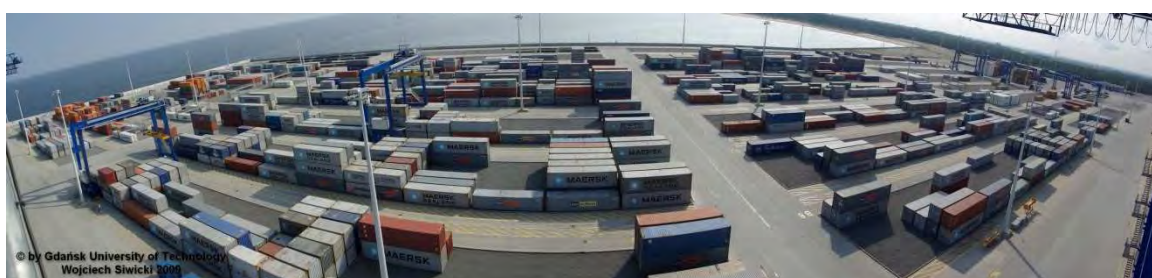
Na rys. 2.12 przedstawiony został układ architektoniczny terminalu, gdzie zaznaczono miejsca składowania stosów kontenerów, tzw. pól składowych. Wymiary kontenera dwudziestostopowego są zestandaryzowane, jego długość wynosi 6,1 m, szerokość jest równa 2,5 m, natomiast wysokość to 2,6 m. Długość kontenera czterdziestostopowego wynosi 12,2 m, jednakże w niniejszej rozprawie zakłada się występowanie tylko kontenerów dwudziestostopowych, a każdy kontener czterdziestostopowy traktowany jest jako dwa mniejsze ustawione w rzędzie jeden za drugim. Rozkład kontenerów jest typowy dla tego typu środowiska przemysłowego i ma istotny wpływ na warunki rozchodzenia się fal radiowych. Obszar składowania kontenerów ma długość 650 m i szerokość 310 m, co daje powierzchnię przekraczającą 20 hektarów. Wymiary pojedynczego pola składowego (żółty prostokąt na rys. 2.12) to 139,1 m długości i 19,9 m szerokości. Można także wyróżnić dwa rodzaje ciągów komunikacyjnych między polami składowymi: główne, o szerokości 10 m oraz prostopadłe o szerokości 19,15 m.



Rys. 2.12. Układ architektoniczny terminalu kontenerowego DCT Gdańsk z zaznaczonymi liniami, wzdłuż których podczas pomiarów poruszała się stacja bazowa (SB) i stacja ruchoma (SR)

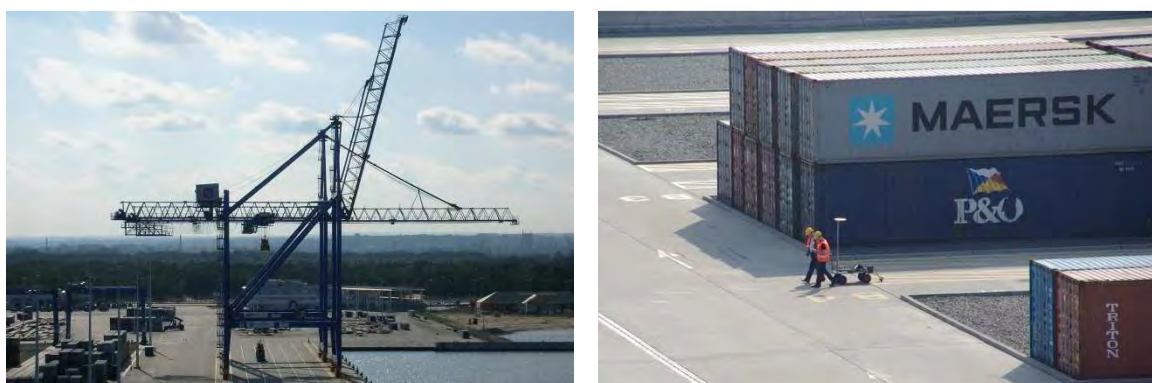


Terminal składa się z 32 pól składowych, na których ustawiane są stosy kontenerów. Pola te rozmieszczone są w ośmiu rzędach po cztery pola. Na każdym z nich można ustawić 154 stosy kontenerów 20-stopowych, zatem na terenie całego terminalu może być ustawionych maksymalnie 4928 takich stosów. W jednym stosie może być ustawionych maksymalnie 5 kontenerów, zatem minimalna wysokość stosu może wynosić 2,6 m, a jego wysokość maksymalna nie przekracza 13 m. Należy także podkreślić, że wysokości stosów kontenerowych są zmienne w czasie i mogą znacząco zmienić swoje wartości nawet w ciągu jednego dnia. Na terenie terminalu może być składowanych maksymalnie 24640 kontenerów 20-stopowych.



*Rys. 2.13. Widok panoramiczny terminalu kontenerowego DCT Gdańsk*

Na rys. 2.13 przedstawiony został widok panoramiczny terminalu kontenerowego DCT Gdańsk z miejsca, gdzie zainstalowana była antena nadawcza. Natomiast na rys. 2.14 widoczna jest suwnica nabrzeżowa, na której zainstalowana była stacja bazowa oraz zespół badawczy Katedry Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych Politechniki Gdańskiej podczas przeprowadzania pomiarów propagacyjnych na terenie tego terminalu, przy zastosowaniu stacji ruchomej systemu pomiarowego (z prawej).



*Rys. 2.14. Suwnica nabrzeżowa (z lewej), na której zainstalowana była stacja bazowa oraz zespół badawczy obsługujący stację ruchomą podczas pomiarów na terenie DCT Gdańsk (z prawej)*

Podczas przeprowadzania badań pomiarowych terminal kontenerowy pracował w normalnym trybie, co skutkowało tym, że suwnica nabrzeżowa zmieniała swoje położenie wzdłuż odcinka zaznaczonego na rys. 2.12 grubą niebieską linią. Natomiast stacja ruchoma poruszała się wzdłuż głównych ciągów komunikacyjnych, jak to zostało zaznaczone na tym samym rysunku za pomocą cienkiej zielonej linii. Taki wybór ścieżek pomiarowych wynika z faktu, że podczas normalnej pracy terminalu kontenerowego na jego terenie ma miejsce duży ruch ciągników kontenerowych, ciężarówek, samojezdnych suwnic placowych i innych pojazdów obsługi, co stanowi potencjalne zagrożenie dla osób poruszających się pieszo po terminalu. W związku z tym konieczne było zapewnienie bezpieczeństwa zespołu badawczego poprzez wybór najbezpieczniejszego i uzgodnionego z administracją DCT Gdańsk sposobu poruszania się.

### **2.3.2. Opis przeprowadzonych badań**

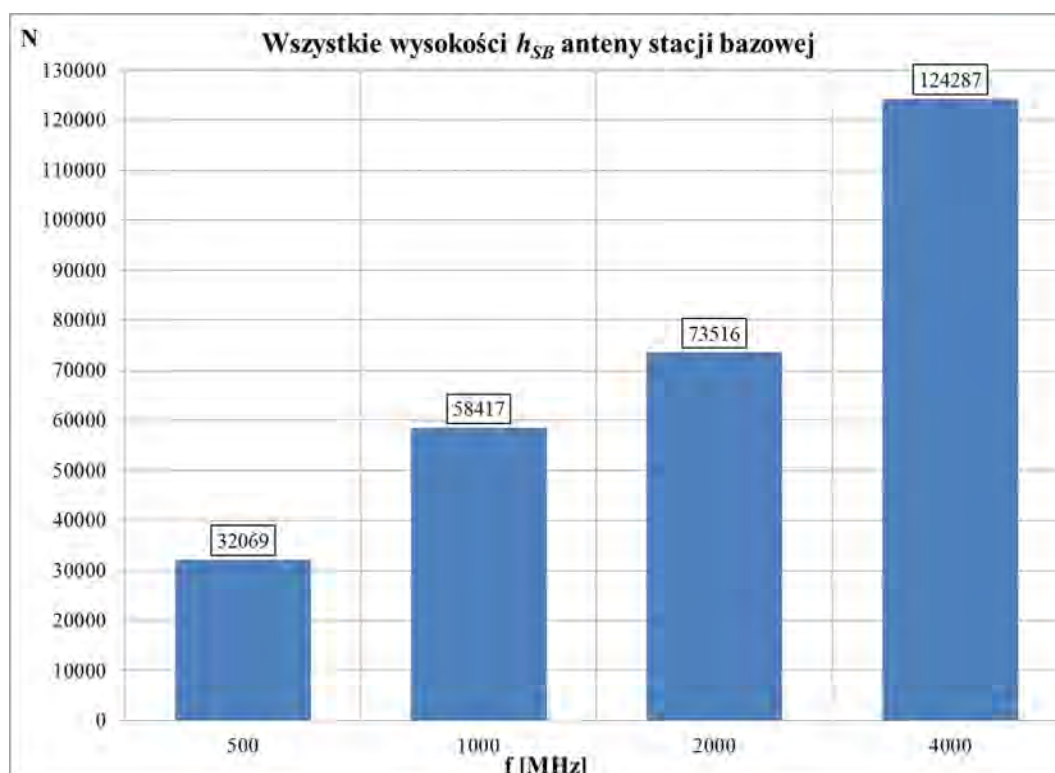
Badania propagacyjne na przedstawionym terenie prowadzone były w różnych porach roku w latach 2008-2009. Jak to zostało opisane w podrozdziale 2.2, łącze pomiarowe składało się ze stacjonarnej części nadawczej, ruchomej części odbiorczej oraz środowiska propagacji, którego tłumienie stanowiło przedmiot badań. Jako sygnał pomiarowy zastosowano sygnał z wąskopasmową modulacją BPSK o przepływności 3 kb/s i pseudoprzypadkową zawartością informacyjną. Zgodnie z aktualnymi zaleceniami normatywnymi, punkty pomiarowe wybierano na trasie propagacji fali radiowej co  $0,8 \lambda$ . Ponadto odcinek trasy, na której wyniki pomiarów były każdorazowo uśredniane, wynosił  $40 \lambda$ , przy czym jako miarę tendencji centralnej zastosowano medianę.

### **2.3.3. Wstępna charakterystyka wykonanych badań**

W wyniku badań przeprowadzonych w opisany powyżej sposób uzyskano łączną próbę o liczebności 288289, zawierającą wyniki pomiarów tłumienia fali radiowej, dla tras propagacyjnych o długościach do 620 m, częstotliwości  $f$  sygnału pomiarowego z zakresów fal decymetrowych (UHF) i centymetrowych (SHF) [51]: 500 MHz, 1 GHz, 2 GHz i 4 GHz oraz dla wysokości  $h_{SB}$  zawieszenia anteny nadawczej: 12, 24 i 36 m nad poziomem terenu. Ze względu na uwarunkowania techniczne wysokość zawieszenia anteny odbiorczej była stała i wynosiła 2 m nad poziomem płyty terminalu.

Poniżej przedstawione zostały liczebności prób w poszczególnych podzbiorach zgromadzonych danych pomiarowych, w zależności od częstotliwości  $f$  pomiarowego sygnału radiowego, a także wysokości  $h_{SB}$  zawieszenia anteny stacji bazowej.

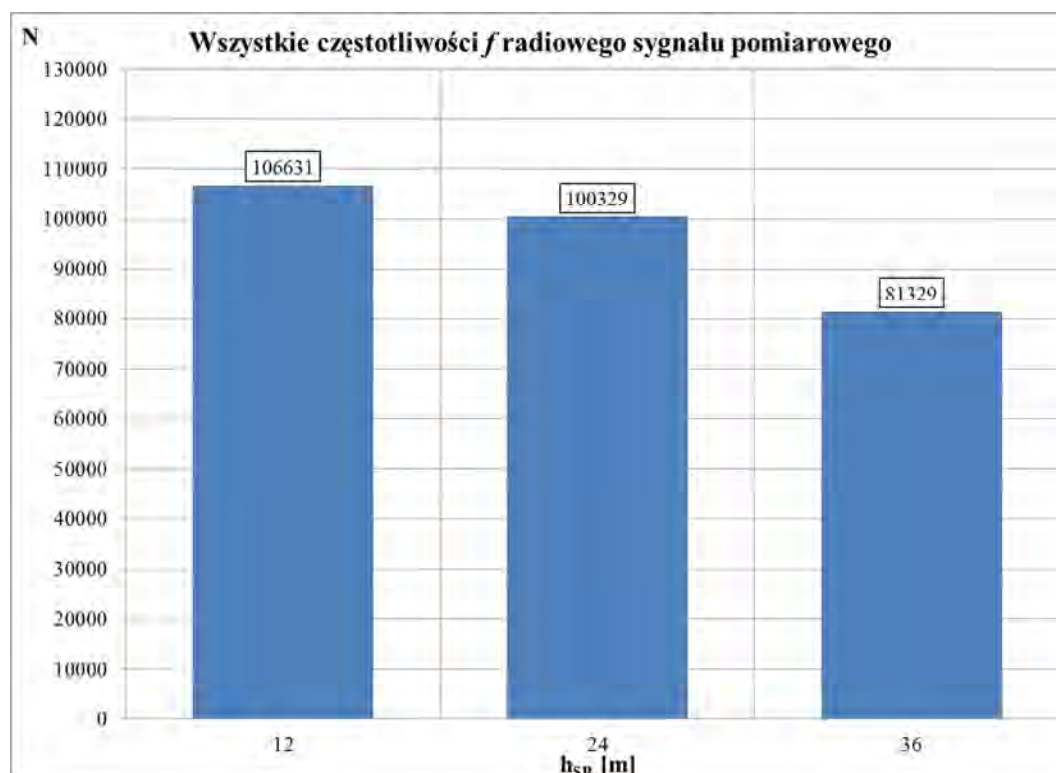
Ze względu na zastosowaną metodę dobierania punktów pomiarowych, liczebności prób dla poszczególnych częstotliwości sygnału radiowego są tym większe, im większa jest wartość tej częstotliwości (im mniejsza jest długość fali tego sygnału), co zostało przedstawione na rys. 2.15.



Rys. 2.15. Liczebności prób dla różnych częstotliwości  $f$  radiowego sygnału pomiarowego

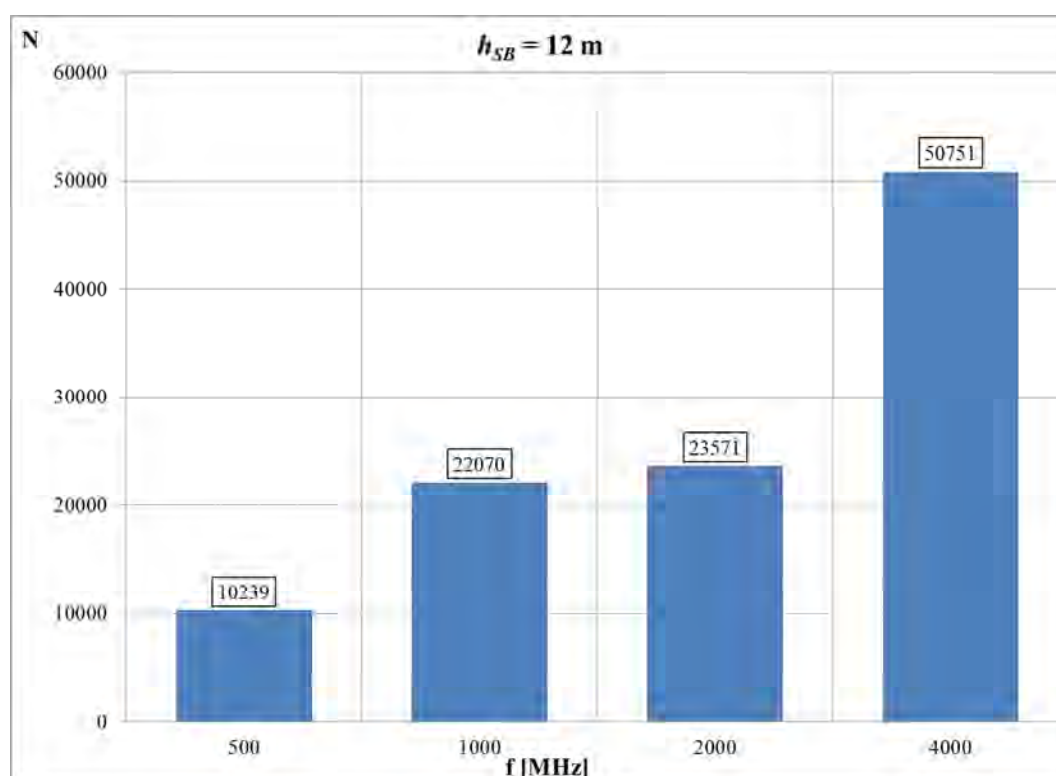
Dla częstotliwości sygnału pomiarowego wynoszącej 500 MHz zgromadzono dane o 32069 trasach propagacyjnych. Dla częstotliwości 1 GHz liczebność ta wynosi już 58417, a dla 2 GHz i 4 GHz odpowiednio 73516 i 124287.

Liczebności prób dla poszczególnych wysokości zawieszenia anteny nadawczej (rys. 2.16) są porównywalne dla wysokości 12 m i 24 m i wynoszą odpowiednio 106631 oraz 100329. Natomiast dla wysokości równej 36 m liczebność próby wynosi 81329.

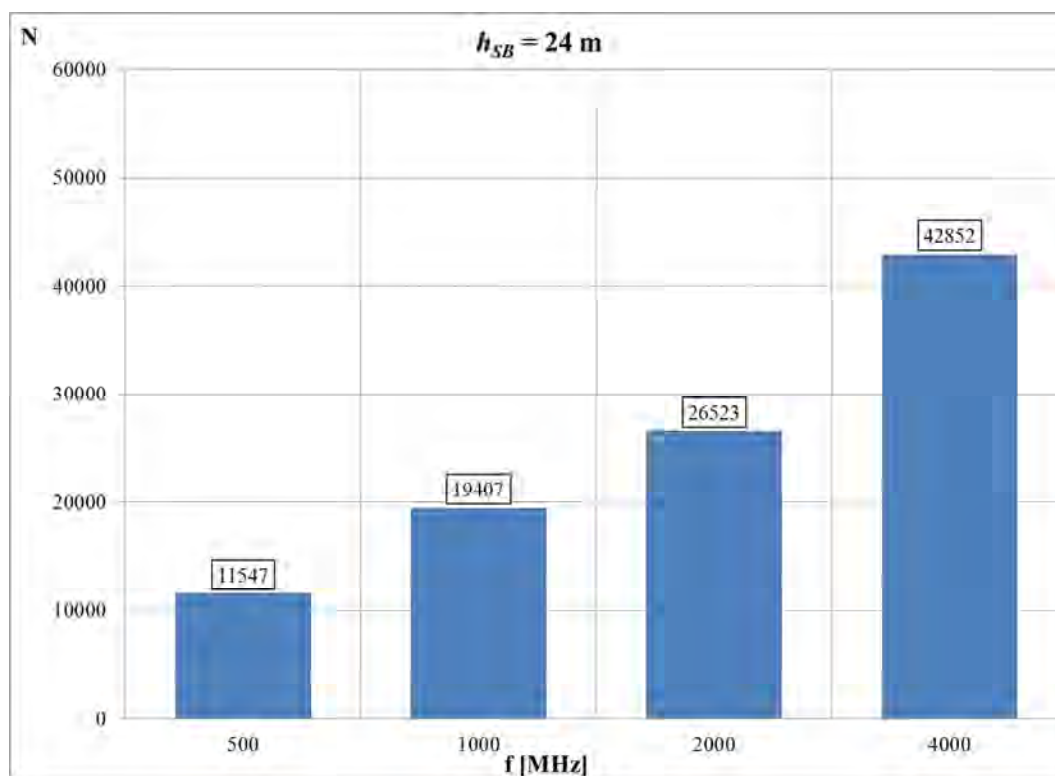


Rys. 2.16. Liczebności prób dla różnych wysokości  $h_{SB}$  zawieszenia anteny nadawczej

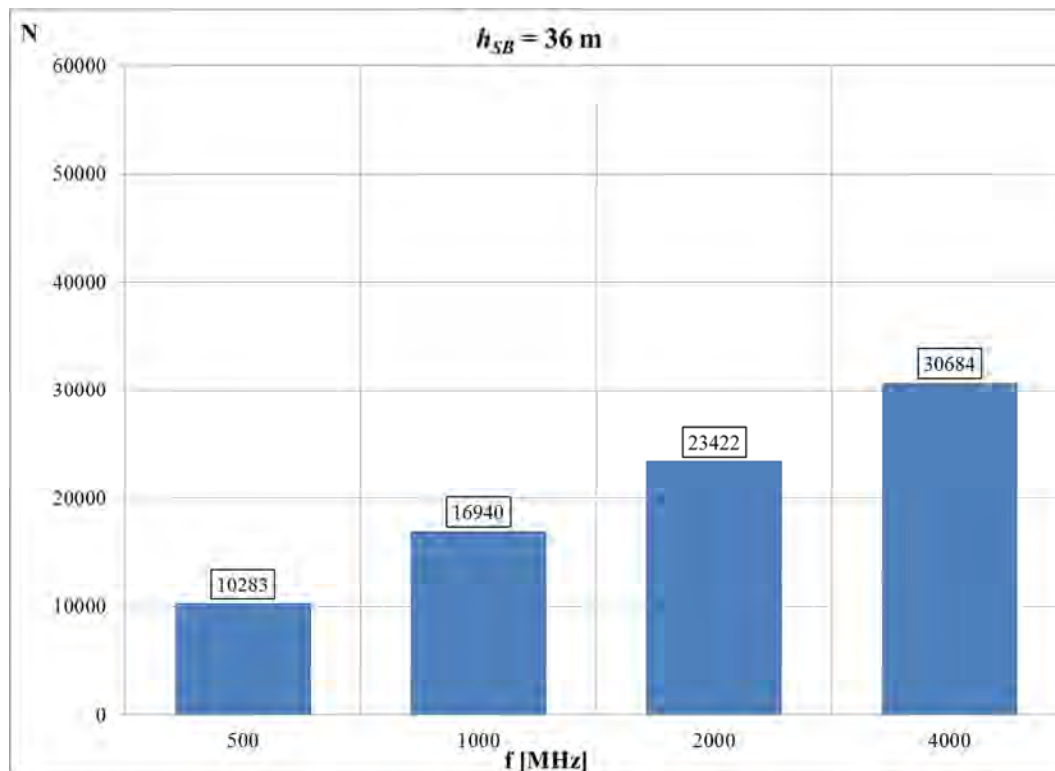
Na rys. 2.17 – 2.19 przedstawiono liczebności prób dla różnych częstotliwości  $f$  sygnału pomiarowego dla ustalonych wysokości  $h_{SB}$  zawieszenia anteny stacji bazowej.



Rys. 2.17. Liczebności prób dla różnych częstotliwości  $f$  sygnału pomiarowego ( $h_{SB} = 12$  m)



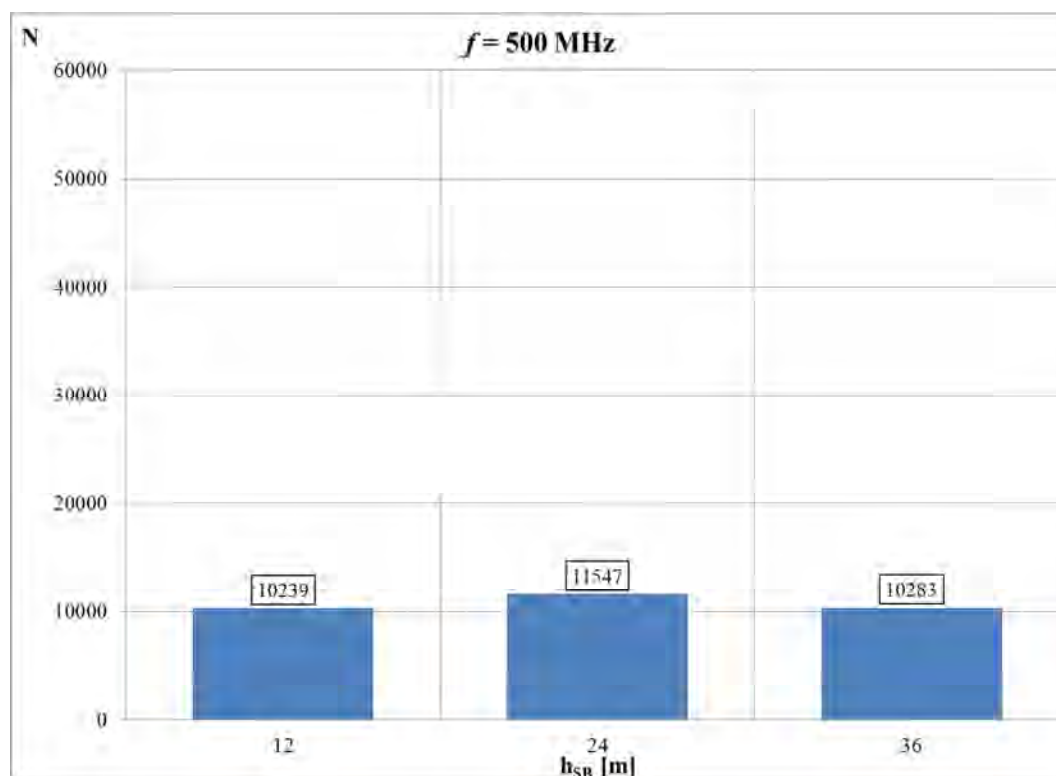
Rys. 2.18. Liczebności prób dla różnych częstotliwości  $f$  sygnału pomiarowego ( $h_{SB} = 24$  m)



Rys. 2.19. Liczebności prób dla różnych częstotliwości  $f$  sygnału pomiarowego ( $h_{SB} = 36$  m)

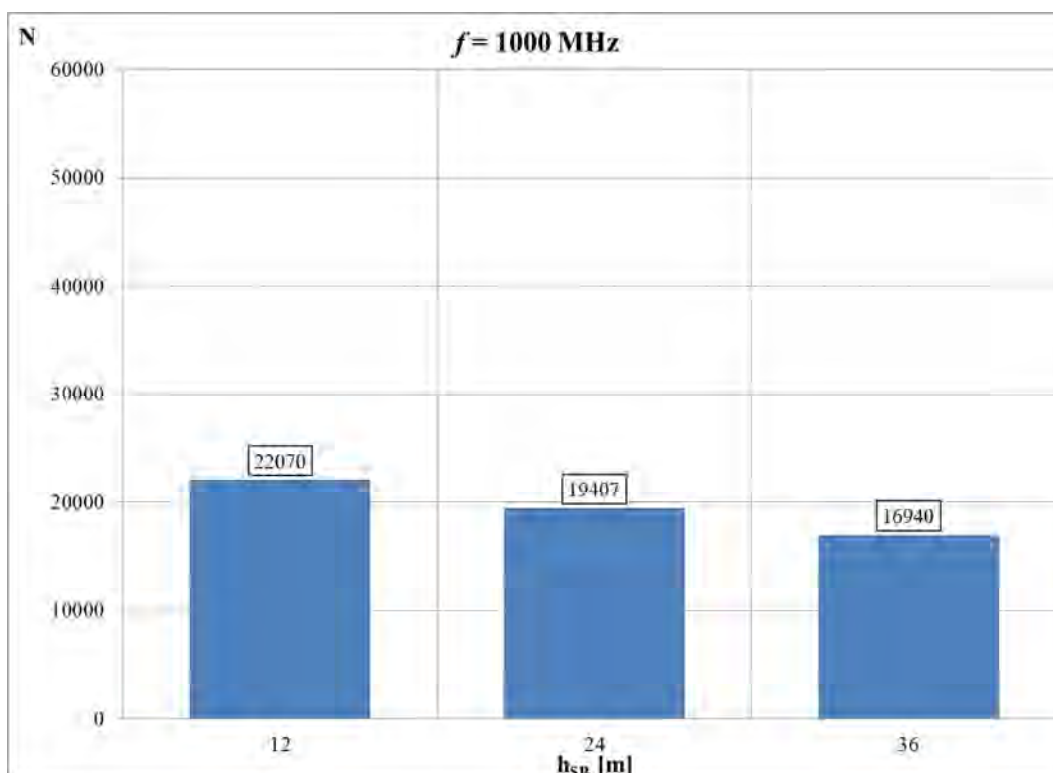
Liczebności poszczególnych prób są tym większe, im wyższa jest częstotliwość sygnału pomiarowego, czego można było się spodziewać i co wynika z faktu uzależnienia odległości pomiędzy punktami pomiarowymi od długości fali radiowej, a – co za tym idzie – od jej częstotliwości.

Z kolei na rys. 2.20 – 2.23 przedstawiono liczebności prób dla różnych wysokości  $h_{SB}$  zawieszenia anteny stacji bazowej i ustalonych częstotliwości radiowego sygnału pomiarowego. Za wyjątkiem przypadku dla częstotliwości wynoszącej 4000 MHz liczebności prób mają względnie porównywalne wartości dla każdej z trzech przebadanych wysokości zawieszenia anteny stacji bazowej. Dla przypadku 4000 MHz liczebność próby maleje wraz ze wzrostem wysokości instalacji anteny stacji bazowej.

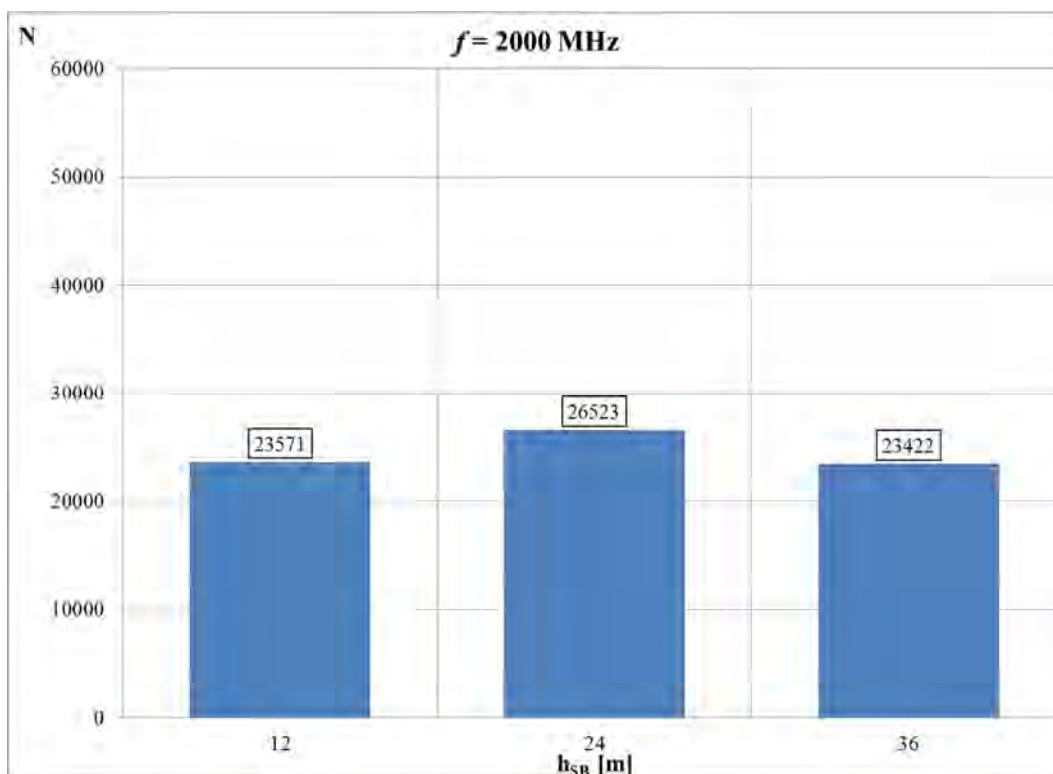


Rys. 2.20. Liczebności prób dla różnych wysokości  $h_{SB}$  anteny nadawczej ( $f = 500$  MHz)

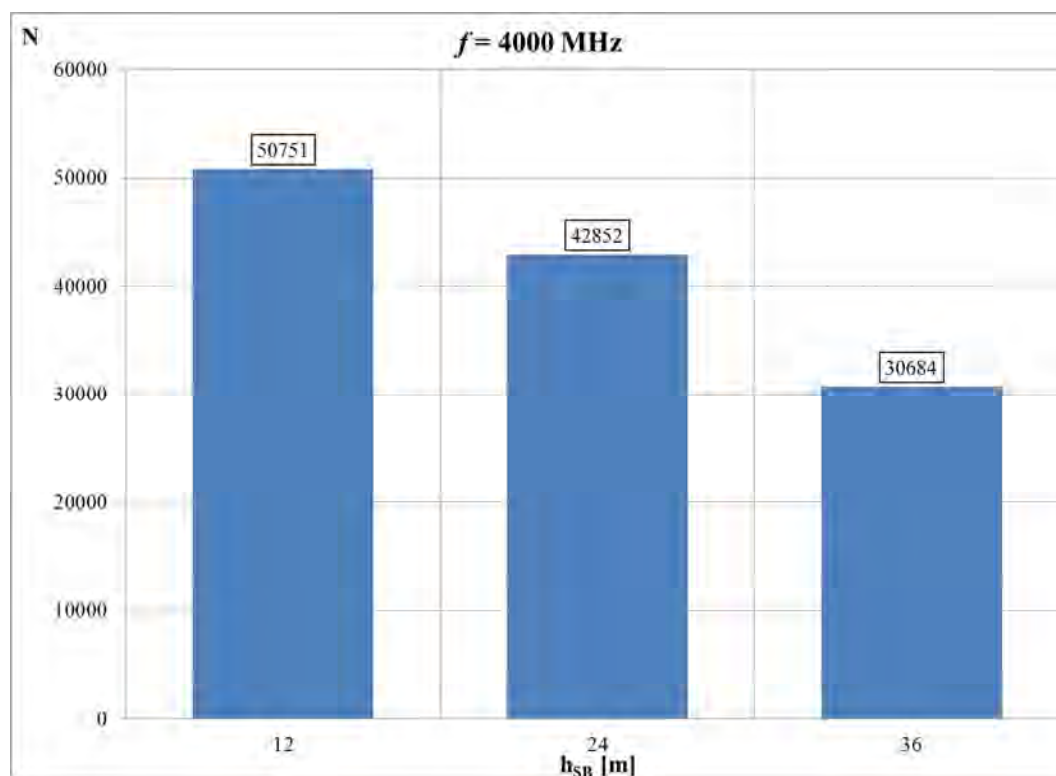




Rys. 2.21. Liczebności prób dla różnych wysokości  $h_{SB}$  anteny nadawczej ( $f = 1000$  MHz)



Rys. 2.22. Liczebności prób dla różnych wysokości  $h_{SB}$  anteny nadawczej ( $f = 2000$  MHz)



Rys. 2.23. Liczebności prób dla różnych wysokości  $h_{SB}$  anteny nadawczej ( $f = 4000$  MHz)

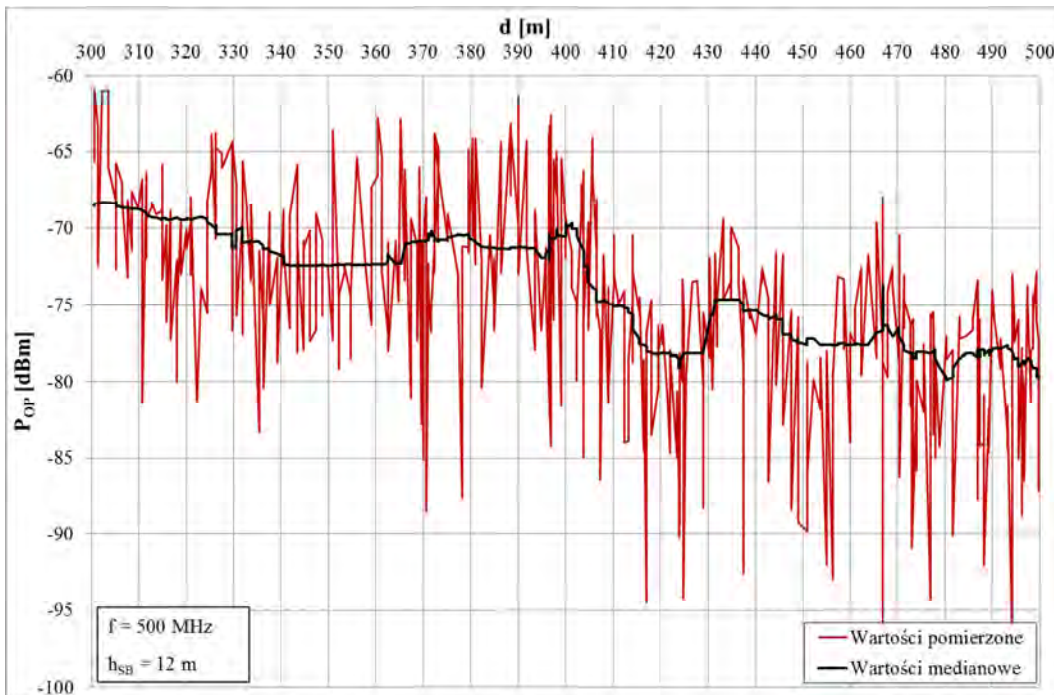
Ze względu na obecność stosów kontenerów (najczęściej zbudowanych z pofalowanej blachy stalowej) o różnych wysokościach i układzie przestrzennym, propagacja fal radiowych między nadajnikiem a odbiornikiem odbywa się po wielu różnych ścieżkach, na co mają wpływ głównie zjawiska wielokrotnych odbić i dyfrakcji. Powyższe stanowi cechę charakterystyczną zjawiska wielodrogowości [88], które skutkuje zanikami odbieranego sygnału [70]. Są one wynikiem tego, że sygnał odbierany jest sumą kilku składowych o różnych amplitudach, fazach i kierunkach, z których są odbierane [43]. W łączu radiowym systemu ruchomego, kiedy terminal użytkownika zmienia swoje położenie, zjawisko to jest zmienne w czasie, dając zmiany dwojakiemu rodzajowi [70]. Zmienność średniej mocy sygnału nazywana jest zanikami wolnymi, natomiast szybkie zmiany mocy wokół wartości średniej noszą nazwę zaników szybkich [106], które charakteryzują się szybkimi i głębokimi spadkami wartości chwilowej mocy sygnału odbieranego [88].

Na czterech kolejnych rysunkach (rys. 2.24 – rys. 2.27) przedstawione zostały przykładowe przebiegi sygnału odbieranego na wejściu odbiornika pomiarowego dla różnych długości tras propagacji, różnych częstotliwości sygnału pomiarowego oraz różnych wysokości zawieszenia anteny nadawczej. Wykresy zostały sporządzone na bazie wybra-

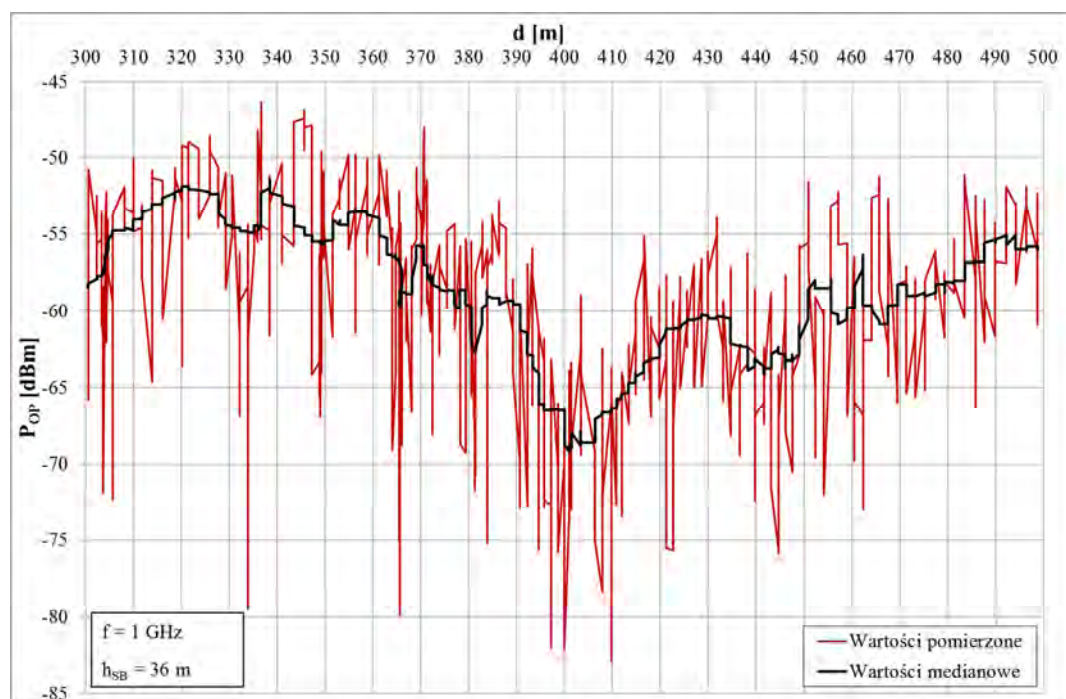


nych danych pomiarowych, zebranych podczas badań w DCT Gdańsk. Kolorem czerwonym zaznaczono przebieg mocy sygnału na wejściu odbiornika, czarnym zaś przebieg utworzony z wartości medianowych, obliczonych zgodnie z zależnością (2.11). Jak można było się spodziewać, zaniki szybkie są częstsze w przypadku wyższych częstotliwości, a głębokość zaników najczęściej nie przekracza 20 dB. Zgodnie z [88] zaniki szybkie dochodzące do głębokości 30 dB występują znacznie rzadziej.

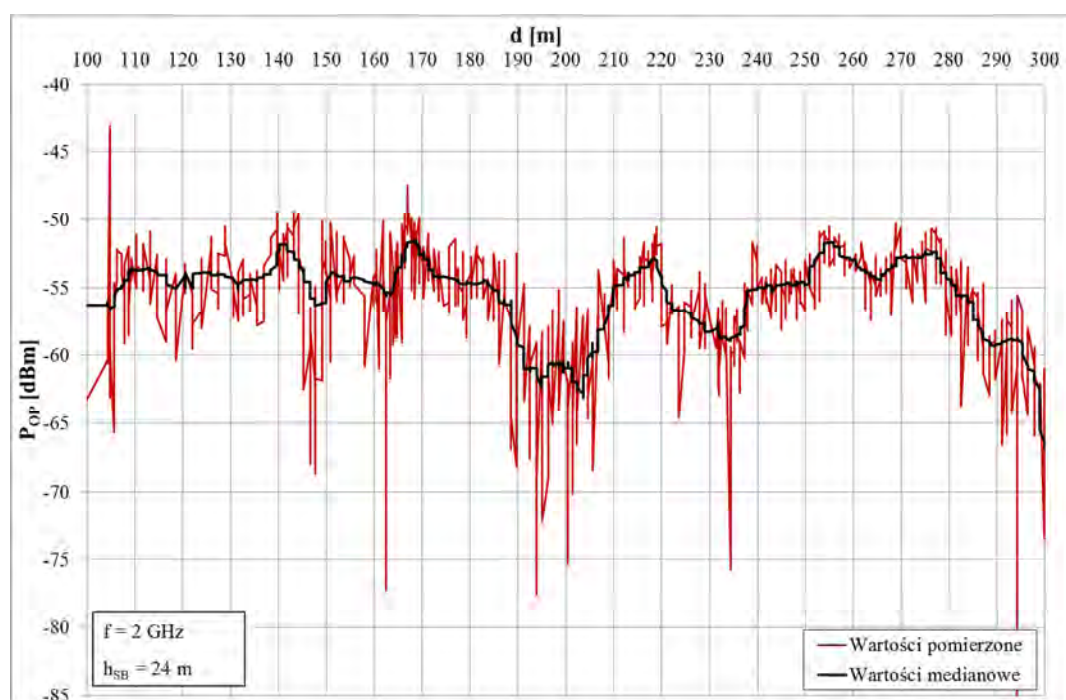
Przebieg lokalnych (krótkookresowych) wartości średnich (medianowych) obrazuje wpływ wolnych zaników na sygnał odbierany. Na zjawisko to decydujący wpływ ma aktualny rozkład przestrzenny stosów kontenerów, ich wysokości oraz pozycja stacji ruchomej, która podczas ruchu może znaleźć się w cieniu radiowym (ang. *shadowing*), powodowanym przeszkodami na trasie propagacji fali radiowej. Należy zaznaczyć, że zaniki wolne są zazwyczaj niezależne od częstotliwości sygnału radiowego [104].



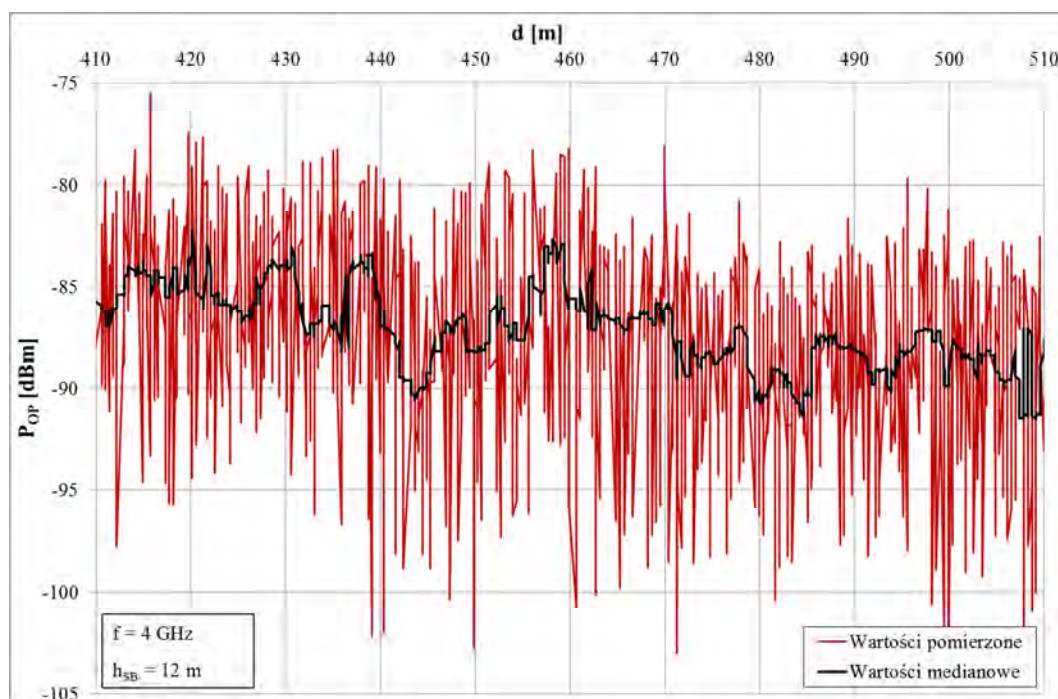
Rys. 2.24. Przykładowy przebieg mocy sygnału odbieranego na wejściu odbiornika pomiarowego dla 200-metrowego odcinka drogi propagacji oraz dla  $f=500\text{MHz}$  i  $h_{SB}=12\text{m}$



Rys. 2.25. Przykładowy przebieg mocy sygnału odbieranego na wejściu odbiornika pomiarowego dla 200-metrowego odcinka drogi propagacji oraz dla  $f=1\text{GHz}$  i  $h_{SB}=36\text{m}$



Rys. 2.26. Przykładowy przebieg mocy sygnału odbieranego na wejściu odbiornika pomiarowego dla 200-metrowego odcinka drogi propagacji oraz dla  $f=2\text{GHz}$  i  $h_{SB}=24\text{m}$



Rys. 2.27. Przykładowy przebieg mocy sygnału odbieranego na wejściu odbiornika pomiarowego dla 100-metrowego odcinka drogi propagacji oraz dla  $f=4\text{GHz}$  i  $h_{SB}=12\text{m}$

Znajomość właściwości statystycznych przebiegu wartości mocy sygnału radiowego jest niezbędna m.in. do planowania ruchomych systemów łączności bezprzewodowej. Zjawisko zaników wolnych ma duży wpływ nie tylko na dostępność kanału radiowego, dobór częstotliwości, na których działa system, ale także na planowanie ruchomych sieci radiowych [89]. W takim stanie rzeczy, to właśnie analiza przebiegu krótkookresowych wartości średnich (medianowych) i jego zależność od parametrów środowiska propagacyjnego stanowi podstawę do opracowania nowego modelu tłumienia propagacyjnego.



## **Rozdział 3.**

# ***Opis analizy statystycznej wyników badań propagacyjnych***

Niniejszy rozdział zawiera opis wstępnego przetwarzania danych pomiarowych oraz podstawy analizy statystycznej wyników badań, zawierające szczegółowy opis procedury wielowymiarowej regresji linowej, która posłużyła jako narzędzie przy opracowywaniu nowego modelu. Ponadto omówiono metody statystycznej oceny wyników badań eksperymentalnych.

### **3.1. Wstępne przetwarzanie danych pomiarowych**

Dane zebrane podczas przeprowadzonych badań pomiarowych zgromadzone zostały w kilkunastu plikach, których zawartość i strukturę przedstawiono w podrozdziale 2.2.2. W pierwszej kolejności obliczone zostały wartości medianowe mocy sygnału dostępnego na wejściu odbiornika, zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 2.1.3 i zależnością (2.11). W kolejnym kroku zintegrowano w jeden wszystkie pliki z wynikami badań pomiarowych oraz uzupełniono dane dotyczące wysokości zawieszenia anteny nadawczej, częstotliwości badanego sygnału oraz dane obserwacyjne, dotyczące warunków propagacyjnych panujących w terminalu kontenerowym podczas poszczególnych serii pomiarowych. Informacje te dotyczą liczby składowanych kontenerów na poszczególnych polach składowych, średniej wysokości stosów kontenerów w różnych częściach terminalu kontenerowego, itp.

Korzystając ze znajomości współrzędnych punktów charakterystycznych terminalu kontenerowego oraz z powszechnie znanej zależności na wartość kąta między dwiema prostymi na płaszczyźnie [20, 101], obliczony został – dla każdego przypadku propagacyjnego – kąt nadejścia fali radiowej do odbiornika względem osi głównego ciągu komunikacyjnego.

Przedmiotem badań jest modelowanie tłumienia propagacyjnego, zatem należało dla każdego badanego łącza radiowego obliczyć – przy pomocy (2.9) – wartość tego parametru, na podstawie mocy  $P_{OP}$  sygnału testowego na wejściu odbiornika pomiarowego (patrz rys. 2.1) oraz znanych wartości parametrów łącza pomiarowego.

Szerszego wyjaśnienia wymaga sposób obliczania długości trasy propagacyjnej na podstawie współrzędnych geograficznych stacji nadawczej i ruchomej stacji odbiorczej. Do tego celu skorzystano z pojęcia ortodromy, czyli najkrótszej odległości między dwoma punktami na powierzchni kuli [17]. Spośród dwóch metod obliczania długości ortodromy, zastosowano metodę analityczną, wykorzystującą tzw. wzór kosinusów [56]:

$$D[^\circ] = \arccos \left[ \sin \varphi_{SB} \cdot \sin \varphi_{SR} + \cos \varphi_{SB} \cdot \cos \varphi_{SR} \cdot \cos(\lambda_{SR} - \lambda_{SB}) \right], \quad (3.1)$$

gdzie:

- $D$  – długość ortodromiczna między pozycjami na kuli ziemskiej,
- $\varphi_{SB}$  – szerokość geograficzna miejsca instalacji anteny stacji bazowej,
- $\lambda_{SB}$  – długość geograficzna miejsca instalacji anteny stacji bazowej,
- $\varphi_{SR}$  – szerokość geograficzna miejsca aktualnego położenia anteny stacji ruchomej,
- $\lambda_{SR}$  – długość geograficzna miejsca aktualnego położenia anteny stacji ruchomej.

Aby wyrazić długość ortodromy w milach morskich [Mm] należy przeprowadzić następujące przekształcenie:

$$D[Mm] \cong 60 \cdot D[^\circ]. \quad (3.2)$$

Mając na uwadze fakt, że zgodnie z [77]:

$$1[Mm] = 1852[m], \quad (3.3)$$

można zapisać, co następuje:

$$D[m] = 111120 \cdot \left\{ \arccos \left[ \sin \varphi_{SB} \cdot \sin \varphi_{SR} + \cos \varphi_{SB} \cdot \cos \varphi_{SR} \cdot \cos(\lambda_{SR} - \lambda_{SB}) \right] \right\}. \quad (3.4)$$

Zależność (3.4) posłużyła do obliczania długości trasy propagacyjnej na podstawie współrzędnych geograficznych poszczególnych punktów pomiarowych oraz współrzędnych umiejscowienia anteny nadawczej.

### 3.2. Wielowymiarowa analiza regresji liniowej

Głównym celem przeprowadzonych badań było opracowanie nowego empirycznego modelu propagacyjnego przeznaczonego do szacowania wartości tłumienia fali radiowej w uprzemysłowionym środowisku propagacyjnym. Opracowany model – jak każdy inny model statystyczny – stanowi zapis formalny, który za pomocą określonego ukła-

du równań przedstawia zasadnicze powiązania występujące między zjawiskami masowymi mającymi miejsce w badanym środowisku [83, 93]. Powstał on w wyniku zastosowania wielowymiarowej (wielorakiej [83]) analizy regresji liniowej, która stosowana jest w statystyce do przewidywania jednej zmiennej na podstawie znajomości innych zmiennych [35]. Zmienna przewidywana nazywana jest zmienną zależną (objaśnianą), natomiast zmienne, które stanowią podstawę do przewidywań nazywane są zmiennymi niezależnymi (objaśniającymi) [83]. Znanych jest wiele pozycji literaturowych dotyczących swoim zakresem tej problematyki, z których – ze względu na tematykę niniejszej rozprawy – na szczególną uwagę zasługują [18, 70, 71, 74]. Bardziej ogólny opis zagadnienia regresji liniowej przedstawiony został m.in. w [28, 35, 36, 75, 83].

### **3.2.1. Procedura badania regresji**

Na podstawie przytoczonych powyżej opracowań opisano procedurę i metodykę badania regresji, która przebiega w pięciu etapach. Pierwszym z nich jest specyfikacja zmiennych, polegająca na przyporządkowaniu zmiennej objaśnianej zbioru zmiennych objaśniających, wraz z podaniem ich definicji, oraz na zgromadzeniu odpowiednich danych o realizacjach tych zmiennych.

Kolejnym etapem jest sformułowanie modelu, sprowadzające się do dobrania właściwej funkcji regresji. Jeżeli wybrano liniową funkcję regresji, to model regresji przyjmie postać addytywną. Jeżeli natomiast funkcja regresji jest nieliniowa, to model regresji przyjmuje postać multiplikatywną, przy czym należy podkreślić, że niektóre postaci takich modeli można transformować do postaci liniowej, dzięki zastosowaniu rachunku logarytmicznego [83], co też zostało zrobione podczas prac opisywanych w niniejszej rozprawie. Niezależnie od wybranego modelu traktować go należy jako hipotezę statystyczną, co wiąże się z koniecznością jej weryfikacji.

Trzeci etap – estymacja parametrów – polega na wyznaczeniu parametrów modelu przy użyciu metody najmniejszych kwadratów [29, 55]. Na tym etapie należy także wyznaczyć standardowy błąd oceny regresji, czyli odchylenie standardowe składnika resztowego [83], nazywane także błędem standardowym estymacji – *SEE* [70].

Po zakończeniu etapu estymacji parametrów modelu następuje etap weryfikacji modelu regresji, który oparty jest na weryfikacji określonych hipotez zerowych. Na tym etapie określone są właściwości diagnostyczne i predykcyjne zastosowanego modelu.

W ostatnim etapie należy wskazać możliwe zastosowania modelu regresji, w tym przede wszystkim jego przydatność dla założonych na początku celów oraz tzw. zakres stosowalności, czyli zakresy wartości zmiennych niezależnych, dla których stosowanie modelu jest właściwe.

### 3.2.2. *Przypadek regresji liniowej z jedną zmienną niezależną*

W pierwszej kolejności, bazując na [70], [71] i [83], przedstawiono podstawy analizy modelu regresji liniowej z jedną zmienną niezależną. Podstawowym składnikiem takiego modelu jest funkcja regresji, stanowiąca sformalizowany zapis sposobu przyporządkowania wartości zmiennej objaśniającej wartościom zmiennej objaśnianej. Postać analityczna tej funkcji określana jest na podstawie wiedzy teoretycznej o modelowanym zjawisku oraz wstępnych badań pilotażowych. Najczęściej stosowanym narzędziem do wyznaczania estymatorów parametrów strukturalnych danej funkcji regresji jest pojedyncza metoda najmniejszych kwadratów.

Z dwuwymiarowym modelem regresji linowej mamy do czynienia wtedy, gdy dla każdej ustalonej wartości zmiennej  $X$ , niebędącej zmienną losową, zmienna losowa  $Y$  ma warunkowy rozkład z wartością oczekiwaną, będącą liniową funkcją ustalonych wartości zmiennej  $X$ :

$$E(Y|X = x) = \beta_1 x + \beta_2 \quad (3.5)$$

oraz ze skończoną wariancją, niezależną od wartości zmiennej  $X$ :

$$D^2(Y|X = x) = \sigma^2. \quad (3.6)$$

W opisywanym modelu  $\beta_1$  i  $\beta_2$  są wspomnianymi powyżej parametrami strukturalnymi funkcji regresji  $Y$  od  $X$ , natomiast  $\sigma^2$  jest parametrem stochastycznym tej regresji.

W przypadku, gdy podstawę do estymacji parametrów badanej zależności stanowi  $n$ -elementowa próba z populacji dwuwymiarowej, złożonej z ciągu par  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ , ...,  $(x_n, y_n)$ , to kształtowanie się wartości (realizacji)  $y_i$  w próbie losowej można wyjaśnić przy pomocy empirycznego odpowiednika modelu teoretycznego, co można zapisać następująco:

$$y_i = E(Y|X = x_i) + \varepsilon_i = \beta_1 x_i + \beta_2 + \varepsilon_i, \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.7)$$



gdzie  $\varepsilon_i$  stanowi składnik losowy modelu, przy czym jego rozkład nie jest *ex ante* znany, choć wiadomo, że:

$$E(\varepsilon_i) = 0, \quad (3.8)$$

$$D^2(\varepsilon_i) = E(\varepsilon_i^2) = \sigma^2, \quad (3.9)$$

$$\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = E(\varepsilon_i \varepsilon_j) = 0 \quad \text{dla } i \neq j. \quad (3.10)$$

Należy podkreślić, że składnik losowy reprezentuje oddziaływanie na zmienną zależną tych czynników, które nie zostały uwzględnione w modelu jako zmienne niezależne [75].

Równanie (3.7) wraz z założeniami (3.8), (3.9) i (3.10) stanowi alternatywny sposób sformułowania modelu regresji liniowej, wyrażonego zależnościami (3.5) i (3.6) i nazywanego klasycznym modelem regresji liniowej  $Y$  względem  $X$ . Stwierdzenie takie jest prawdziwe, ponieważ mając na względzie założenie (3.8) oraz fakt, że wartości zmiennej  $X$  są nielosowe, możemy zapisać:

$$E(y_i) = E(\beta_1 x_i + \beta_2 + \varepsilon_i) = \beta_1 x_i + \beta_2 + E(\varepsilon_i) = \beta_1 x_i + \beta_2. \quad (3.11)$$

Z kolei z warunku (3.9) wynika skończoność wariancji zmiennej losowej  $Y$  oraz brak uzależnienia wartości tej wariancji od wartości zmiennej  $X$ , co można zapisać następująco:

$$D^2(y_i) = E[y_i - E(y_i)]^2 = E[y_i - (\beta_1 x_i + \beta_2)]^2 = E(\varepsilon_i^2) = \sigma^2. \quad (3.12)$$

Natomiast z założenia (3.10) wynika stochastyczna niezależność składników losowych [83].

Wracając do modelu regresji linowej, wyrażonego przy pomocy (3.7), należy zauważyć, że wartość zmiennej objaśnianej  $y_i$  można podzielić na dwie różne części, mianowicie:

- $\beta_1 x_i + \beta_2$  – warunkowa wartość oczekiwana zmiennej objaśnianej, określająca wpływ zmiennej objaśniającej  $X$ ,
- $\varepsilon_i$  – składnik resztowy, zwany także składnikiem losowym modelu, określającym losowe odchylenia wartości  $y_i$  od  $E(Y/X=x_i)$ , w których wyraża się łączny wpływ wszystkich innych – poza zmienną  $X$  – czynników oddziałujących na zmienną  $Y$ .

Do estymacji parametrów klasycznego modelu regresji liniowej stosuje się najczęściej wspomnianą już metodę najmniejszych kwadratów. Uzyskiwanie estymatorów parametrów strukturalnych funkcji regresji  $Y$  od  $X$  przy pomocy tej metody oparte jest na funkcji stanowiącej jednocześnie kryterium tej metody i wyrażonej w następujący sposób:

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_1 x_i - \beta_2)^2 = \min. \quad (3.13)$$

Minimalizacja funkcji-kryterium (3.13) wymaga obliczenia dwóch pochodnych cząstkowych (względem  $\beta_1$  oraz względem  $\beta_2$ ) i ich przyrównania do zera, tzn.:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_1} = 0 \quad (3.14)$$

oraz

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_2} = 0, \quad (3.15)$$

przy czym pochodne cząstkowe (3.14) i (3.15) wyrażone są jako:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \beta_1 x_i - \beta_2) \quad (3.16)$$

oraz:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_2} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_1 x_i - \beta_2). \quad (3.17)$$

Po odpowiednich przekształceniach arytmetycznych pochodnych cząstkowych (3.16) i (3.17), które zostały przyrównane do zera, oraz po zastąpieniu parametrów strukturalnych modelu  $\beta_1$  i  $\beta_2$  ich estymatorami – odpowiednio  $\hat{\beta}_1$  i  $\hat{\beta}_2$ , otrzymujemy układ dwóch równań z dwoma niewiadomymi, zwany układem równań normalnych liniowej funkcji regresji, tzn.:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i y_i = \hat{\beta}_1 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + \hat{\beta}_2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \\ \sum_{i=1}^n y_i = \hat{\beta}_1 \cdot \sum_{i=1}^n x_i + n \hat{\beta}_2, \end{cases} \quad (3.18)$$

spełniony dla wszystkich  $x_i$ , gdzie  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Rozwiązując powyższy układ równań otrzymujemy wyrażenia na estymatory  $\hat{\beta}_1$  i  $\hat{\beta}_2$ , uzyskane w drodze zastosowania pojedynczej metody najmniejszych kwadratów, tzn.:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.19)$$

oraz:

$$\hat{\beta}_2 = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i - \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i \right) = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x}, \quad (3.20)$$

gdzie  $\bar{x}$  stanowi wartość średnią zmiennej objaśniającej, natomiast  $\bar{y}$  oznacza wartość średnią zmiennej objaśnianej, obliczoną z próby.

Estymator  $\hat{\beta}_1$  w statystyce jest określany jako współczynnik regresji liniowej ( $Y$  od  $X$ ), przy czym jego wartość liczbowa odpowiada na pytanie, jaki jest przeciętny przyrost wartości zmiennej zależnej na jednostkę przyrostu wartości zmiennej niezależnej. Z kolei estymator  $\hat{\beta}_2$  jest wyrazem wolnym liniowej funkcji regresji  $Y$  od  $X$  i merytorycznie nie jest interpretowana jego wartość liczbowa. W obu przypadkach estymatory  $\hat{\beta}_1$  oraz  $\hat{\beta}_2$  są nieobciążone względem parametrów  $\beta_1$  oraz  $\beta_2$ , tzn. mają miejsce następujące zależności:

$$E(\hat{\beta}_1) = \beta_1 \quad (3.21)$$

oraz

$$E(\hat{\beta}_2) = \beta_2. \quad (3.22)$$

Z powyższego wynika, że estymatory  $\hat{\beta}_1$  oraz  $\hat{\beta}_2$  są zmiennymi losowymi, których rozkłady, przy warunku  $n \rightarrow \infty$ , są asymptotycznie normalne z parametrami:

$$\hat{\beta}_1 \rightarrow N_{asympt.} \left[ \beta_1, D(\hat{\beta}_1) \right] \quad (3.23)$$

oraz

$$\hat{\beta}_2 \rightarrow N_{\text{asympt.}} \left[ \beta_2, D(\hat{\beta}_2) \right], \quad (3.24)$$

gdzie  $D(\hat{\beta}_1)$  i  $D(\hat{\beta}_2)$  są odchyleniami standardowymi estymatorów  $\hat{\beta}_1$  oraz  $\hat{\beta}_2$ , czyli – inaczej – średnimi błędami oceny parametrów  $\beta_1$  oraz  $\beta_2$ . Jeżeli zatem zmienna losowa  $XY$  ma rozkład normalny, to regresja  $Y$  względem  $X$  jest wtedy liniowa, a stąd odchylenia standardowe  $D(\hat{\beta}_1)$  i  $D(\hat{\beta}_2)$  można wyrazić następująco:

$$D(\hat{\beta}_1) = \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (3.25)$$

oraz

$$D(\hat{\beta}_2) = \sqrt{\frac{\sigma^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (3.26)$$

Wartości liczbowe odchylen standardowych estymatorów  $\hat{\beta}_1$  oraz  $\hat{\beta}_2$  odpowiadają na pytanie, jaki jest średni błąd losowy oszacowania parametrów  $\beta_1$  oraz  $\beta_2$ , definiowanych jako (3.19) i (3.20), stąd też często noszą one nazwę standardowych błędów ocen parametrów  $\beta_1$  oraz  $\beta_2$ .

Podsumowując, liniową funkcję regresji z jedną zmienną niezależną wyznaczoną z próby losowej dla danych wartości  $X$  zapisujemy jako:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_2, \quad (3.27)$$

gdzie  $\hat{y}_i$  nazywamy teoretycznymi wartościami zmiennej losowej  $Y$ , wyznaczanymi z próby. Z kolei reszty modelu, będące zmiennymi losowymi, wyznacza się następująco:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i. \quad (3.28)$$

W równaniach (3.25) i (3.26) nieznana jest wariancja składników losowych  $\sigma^2$ , charakteryzująca wielkość losowego rozrzutu wartości zmiennej losowej  $Y$  wokół prostej regresji. Podstawą estymacji składników losowych  $\sigma^2$  w klasycznym modelu regresji liniowej są reszty modelu  $e_i$ , wyrażone poprzez (3.28).

Wartość oczekiwana sumy kwadratów reszt dla wszystkich obserwacji próby, w klasycznym modelu regresji liniowej z jedną zmienną niezależną, jest równa:

$$E\left(\sum_{i=0}^n e_i^2\right) = \sigma^2 (n-2). \quad (3.29)$$

Mając powyższe na względzie można wyznaczyć nieobciążony estymator wariancji składników losowych, który dla rozważanego przypadku przyjmuje postać:

$$s_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n-2}. \quad (3.30)$$

Pierwiastek z rzeczzonego nieobciążonego estymatora  $\sigma^2$  nazywany jest błędem standardowym estymacji i wyrażany jest w sposób następujący:

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n-2}}. \quad (3.31)$$

Wyrażony poprzez (3.30) estymator wariancji reszt można zastosować do estymacji odchyłeń standardowych  $D(\hat{\beta}_1)$  i  $D(\hat{\beta}_2)$  estymatorów  $\hat{\beta}_1$  oraz  $\hat{\beta}_2$ , czyli do estymacji standardowych błędów  $s_{\hat{\beta}_1}$  oraz  $s_{\hat{\beta}_2}$  ocen estymatorów współczynników regresji  $\hat{\beta}_1$  i  $\hat{\beta}_2$ :

$$s_{\hat{\beta}_1} = \sqrt{\frac{s_e^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (3.32)$$

oraz

$$s_{\hat{\beta}_2} = \sqrt{\frac{s_e^2 \sum_{i=0}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (3.33)$$

### 3.2.3. Model wielorakiej regresji liniowej

Założenie z podrozdziału 3.2.1., że zmienna objaśniana jest uzależniona tylko od jednej zmiennej objaśniającej jest dużym uproszczeniem, pozwalającym na przedstawienie sposobu wyznaczania współczynników regresji w przejrzysty sposób. W rzeczywistych przypadkach często zdarza się, że badane zjawisko zależy od wielu, a nie tylko od jednego czynnika. Uogólnieniem prostej regresji jest regresja wieloraka, zwana także wielokrotną, w której właśnie uwzględniany jest wpływ wielu cech niezależnych na wybraną cechę zależną [36, 85].

W dalszej części założono, że rozważana jest zmienna losowa  $(k+1)$ -wymiarowa, zapisywana następująco:  $(Y, X_1, X_2, \dots, X_k)$ , gdzie  $Y$  stanowi wektor obserwacji dla zmiennej losowej objaśnianej, natomiast  $X_1, X_2, \dots, X_k$  są to wektory obserwacji dla zmiennych losowych objaśniających, których liczba jest równa  $k$ . Dla opisu zależności wyżej wymienionych zmiennych właściwy jest klasyczny model regresji liniowej, przy założeniu, że dla każdego układu wartości (realizacji)  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , warunkowe rozkłady zmiennej  $Y$  mają średnie wyrażone w sposób następujący:

$$E(Y|x_1, x_2, \dots, x_k) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \beta_{k+1}, \quad (3.34)$$

gdzie:

- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  to tzw. współczynniki regresji cząstkowej  $Y$  względem wyróżnionej zmiennej objaśniającej,
- $\beta_{k+1}$  to parametr charakteryzujący wyraz wolny funkcji regresji wielorakiej,

a ich wariancje wyrażają się jak poniżej:

$$D^2(Y|x_1, x_2, \dots, x_k) = \sigma^2. \quad (3.35)$$

Obserwacje zmiennej objaśnianej  $Y$  wykonywane są przy ustalonych wartościach zmiennych objaśniających  $X$  co oznacza, że próba losowa – stanowiąca podstawę sformułowania i oszacowania modelu – określona jest przez liczebność próby ( $n$ ) łącznych obserwacji o postaci  $(Y_i, x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$ , gdzie  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . Przez analogię do (3.7) modelu liniowej regresji wielorakiej można zapisać następująco:

$$Y_i = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \beta_{k+1} + \varepsilon_i, \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.36)$$

gdzie  $\varepsilon_i$  stanowi składnik losowy modelu, spełniający założenia analogiczne do (3.8), (3.9) i (3.10). Model (3.36) można zapisać w postaci macierzowej [74], mianowicie:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3.37)$$

gdzie:

- $\mathbf{Y}$  – wektor o wymiarze  $n \times 1$ , zawierający obserwacje zmiennej zależnej,
- $\mathbf{X}$  – macierz o wymiarze  $n \times (k+1)$ , zawierająca obserwacje zmiennych niezależnych,
- $\boldsymbol{\beta}$  – wektor o wymiarze  $(k+1) \times 1$ , zawierający współczynniki regresji,
- $\boldsymbol{\varepsilon}$  – wektor o wymiarze  $n \times 1$ , zawierający składniki losowe regresji.

Równanie macierzowe (3.37) można także zapisać w postaci rozwiniętej:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{1k} & 1 \\ x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{2k} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{nk} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_{k+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}. \quad (3.38)$$

Założenia modelu wielokrotnej regresji liniowej przyjmują poniższą postać macierzową:

$$E\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{0}, \quad (3.39)$$

gdzie  $\mathbf{0}$  jest wektorem zerowym o wymiarze  $n \times 1$ , oraz:

$$E\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}^T = \sigma^2 \mathbf{I}_n, \quad (3.40)$$

gdzie  $\mathbf{I}_n$  jest macierzą jednostkową stopnia  $n$ .

Z określenia macierzy  $E\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}^T$ , nazywanej macierzą kowariancji wynika, że element stojący na przecięciu  $k$ -tego wiersza i  $l$ -tej kolumny jest równy  $E\varepsilon_k\varepsilon_l$ , czyli stanowi on kowariancję składników losowych  $\varepsilon_k$  i  $\varepsilon_l$ . Z kolei dla  $k=l$ , czyli na przekątnej omawianej macierzy mamy  $E\varepsilon_k^2$ , co stanowi wariancję składników losowych.

Należy mieć na względzie, że macierz  $\mathbf{X}$ , nazywana macierzą planu, jest macierzą o ustalonych elementach, niebędących zmiennymi losowymi, natomiast jej rząd wynosi  $k+1$ , przy czym liczba obserwacji  $n$  musi być co najmniej równa  $k+1$ , co może być zapisane:

$$r(\mathbf{X}) = k + 1 \leq n. \quad (3.41)$$

Z (3.41) wynika, że do estymacji parametrów modelu potrzebna jest liczba obserwacji większa o co najmniej 1 od liczby zmiennych objaśniających modelu.

Funkcja (3.13) stanowiąca kryterium metody najmniejszych kwadratów i podlegające w tej metodzie minimalizacji, w zapisie macierzowym przyjmuje postać:

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})^T (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}). \quad (3.42)$$

Różniczkując  $\mathbf{S}$  względem wektora  $\boldsymbol{\beta}$ , otrzymuje się wektor:

$$\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \boldsymbol{\beta}} = -2\mathbf{X}^T \mathbf{Y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}, \quad (3.43)$$

którego przyrównanie do  $\mathbf{0}$  prowadzi do układu równań normalnych:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y}, \quad (3.44)$$

którego postać rozwinięta jest następująca:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} & \cdot & \cdot & \cdot & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} & \sum_{i=1}^n x_{i1} \\ \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2}^2 & \cdot & \cdot & \cdot & \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{ik} & \sum_{i=1}^n x_{i2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2} & \cdot & \cdot & \cdot & \sum_{i=1}^n x_{ik} & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{\beta}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_{i1}Y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{i2}Y_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \sum_{i=1}^n Y_i \end{bmatrix}. \quad (3.45)$$

Mnożąc lewostronnie równanie (3.44) przez  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ , otrzymujemy rozwiązanie tegoż układu równań [70, 71, 75]:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}, \quad (3.46)$$

czyli wektor estymatorów współczynników regresji.



Uzyskanie jednoznacznego rozwiązania układu równań normalnych wymaga, aby macierz  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})$  była nieosobliwa, stąd warunek (3.41) staje się oczywisty [70].

Uwzględniając wektor  $\hat{\boldsymbol{\beta}}$  określony równaniem (3.46) można wyznaczyć teoretyczne wartości zmiennej losowej  $\mathbf{Y}$ , korzystając z analogicznego do (3.27) wzoru:

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}}, \quad (3.47)$$

oraz przez analogię do (3.28) można przedstawić wektor reszt w zapisie macierzowym:

$$\mathbf{e} = \mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}. \quad (3.48)$$

Suma kwadratów reszt ma w ogólnym przypadku następującą wartość oczekiwaną:

$$E\mathbf{e}^T \mathbf{e} = \sigma^2 (n - k - 1), \quad (3.49)$$

na podstawie czego możliwe jest uzyskanie wyrażenia na nieobciążony estymator parametru  $\sigma^2$ :

$$s_e^2 = \frac{\mathbf{e}^T \mathbf{e}}{n - k - 1}. \quad (3.50)$$

Macierz kowariancji wektora estymatorów  $\hat{\boldsymbol{\beta}}$  określona jest wzorem:

$$\mathbf{V}(\hat{\boldsymbol{\beta}}) = \sigma^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}, \quad (3.51)$$

natomiast jej estymator wyznacza się ze wzoru:

$$\hat{\mathbf{V}}(\hat{\boldsymbol{\beta}}) = s_e^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}. \quad (3.52)$$

Warty podkreślenia jest fakt, że elementy stojące na głównej przekątnej macierzy  $\hat{\mathbf{V}}(\hat{\boldsymbol{\beta}})$  są ocenami wariancji estymatorów  $\hat{\beta}_j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, k+1$ ). W szczególności standardowy błąd oceny parametru  $\beta_j$  można wyrazić w sposób następujący:

$$\mathbf{s}_{\hat{\beta}_j} = s_e \sqrt{d_{jj}}, \quad (3.53)$$

gdzie  $d_{jj}$  jest  $j$ -tym diagonalnym elementem macierzy  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ .

### 3.3. Metody statystycznej oceny wyników badań eksperymentalnych

W pracy zastosowano szereg metod oceny statystycznej wyników badań pomiarowych od badania istotności różnicy pomiędzy dwiema próbkami wykonanymi w odmiennych warunkach począwszy, poprzez badanie istotności współczynników regresji liniowej, ocenę istotności modelu regresji, aż do badania przystawalności wyników eksperymentalnych do danego modelu. W niniejszym rozdziale scharakteryzowano te metody.

#### 3.3.1. Badanie istotności różnicy pomiędzy dwiema próbkami

W praktyce często zachodzi konieczność sprawdzania istotności różnic występujących pomiędzy średnimi, które obliczono na podstawie podzbiorów danej próby lub na podstawie prób dokonanych w odmiennych warunkach [75].

W kontekście niniejszej rozprawy zbadać należy różnice średnich wartości tłumienia obliczonych na podstawie prób uzyskanych w różnych obszarach terminalu kontenerowego, mianowicie czy różnice te spowodowane są losowym charakterem prób, czy też faktem, że warunki propagacyjne w poszczególnych obszarach istotnie różnią się między sobą. W celu wykonania tego badania stawiana jest hipoteza zerowa:

$$H_0 : \bar{x}_{p1} - \bar{x}_{p2} = 0, \quad (3.54)$$

wobec dwustronnej hipotezy alternatywnej:

$$H_1 : \bar{x}_{p1} - \bar{x}_{p2} \neq 0, \quad (3.55)$$

gdzie:

- $\bar{x}_{p1}, \bar{x}_{p2}$  – wartości średnie obliczone na podstawie porównywanych prób.

Testem istotności weryfikującym powyższą hipotezę zerową jest statystyka  $Z$ , której wartość oblicza się w sposób następujący [75]:

$$Z = \frac{\bar{x}_{p1} - \bar{x}_{p2}}{\sqrt{\frac{S_{\bar{x}_{p1}}^2}{n_{p1} - 1} + \frac{S_{\bar{x}_{p2}}^2}{n_{p2} - 1}}}, \quad (3.56)$$

gdzie:

- $S_{\bar{x}_{p1}}^2, S_{\bar{x}_{p2}}^2$  – wariancje obliczone na podstawie porównywanych prób,
- $n_{p1}, n_{p2}$  – liczebności porównywanych prób,

przy czym statystyka ta dla dużych liczebności prób ma rozkład normalny  $N(0,1)$  [112], a wartość krytyczna testu na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  (95% współczynnik ufności), wynosi  $Z_\alpha = 1,96$ .

Przy takich założeniach hipoteza zerowa  $H_0$  jest przyjmowana, gdy  $|Z| < Z_\alpha$ . Z kolei dla przypadku  $|Z| \geq Z_\alpha$  hipoteza zerowa jest odrzucana na korzyść hipotezy alternatywnej  $H_1$ , dowodzącej istotności różnic między wartościami średnimi z porównywanych prób.

### 3.3.2. Badanie istotności regresji liniowej i jej współczynników

Na podstawie wcześniejszych rozważań wiadomym jest, że estymatorem  $i$ -tego współczynnika  $\beta_i$  liniowej funkcji regresji  $Y$  od  $X$  jest estymator  $\hat{\beta}_i$ . Podczas określania modelu regresji ważnym jest określenie statystycznej istotności poszczególnych współczynników modelu, co sprowadza się do sprawdzenia (przy założonym poziomie istotności  $\alpha$ ), który współczynnik istotnie różni się od zera, a który można pominąć. W tym celu formułuje się następującą hipotezę zerową:

$$H_0 : \hat{\beta}_i = 0, \quad (3.57)$$

wobec dwustronnej hipotezy alternatywnej:

$$H_0 : \hat{\beta}_i \neq 0. \quad (3.58)$$

Testem istotności weryfikującym hipotezę zerową (3.57) jest statystyka  $t$  o wzorze:

$$t = \frac{\hat{\beta}_i}{s_{\hat{\beta}_i}}, \quad (3.59)$$

przy czym statystyka ta ma rozkład  $t$ -Studenta [13] określony całkowicie przez  $n-k-1$  stopni swobody. Dla porządku przypomnieć należy, że  $n$  oznacza liczebność próby, a  $k$  liczbę zmiennych objaśniających modelu regresji.

Mając na względzie, że w każdym analizowanym w niniejszej rozprawie przypadku  $(n-k-1) \gg 500$ , można uznać, że  $(n-k-1) \rightarrow \infty$ , a to pozwala odczytać z tablic statystycznych [112] wartość krytyczną  $t_\alpha$  dla rzeczonoego testu na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ , która wynosi 1,96.

Przy takich założeniach hipoteza zerowa  $H_0$  jest przyjmowana, gdy  $|t| < t_\alpha$ . Z kolei dla przypadku  $|t| \geq t_\alpha$  hipoteza zerowa jest odrzucana na korzyść hipotezy alterna-

tywnej  $H_1$ , dowodzącej istotności statystycznej  $i$ -tego współczynnika analizowanego modelu regresji.

Jako parametr oceny istotności regresji stosowany jest stosunek oszacowania wariancji modelu ( $MS_M$ ) do zmienności reprezentowanej wariancją błędów ( $MS_E$ ), co można zapisać następująco [32]:

$$F = \frac{MS_M}{MS_E} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \cdot \frac{n-k-1}{k}, \quad (3.60)$$

gdzie:

- $\hat{y}_i$  –  $i$ -ta wartość zmiennej objaśnianej, oszacowana na podstawie przyjętego modelu regresji,
- $y_i$  – pomierzona  $i$ -ta realizacja (obserwacja) zmiennej objaśnianej,
- $\bar{y}$  – wartość średnia zmiennej objaśnianej, obliczona z próby,
- $n$  – liczebność próby (liczba pomierzonych realizacji zmiennej objaśnianej),
- $k$  – liczba zmiennych objaśniających przyjętego modelu.

Statystyka ta ma rozkład  $F$ -Snedecora [13] o  $k$  i  $n-k-1$  stopniach swobody odpowiednio dla licznika i mianownika. Biorąc pod uwagę fakt, że w każdym analizowanym w niniejszej rozprawie przypadku  $(n-k-1) \gg 1000$ , można uznać, że  $(n-k-1) \rightarrow \infty$ , a to pozwala na podstawie [112] stabelaryzować (patrz tab. 3.1) wartości krytyczne  $F_\alpha$  dla rzezonego rozkładu na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ , w zależności od liczby  $k$  zmiennych objaśniających modelu.

Tab. 3.1. Wartości krytyczne  $F_\alpha$  rozkładu  $F$ -Snedecora dla  $\alpha = 0,05$  i  $(n-k-1) \rightarrow \infty$

$k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
$F_\alpha$	3,84	3,04	2,6	2,37	2,21	2,14	2,06	1,94	1,88	1,83	1,75	1,69	1,64	1,6	1,57

Im większa jest wartość  $F$  statystyki testowej, tym istotność przyjętego modelu regresji jest wyższa. Prowadzenie analizy regresji ma uzasadnienie jedynie wtedy, gdy jest ona istotna w podanym tutaj sensie [32], tzn. gdy  $|F| \geq F_\alpha$ .

### 3.3.3. Badanie przystawalności wyników eksperymentalnych do modelu

Po wyznaczeniu określonego równaniem (3.46) wektora  $\hat{\beta}$  współczynników regresji należy odpowiedzieć na pytanie, jak dokładnie przyjęty model opisuje wyniki obserwacji i analizowany obiekt badań. Naturalną miarą jakości dopasowania modelu jest rozrzut otrzymywanych wyników wokół regresji, określane jako tzw. średni kwadratowy błąd estymacji –  $MS_E$  – wyrażony w sposób następujący [32]:

$$MS_E = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k - 1}. \quad (3.61)$$

Z powyższym błędem związany jest tzw. błąd standardowy estymacji –  $SEE$  (ang. *Standard Error of Estimate*), który przy założeniu, że  $n - 1 \gg k$  (co w opisywanych badaniach jest spełnione) można zapisać w postaci nieuwzględniającej liczby zmiennych objaśniających [70]:

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1}}. \quad (3.62)$$

Błąd standardowy estymacji stanowi ogólną miarę dokładności estymacji rzeczywistej zależności przyjętym modelem poprzez określenie odchylenia standardowego rozproszenia wszystkich punktów wokół regresji. Błąd ten jest także miarą dokładności przewidywania na podstawie wyznaczonego równania regresji.

Kolejnym parametrem często stosowanym do oceny stopnia rozproszenia wyników wokół funkcji regresji jest tzw. błąd średni –  $ME$  (ang. *Mean Error*), obliczany jako średnia wartość reszt, co można zapisać w sposób następujący:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n}. \quad (3.63)$$

Wartość  $ME$  określa liczbowo średni błąd, jakiego należy się spodziewać przy przewidywaniu zachowania się modelu w dalszych badaniach [32]. Jeżeli jest on równy zero, to oznacza, że średnia wartość pomierzonej zmiennej objaśnianej jest równa średniej wartości tej zmiennej oszacowanej przy zastosowaniu przyjętego modelu [70, 72]. Zarówno błąd średni  $ME$ , jak i standardowy błąd estymacji  $SEE$  są powszechnie stosowane do weryfikacji przystawania modeli do danych empirycznych [15, 59, 60].

Znane są także opisowe miary wyjaśnionej (zdeterminowanej) i niewyjaśnionej (niezdeterminowanej) zmienności  $Y$  poprzez zmienność  $X$ . Miarami tymi są współczynnik indeterminacji ( $\varphi^2$ ) i determinacji ( $R^2$ ) linowej, wyrażone w sposób następujący [83]:

$$\varphi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.64)$$

oraz

$$R^2 = 1 - \varphi^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (3.65)$$

Współczynniki (3.64) i (3.65) charakteryzują liczbowo, jaka część zmienności cechy zależnej została wyjaśniona zmiennością cech niezależnych, o czym informuje  $R^2$ , oraz jaka część zmienności cechy zależnej ma swoje źródło w działaniu innych przyczyn, o czym informuje  $\varphi^2$  [83].

Z powyższego wynika, że im współczynnik determinacji bliższy jest jedności, tym model lepiej objaśnia zmienność cechy zależnej. Należy jednak pamiętać, że dołączanie nowych zmiennych niezależnych do istniejącego modelu zawsze powoduje zwiększenie współczynnika determinacji, jednakże nie pozostaje to bez skutku dla rzetelności oceny przyjętego modelu. Dlatego w praktyce stosuje się tzw. poprawiony współczynnik determinacji ( $R_{popr}^2$ ), uogólniający uzyskane wyniki na populację [36] i wyrażony w sposób następujący:

$$R_{popr}^2 = R^2 - \frac{k}{n-k-1}(1-R^2). \quad (3.66)$$

Tak określony poprawiony współczynnik determinacji rośnie wraz z dodawaniem kolejnych zmiennych niezależnych tylko wtedy, gdy poprawiają one dopasowanie modelu. Ponadto  $R_{popr}^2$  niesie ze sobą informację o dopasowaniu przyjętego równania regresji do innej próby z tej samej populacji.

Należy podkreślić, że do pozytywnego zweryfikowania modelu regresji, poprawiony współczynnik determinacji musi być większy od 0,6 [36].

## ***Rozdział 4.***

### ***Analiza przydatności znanych modeli propagacyjnych***

Dotychczas opracowanych zostało wiele modeli propagacyjnych, ale żaden z nich nie jest przeznaczony do analizowanego w rozprawie środowiska propagacyjnego. I tak, znany jest model dedykowany terminalowi kontenerowemu, szeroko opisany w [9, 67, 70], jednakże został on opracowany z myślą o projektowaniu systemów dostępowych do zastosowań specjalnych, m.in. systemu monitoringu ładunków kontenerowych [63, 65, 68]. Pozostałe – wspomniane już w rozdziale 1.1. – modele dla terenów uprzemysłowionych dotyczą środowisk wewnątrzbudynkowych, przez co ich zastosowanie do modelowania tłumienia propagacyjnego w rozważanym środowisku jest niemożliwe.

Wiadomym jest, że obecnie w praktyce inżynierskiej stosowane są modele przeznaczone do szacowania tłumienia propagacyjnego w środowiskach miejskich, m.in. model Walfischa-Ikegami, który zastosowano podczas projektowania systemu trunkingowego TetraFlex pracującego na obszarze terminalu kontenerowego GTC w Gdyni [86].

W świetle powyższego przed przystąpieniem do prac nad nowym modelem tłumienia propagacyjnego należało przeprowadzić analizę przydatności istniejących modeli do projektowania ruchomych łącz radiowych, pracujących w środowisku uprzemysłowionym, którego przykładem jest terminal kontenerowy.

W pierwszej części rozdziału scharakteryzowano wybrane modele propagacyjne, które mogłyby być lub są stosowane do projektowania ruchomych systemów radiowych w badanym środowisku. Są to: model dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym, model COST 231 Walfischa-Ikegami oraz modele zalecane przez ITU-R w rekomendacji P.1411.

Następnie wybrane modele zostały przeanalizowane pod względem ich przydatności do wyżej wspomnianych celów. Analiza ta oparta jest na porównaniu ich przystawalności do zgromadzonych podczas badań danych o tłumieniu propagacyjnym w terminalu kontenerowym.

W trzeciej, ostatniej części rozdziału wybrane modele zostały zmodyfikowane w sposób poprawiający dokładność szacowania tłumienia propagacyjnego w łączach radiowych systemów ruchomych pracujących w środowisku terminalu kontenerowego.

## 4.1. Charakterystyka wybranych znanych modeli propagacyjnych

Podrozdział zawiera opis modelu tłumienia propagacyjnego przeznaczonego do projektowania systemów dostępowych pracujących w środowisku terminalu kontenerowego. Ponadto scharakteryzowane zostały wybrane modele przeznaczone do projektowania ruchomych systemów radiowych w środowisku miejskim.

### 4.1.1. Model dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym

Model dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym, który szczegółowo opisany został w [9, 67, 70], stanowi rozwiązanie problemu wyznaczenia tłumienia propagacyjnego w łączach radiowych szczególnego przypadku systemu dostępowego, jakim jest sieć monitoringu stanu wnętrza kontenerów [63, 68], pracująca w ramach systemu monitorowania ładunków kontenerowych [62, 63, 64]. System taki pracuje w warunkach typowego terminalu kontenerowego, który – jak już wspomniano – ma strukturę ustawienia kontenerów podobną do zabudowy środowiska miejskiego.

W opisywanym modelu tłumienie  $L$  [dB] sygnału radiowego uzależniono od następujących czynników:

- długości  $d$  [km] trasy propagacyjnej ponad stosami kontenerów,
- częstotliwości  $f$  [MHz] sygnału radiowego,
- rodzaju trasy propagacyjnej: LOS (ang. *Line of Sight*) lub NLOS (ang. *Non Line of Sight*),
- wysokości  $h_{SB}$  [m] zawieszenia anteny stacji bazowej,
- średniej wysokości  $h_{sr}$  [m] stosów kontenerów na terenie terminalu,
- różnicy dwóch wyżej wymienionych wysokości, tj.:  $(h_{SB} - h_{sr})$  [m] lub  $(h_{sr} - h_{SB})$  [m].



Ponadto w modelu wyszczególniono cztery charakterystyczne sytuacje propagacyjne:

- LOS1 – kiedy pomiędzy antenami łącza radiowego ma miejsce bezpośrednia widoczność, a antena stacji bazowej znajduje się powyżej średniej wysokości stosów kontenerów, czyli gdy  $h_{SB} \geq h_{sr}$ ,
- LOS2 – sytuacja podobna do LOS1, z tą różnicą, że antena stacji bazowej zawieszona jest poniżej średniej wysokości stosów kontenerów, tzn.  $h_{SB} < h_{sr}$ ,
- NLOS1 – kiedy pomiędzy antenami łącza radiowego brak jest bezpośredniej widoczności, a antena stacji bazowej znajduje się powyżej średniej wysokości stosów kontenerów, czyli gdy  $h_{SB} \geq h_{sr}$ ,
- NLOS2 – sytuacja podobna do NLOS1, z tą różnicą, że antena stacji bazowej zawieszona jest poniżej średniej wysokości stosów kontenerów, tzn.  $h_{SB} < h_{sr}$ .

W takich warunkach tłumienie propagacyjne można wyznaczać stosując następujące zależności:

$$L[dB] = \begin{cases} L_{LOS1} & \text{dla } LOS \cap h_{SB} \geq h_{sr}, \\ L_{LOS2} & \text{dla } LOS \cap h_{SB} < h_{sr}, \\ L_{NLOS1} & \text{dla } NLOS \cap h_{SB} \geq h_{sr}, \\ L_{NLOS2} & \text{dla } NLOS \cap h_{SB} < h_{sr}, \end{cases} \quad (4.1)$$

gdzie:

$$L_{LOS1}[dB] = 55,2 + 20 \log f [MHz] + 5,8 \log d [km] - 22,1 \log (h_{SB} [m] - h_{sr} [m]), \quad (4.2)$$

$$L_{LOS2}[dB] = 41,9 + 20 \log f [MHz] + 25,9 \log d [km] + 4,2 \log (h_{sr} [m] - h_{SB} [m]), \quad (4.3)$$

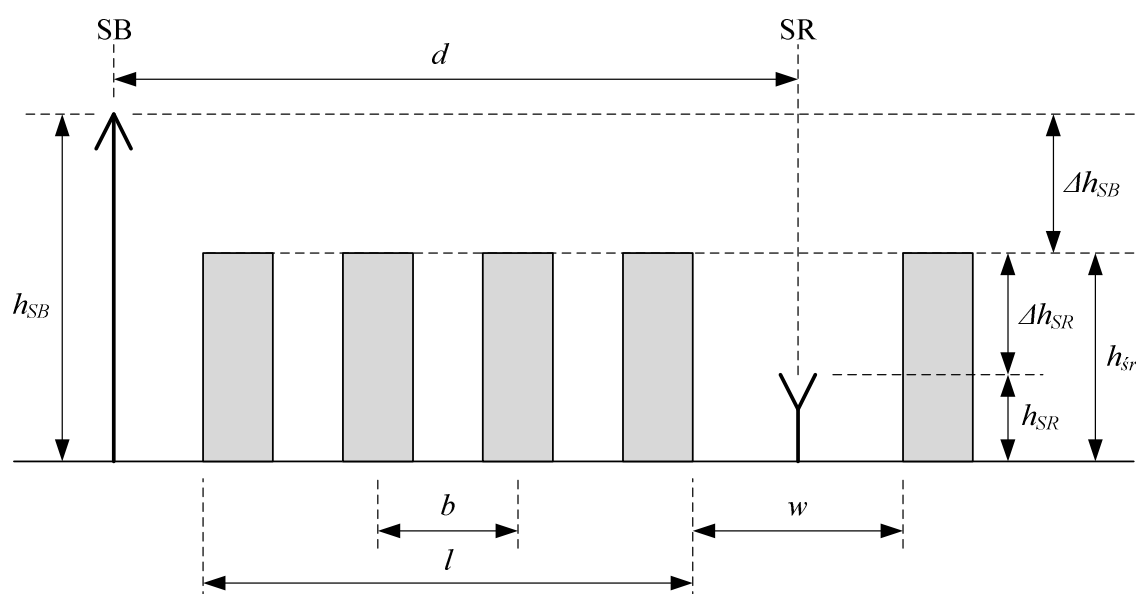
$$L_{NLOS1}[dB] = 32,6 + 20 \log f [MHz] + 7,9 \log d [km] + 0,8 \log (h_{SB} [m] - h_{sr} [m]), \quad (4.4)$$

$$L_{NLOS2}[dB] = 38,6 + 20 \log f [MHz] + 13 \log d [km] + 5,9 \log (h_{sr} [m] - h_{SB} [m]). \quad (4.5)$$

Powyższy model jest modelem empirycznym opracowanym na podstawie około pięciu tysięcy wyników pomiarów wartości tłumienia pomierzonego w paśmie od 500 MHz do 4 GHz, w różnych warunkach atmosferycznych [100].

#### 4.1.2. Model COST 231 Walfischa-Ikegamiiego

Model COST231 Walfischa-Ikegamiiego został opracowany w latach 90-tych w wyniku prac grupy naukowo-badawczej COST (ang. *European Cooperation in Science and Technology*) i szczegółowo opisany w rozdziale czwartym raportu z prac tej grupy [31], a także w [14, 70]. Model ten jest bardzo często stosowany w komputerowych narzędziach wspomagających planowanie sieci, także do estymacji położenia [76]. Dzięki zaproponowanemu połączeniu modelu Walfischa [105] i modelu Ikegamiiego [41], biorącemu pod uwagę większą liczbę parametrów środowiska miejskiego, możliwe jest dokładniejsze szacowanie tłumienia propagacyjnego.



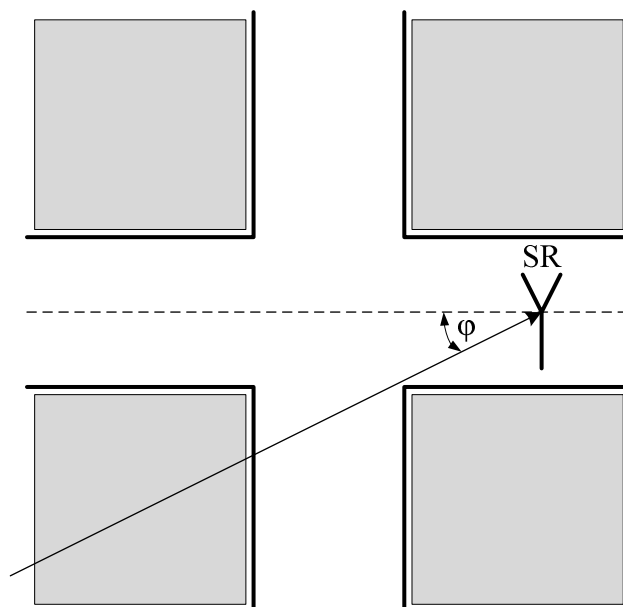
Rys. 4.1. Typowa sytuacja propagacyjna w środowisku miejskim i definicja parametrów używanych w modelu COST 231 Walfischa-Ikegamiiego

Na rys. 4.1. przedstawiona została typowa sytuacja propagacyjna w środowiskach miejskich, definiująca jednocześnie parametry używane w opisywanym modelu COST 231 Walfischa-Ikegamiiego, mianowicie:

- wysokość  $h_{SB}$  [m] zawieszenia anteny stacji bazowej (SB),
- wysokość  $h_{SR}$  [m] zawieszenia anteny stacji ruchomej (SR),
- odległość  $d$  [km] pomiędzy antenami stacji bazowej i stacji ruchomej (wyznaczana na płaszczyźnie),
- długość  $l$  [m] trasy propagacji fali radiowej nad budynkami,
- średnia wysokość  $h_{sr}$  [m] budynków na trasie propagacji sygnału radiowego,

- różnica  $\Delta h_{SR}$  [m] pomiędzy średnią wysokością budynków a wysokością zawieszenia anteny stacji ruchomej:  $\Delta h_{SR} = h_{sr} - h_{SR}$ ,
- różnica  $\Delta h_{SB}$  [m] pomiędzy wysokością zawieszenia anteny stacji bazowej a średnią wysokością budynków:  $\Delta h_{SB} = h_{SB} - h_{sr}$ ,
- odstęp  $w$  [m] między ścianami budynków, gdzie znajduje się stacja ruchoma,
- średni odstęp  $b$  [m] pomiędzy środkami budynków,
- kąt  $\varphi$  [°] nadejścia fali radiowej do anteny stacji ruchomej, nazywany także kątem orientacji ulicy, zilustrowany na rys. 4.2.

Dodatkowo model uzależnia tłumienie propagacyjne od częstotliwości  $f$  [MHz] sygnału radiowego.



Rys. 4.2. Ilustracja kąta  $\varphi$  nadejścia sygnału radiowego do anteny stacji ruchomej

W modelu rozróżnione są dwie możliwe sytuacje propagacyjne, w których ma miejsce bezpośrednia widoczność anten stacji bazowej i ruchomej – LOS, oraz sytuacja odwrotna – NLOS. Część tego modelu, odnosząca się do warunków braku bezpośredniej widoczności obu anten ruchomego łącza bezprzewodowego dotyczy sytuacji, w której fala radiowa od stacji bazowej do stacji użytkownika rozchodzi się nad budynkami, ugina się na krawędziach dachów i wnika pomiędzy budynki. Podobna sytuacja ma miejsce w terminalu kontenerowym z tą różnicą, że zamiast nieprzewodzących ścian budynków mamy do czynienia z metalowymi kontenerami ułożonymi w stopy o zmiennej wysokości.

Wyrażenie do obliczania tłumienia propagacyjnego w takich warunkach, przy użyciu tego modelu, przedstawia się następująco:

$$L_{wl} [dB] = \begin{cases} L_{wp} + L_{rts} + L_{msd} & \text{dla } L_{rts} + L_{msd} > 0, \\ L_{wp} & \text{dla } L_{rts} + L_{msd} \leq 0, \end{cases} \quad (4.6)$$

gdzie:

- $L_{wp}$  – tłumienie wolnej przestrzeni, obliczane z dobrze znanej zależności:

$$L_{wp} [dB] = 32,4 + 20 \log d + 20 \log f, \quad (4.7)$$

- $L_{rts}$  – tłumienie występujące wskutek dyfrakcji i rozproszenia sygnału radiowego na krawędziach dachów budynków [70],
- $L_{msd}$  – tłumienie wynikające z odbić sygnału radiowego od powierzchni ścian budynków [70].

Składnik  $L_{rts}$  wyrażony został następującą zależnością:

$$L_{rts} [dB] = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_{SR} + L_{ori}. \quad (4.8)$$

Określenie tłumienia  $L_{rts}$  oparte jest głównie na modelu Ikegamiego, jednak składnik tłumienia  $L_{ori}$  został zmodyfikowany i wyraża się następująco:

$$L_{ori} [dB] = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & \text{dla } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ, \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & \text{dla } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ, \\ 4 - 0,114(\varphi - 55) & \text{dla } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ, \end{cases} \quad (4.9)$$

przy czym należy mieć na względzie, że  $L_{ori}$  jest empirycznym współczynnikiem korekcyjnym, uzyskanym na podstawie małej liczby pomiarów, co podkreślają sami autorzy modelu [31].

Określenie składnika  $L_{msd}$  jest bazującym na pomiarach rozszerzeniem rozwiązań zaproponowanych w pracy Walfischa i Bertonięgo. Wysokości budynków i ich wzajemne odległości na drodze propagacji fali radiowej są modelowane poprzez ekrany absorbujące, co może mieć znaczący wpływ na niedokładność szacowania tłumienia propagacyjnego w terminalu kontenerowym przy zastosowaniu modelu Walfischa-Ikegamiego. Niemniej jednak składnik  $L_{msd}$  wyraża się następująco:

$$L_{msd} [dB] = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b, \quad (4.10)$$

gdzie:

$$L_{bsh} [dB] = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_{SB}) & \text{dla } h_{SB} > h_{sr}, \\ 0 & \text{dla } h_{SB} \leq h_{sr}, \end{cases} \quad (4.11)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{dla } h_{SB} > h_{sr}, \\ 54 - 0,8 \Delta h_{SB} & \text{dla } d \geq 0,5 \text{ km} \cap h_{SB} \leq h_{sr}, \\ 54 - 1,6 \Delta h_{SB} \cdot d & \text{dla } d < 0,5 \text{ km} \cap h_{SB} \leq h_{sr}, \end{cases} \quad (4.12)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{dla } h_{SB} > h_{sr}, \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_{SB}}{h_{sr}} & \text{dla } h_{SB} \leq h_{sr}, \end{cases} \quad (4.13)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0,7 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{dla terenów podmiejskich,} \\ 1,5 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{dla centrów dużych miast.} \end{cases} \quad (4.14)$$

Składnik  $k_a$  odzwierciedla wzrost tłumienia propagacyjnego dla wysokości zawieszenia anteny stacji bazowej poniżej średniej wysokości budynków. Czynniki  $k_d$  i  $k_f$  mają wpływ na skalę uzależnienia tłumienia  $L_{msd}$  od odległości między antenami łącza radiowego i częstotliwości sygnału radiowego.

W przypadku braku szczegółowych informacji o średniej wysokości budynków w środowisku, dla którego modelowane jest tłumienie propagacyjne, autorzy modelu zalecają jej obliczenie przy zastosowaniu poniżej zależności:

$$h_{sr} [m] = \begin{cases} 3p + 3 & \text{dla dachów skośnych,} \\ 3p & \text{dla dachów płaskich,} \end{cases} \quad (4.15)$$

gdzie  $p$  oznacza liczbę kondygnacji budynków. Natomiast w przypadku nieznaności innych parametrów charakterystycznych środowiska, można przyjmować:

- $b \in \langle 20; 50 \rangle [m]$ ,
- $w = \frac{b}{2}$ ,
- $\varphi = 90^\circ$ .

Tak określony model Walfischa-Ikegamiiego pozostaje modelem statystycznym, w odróżnieniu do modeli deterministycznych, ze względu na możliwość szacowania tłumienia propagacyjnego tylko na podstawie parametrów charakterystycznych, bez uwzględnienia danych topograficznych o rozkładzie przestrzennym budynków [31]. Model ten powstał na podstawie wyników badań pomiarowych przeprowadzonych w kilkunastu europejskich miastach [26].

Zakres stosowalności tego modelu obejmuje:

- $f \in \langle 800; 2000 \rangle [MHz]$ ,
- $h_{SB} \in \langle 4; 50 \rangle [m]$ ,
- $h_{SR} \in \langle 1; 3 \rangle [m]$ ,
- $d \in \langle 0,02; 5 \rangle [km]$ .

Należy podkreślić, że szacowanie tłumienia propagacyjnego przy użyciu modelu Walfischa-Ikegamiiego jest dokładniejsze dla sytuacji, w których antena stacji bazowej zawieszona jest powyżej średniej wysokości budynków. Podczas weryfikacji pomiarowej uzyskano błąd średni w zakresie  $\pm 3$  dB i odchylenie standardowe w zakresie od 4 do 8 dB [82]. Jednakże błędy te mogą być znacząco większe dla sytuacji, kiedy antena stacji bazowej zawieszona jest poniżej średniej wysokości budynków. Dodatkowo model nie uwzględnia zjawiska wielodrogowości, a dokładność szacowania tłumienia może też maleć, jeśli rozważany teren nie jest płaski, a jego pokrycie nie jest jednorodne [31].

Należy także mieć na względzie fakt, że model Walfischa-Ikegamiiego ma ograniczoną dokładność dla przypadku, kiedy odległość  $l$  jest mniejsza od parametru  $d_s$  (ang. *settled-field distance*), wyrażonego w następujący sposób:

$$d_s = \frac{\lambda d^2}{\Delta h_{SB}^2}, \quad (4.16)$$

gdzie  $\lambda$  oznacza długość fali sygnału radiowego [38]. Wady tej pozbawiony jest model z zalecenia ITU-R P.1411, opisany w podrozdziale 4.1.4 niniejszej rozprawy.

#### **4.1.3. Modele ITU-R P.1411**

W dokumencie [44] zaproponowano kompleksowy zbiór modeli propagacyjnych przeznaczony do estymowania wartości tłumienia propagacyjnego w łączach radiowych

o krótkim zasięgu (nie przekraczającym 1 km), pracujących w zakresie częstotliwości od 300 MHz do 100 GHz. Jest to podstawowe zalecenie dotyczące przewidywania warunków propagacji w tak specyficznym środowisku, jakim są około budynkowe obszary miejskie [90]. Modele te zalecane są do stosowania w czterech typach środowisk:

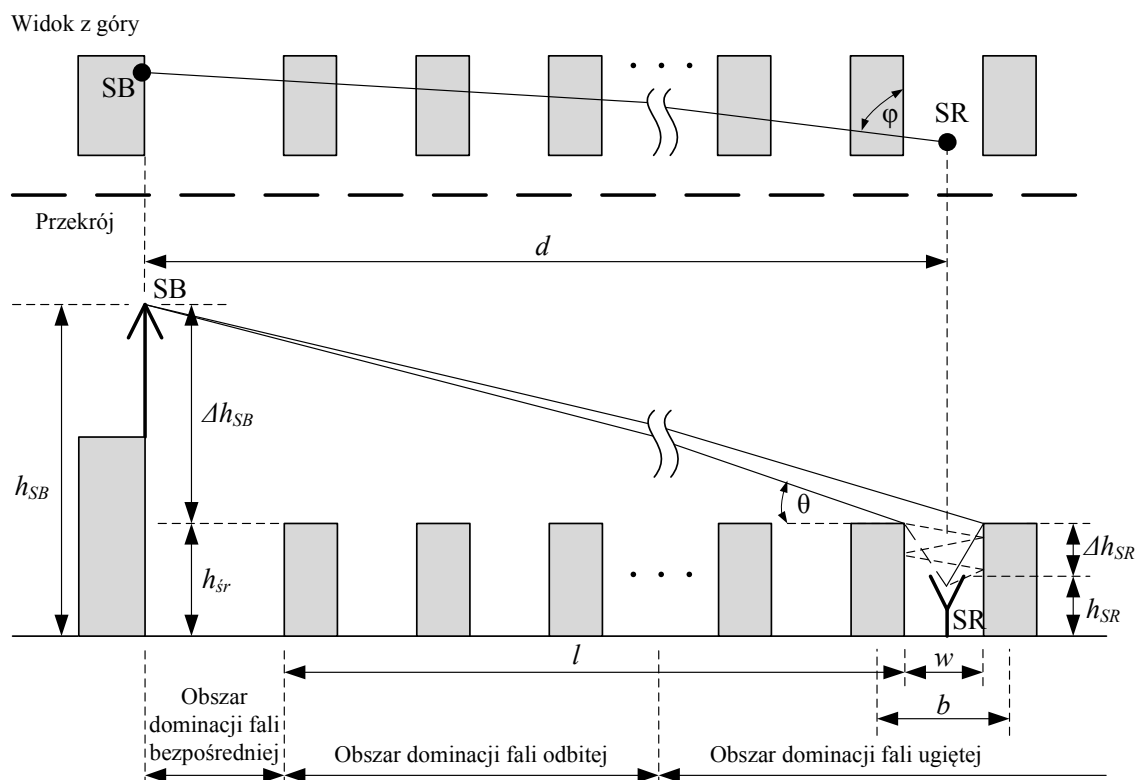
- centra dużych miast o gęstej i wysokiej zabudowie (co najmniej kilunastopiętrowej), tworzącej tzw. kaniony miejskie, charakteryzujące się dużym natężeniem ruchu pojazdów;
- tereny miejskie i podmiejskie z szerokimi ulicami i budynkami o wysokościach zwykle nie przekraczających trzech pięter, charakteryzujące się średnim natężeniem ruchu pojazdów;
- dzielnice mieszkaniowe zabudowane przez domy i budynki o wysokościach co najwyżej dwóch pięter, oddzielone przez szerokie ulice (wzdłuż których zwykle zaparkowane są samochody), charakteryzujące się małym natężeniem ruchu pojazdów oraz różnym stopniem pokrycia roślinnością;
- tereny wiejskie zdominowane przez małe domy otoczone dużymi ogrodami o różnym stopniu pokrycia roślinnością, charakteryzujące się sporadycznym ruchem pojazdów oraz wpływem ukształtowania terenu na propagację fal radiowych.

Opisywane zalecenie rozróżnia także trzy kategorie scenariuszy propagacyjnych, jakie mogą mieć miejsce. Są to:

- NLOS1 – sytuacja braku bezpośredniej widoczności anten łącza radiowego, przy czym antena stacji bazowej jest zainstalowana powyżej poziomu dachów budynków, a fale radiowe rozchodzą się głównie ponad ich dachami;
- NLOS2 – sytuacja braku bezpośredniej widoczności anten łącza radiowego, przy czym antena stacji bazowej zainstalowana jest poniżej poziomu dachów budynków, a propagacja fal radiowych odbywa się głównie w kanionach miejskich;
- LOS – sytuacja, w której zachodzi bezpośrednia widoczność anten łącza radiowego, niezależnie od wysokości instalacji anteny stacji bazowej.

W niniejszej rozprawie pod rozważę poddana została sytuacja NLOS1, w której antena stacji bazowej wyniesiona jest ponad poziom dachów zabudowań, co miało miejsce podczas badań pomiarowych przeprowadzonych w terminalu kontenerowym DCT

Gdańsk. Dla tej sytuacji rekomendacja [44] zaleca dwa modele propagacyjne rozróżniające środowiska miejskie i podmiejskie.



Rys. 4.3. Typowa sytuacja propagacyjna dla NLOS1 i definicja używanych parametrów

Na rys. 4.3 zdefiniowane zostały parametry używane przez oba modele, mianowicie:

- średnia wysokość  $h_{sr}$  [m] budynków na trasie propagacji sygnału radiowego,
- odstęp  $w$  [m] między ścianami budynków, gdzie znajduje się stacja ruchoma,
- średni odstęp  $b$  [m] pomiędzy środkami budynków,
- kąt  $\varphi$  [°] orientacji ulicy względem fali bezpośredniej,
- wysokość  $h_{SB}$  [m] zawieszenia anteny stacji bazowej (SB),
- wysokość  $h_{SR}$  [m] zawieszenia anteny stacji ruchomej (SR),
- długość  $l$  [m] trasy propagacji fali radiowej nad budynkami,
- odległość  $d$  [m] pomiędzy antenami stacji bazowej i stacji ruchomej (wyznaczana na płaszczyźnie),
- różnica  $\Delta h_{SR}$  [m] pomiędzy średnią wysokością budynków a wysokością zawieszenia anteny stacji ruchomej:  $\Delta h_{SR} = h_{sr} - h_{SR}$ ,



- różnica  $\Delta h_{SB}$  [m] pomiędzy wysokością zawieszenia anteny stacji bazowej a średnią wysokością budynków:  $\Delta h_{SB} = h_{SB} - h_{sr}$ .

#### 4.1.4. Model ITU-R P.1411 dla sytuacji NLOS1 w środowiskach miejskich

Model propagacyjny dla sytuacji NLOS1 w środowiskach miejskich opisany został w paragrafie 4.2.1 zalecenia [44]. Stanowi on rozszerzenie modelu COS231 Walfischa-Ikegamiego, zwiększający jego dokładność dla przypadków, kiedy odległość  $l$  jest mniejsza od parametru  $d_s$  (patrz równanie (4.16)) oraz poszerzający częstotliwościowy zakres jego stosowności do 5 GHz. Dodatkowo model zakłada, że budynki na analizowanym obszarze mają tę samą wysokość, wynoszącą  $h_{sr}$ .

W opisywanym przypadku tłumienie propagacyjne można wyrazić w sposób analogiczny jak w przypadku modelu Walfischa-Ikegamiego, mianowicie:

$$L_{NLOS1,M} [dB] = \begin{cases} L_{wp}^{ITU} + L_{rts}^{ITU} + L_{msd}^{ITU} & \text{dla } L_{rts}^{ITU} + L_{msd}^{ITU} > 0, \\ L_{wp}^{ITU} & \text{dla } L_{rts}^{ITU} + L_{msd}^{ITU} \leq 0, \end{cases} \quad (4.17)$$

gdzie tłumienie  $L_{wp}^{ITU}$  wolnej przestrzeni wyrażone jest poprzez dobrze znaną zależność:

$$L_{wp}^{ITU} [dB] = 32,4 + 20 \log(d/1000) + 20 \log f, \quad (4.18)$$

Składnik  $L_{rts}^{ITU}$  odzwierciedla wpływ tłumienia występującego wskutek dyfrakcji i rozproszenia sygnału radiowego na krawędziach dachów budynków i bierze pod uwagę szerokość ulicy i jej orientację, co wyraża się następująco:

$$L_{rts}^{ITU} [dB] = -8,2 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_{SR} + L_{ori}^{ITU}, \quad (4.19)$$

gdzie:

$$L_{ori}^{ITU} [dB] = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & \text{dla } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ, \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & \text{dla } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ, \\ 4 - 0,114(\varphi - 55) & \text{dla } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ. \end{cases} \quad (4.20)$$

Z kolei składnik  $L_{msd}^{ITU}$ , wyrażający tłumienie wynikające z odbić sygnału radiowego od powierzchni ścian budynków, zależny jest od wysokości zawieszenia anteny stacji bazowej w odniesieniu do średniej wysokości budynków oraz od kąta  $\theta$  padania fali. Ponadto, składnik ten uwzględnia zależność tłumienia propagacyjnego od różnicy długości  $l$  trasy propagacji fali radiowej nad budynkami (patrz rys. 4.3) i wspomnianego

już parametru  $d_s$ , wyrażonego przy pomocy wzoru (4.16). Zależność wyrażająca opisywany składnik przedstawiona została poniżej:

$$L_{msd}^{ITU} = \begin{cases} -\tanh\left(\frac{\log d - \log d_{bp}}{\chi}\right)(L1_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{dla } l > d_s \cap dh_{bp} > 0, \\ \tanh\left(\frac{\log d - \log d_{bp}}{\chi}\right)(L2_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{dla } l \leq d_s \cap dh_{bp} > 0, \\ L2_{msd}(d) & \text{dla } dh_{bp} = 0, \\ L1_{msd}(d) - \tanh\left(\frac{\log d - \log d_{bp}}{\zeta}\right)(L_{upp} - L_{mid}) - L_{upp} + L_{mid} & \text{dla } l > d_s \cap dh_{bp} < 0, \\ L2_{msd}(d) + \tanh\left(\frac{\log d - \log d_{bp}}{\zeta}\right)(L_{mid} - L_{low}) + L_{mid} - L_{low} & \text{dla } l \leq d_s \cap dh_{bp} < 0, \end{cases} \quad (4.21)$$

gdzie poszczególne wielkości oblicza się korzystając z poniższych zależności:

$$dh_{bp} = L_{upp} - L_{low}, \quad (4.22)$$

$$\zeta = (L_{upp} - L_{low}) \cdot \nu, \quad (4.23)$$

$$L_{mid} = \frac{L_{upp} - L_{low}}{2}, \quad (4.24)$$

$$L_{upp} = L1_{msd}(d_{bp}), \quad (4.25)$$

$$L_{low} = L2_{msd}(d_{bp}), \quad (4.26)$$

$$d_{bp} = |\Delta h_b| \sqrt{\frac{l}{\lambda}}, \quad (4.27)$$

a stałe  $\nu$  i  $\chi$  przyjmują wartości odpowiednio 0,0417 i 0,1.

Składnik tłumienia  $L1_{msd}(d)$ , mający znaczenie dla przypadku, gdy  $l > d_s$ , oblicza się w sposób analogiczny jak składnik  $L_{msd}$  w modelu Walfischa-Ikegami (patrz wzór (4.10)), mianowicie:

$$L1_{msd}(d)[dB] = L_{bsh}^{ITU} + k_a^{ITU} + k_d^{ITU} \log(d/1000) + k_f^{ITU} \log f - 9 \log b, \quad (4.28)$$

gdzie  $L_{bsh}^{ITU}$  jest składnikiem zależnym od wysokości zawieszenia anteny stacji bazowej, co wyraża się w sposób następujący:

$$L_{bsh}^{ITU} [dB] = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_{SB}) & \text{dla } h_{SB} > h_{sr}, \\ 0 & \text{dla } h_{SB} \leq h_{sr}, \end{cases} \quad (4.29)$$

a znaczenie poszczególnych współczynników ma taki sam sens fizyczny, jak w przypadku modelu Walfischa-Ikegami, jednakże sposób ich obliczania jest nieco inny, jak zostało to przedstawione poniżej:

$$k_a^{ITU} = \begin{cases} 71,4 & \text{dla } h_{SB} > h_{sr} \cap f > 2000 \text{MHz}, \\ 73 - 0,8 \Delta h_{SB} & \text{dla } h_{SB} \leq h_{sr} \cap f > 2000 \text{MHz} \cap d \geq 500 \text{m}, \\ 73 - 1,6 \Delta h_{SB} (d/1000) & \text{dla } h_{SB} \leq h_{sr} \cap f > 2000 \text{MHz} \cap d < 500 \text{m}, \\ 54 & \text{dla } h_{SB} > h_{sr} \cap f \leq 2000 \text{MHz}, \\ 54 - 0,8 \Delta h_{SB} & \text{dla } h_{SB} \leq h_{sr} \cap f \leq 2000 \text{MHz} \cap d \geq 500 \text{m}, \\ 54 - 1,6 \Delta h_{SB} (d/1000) & \text{dla } h_{SB} \leq h_{sr} \cap f \leq 2000 \text{MHz} \cap d < 500 \text{m}, \end{cases} \quad (4.30)$$

$$k_d^{ITU} = \begin{cases} 18 & \text{dla } h_{SB} > h_{sr}, \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_{SB}}{h_{sr}} & \text{dla } h_{SB} \leq h_{sr}, \end{cases} \quad (4.31)$$

$$k_f^{ITU} = \begin{cases} -8 & \text{dla } f > 2000 \text{MHz}, \\ -4 + 0,7 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{dla } \textit{średnich miast i centrów małych miast} \\ & \text{ze } \textit{średnią gęstością drzewi dla } f \leq 2000 \text{MHz}, \\ -4 + 1,5 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{dla } \textit{centrów dużych miast i dla } f \leq 2000 \text{MHz}. \end{cases} \quad (4.32)$$

Należy podkreślić, że dokładność szacowania  $L1_{msd}(d)$  jest większa dla przypadków, kiedy długości  $l$  trasy propagacji nad budynkami jest znacznie większa od wartości  $d_s$ , tzn. gdy  $l \gg d_s$ .

Natomiast składnik tłumienia  $L2_{msd}(d)$ , który ma znaczenie dla przypadku, gdy  $l < d_s$ , obliczany jest z poniższej zależności:

$$L2_{msd}(d) [dB] = -10 \log Q_M^2, \quad (4.33)$$

gdzie:

$$Q_M = \begin{cases} 2,35 \left( \frac{\Delta h_{SB}}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0,9} & \text{dla } h_{SB} > h_{sr} + \delta h_u, \\ \frac{b}{d} & \text{dla } h_{SB} \leq h_{sr} + \delta h_u \cap h_{SB} \geq h_{sr} + \delta h_l, \\ \frac{b}{2\pi d} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \left( \frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right) & \text{dla } h_{SB} < h_{sr} + \delta h_l, \end{cases} \quad (4.34)$$

a poszczególne zmienne oblicza się z następujących zależności:

$$\theta = \arctan \left( \frac{\Delta h_{SB}}{b} \right), \quad (4.35)$$

$$\rho = \sqrt{\Delta h_{SB}^2 + b^2}, \quad (4.36)$$

$$\delta h_u = 10^{-\log \left( \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right) - \frac{\log d}{9} + \frac{10}{9} \log \left( \frac{b}{2,35} \right)}, \quad (4.37)$$

$$\delta h_l = \frac{0,00023b^2 - 0,1827b - 9,4978}{(\log f)^{2,938}} + 0,000781b + 0,06923. \quad (4.38)$$

Zdefiniowany w powyższy sposób model pozwala na szacowanie tłumienia propagacyjnego dla sytuacji NLOS1 w środowiskach miejskich, dla następujących zakresów parametrów modelu:

- $f \in \langle 800; 5000 \rangle [MHz]$ ,
- $h_{SB} \in \langle 4; 50 \rangle [m]$ ,
- $h_{sr} \in \langle 1; 3 \rangle [m]$ ,
- $d \in \langle 20; 5000 \rangle [m]$ .

Autorzy modelu podkreślają, że mimo iż górna granica długości  $d$  tras propagacyjnych, dla których model może być stosowany wynosi 5000 m, zalecane jest jego stosowanie dla wartości tego parametru nie przekraczającej 1000 m [44].

#### 4.1.5. Model ITU-R P.1411 dla sytuacji NLOS1 w środowiskach podmiejskich

Model propagacyjny dla sytuacji NLOS1 w środowiskach podmiejskich został scharakteryzowany w paragrafie 4.2.2 zalecenia [44]. W zależności od odległości stacji ruchomej od stacji bazowej rozróżnia się w nim (patrz rys. 4.3):

- obszar dominacji fali bezpośredniej, kiedy odległość między antenami łącza bezprzewodowego jest bardzo mała,
- obszar dominacji fali odbitej, kiedy odległość między anteną nadawczą i odbiorczą jest względnie mała, a moc fal radiowych kilkakrotnie odbitych od ścian budynków ma względnie duży poziom,
- obszar dominacji fali ugiętej, kiedy odległość między antenami stacji bazowej i użytkownika jest duża, a energia fal ugiętych na krawędziach budynków dominuje nad energią fal wielokrotnie odbitych.

Tłumienie propagacyjne dla opisywanego modelu, w zależności od obszaru, w którym znajduje się stacja ruchoma, wraza się przy pomocy następującej zależności:

$$L_{NLOS1,P} [dB] = \begin{cases} 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) & \text{dla } d < d_0 \text{ (obsz. dom. fali bezpośredniej),} \\ L_{0n} & \text{dla } d_0 < d \leq d_n \text{ (obsz. dom. fali odbitej),} \\ 32,1 \cdot \log\left(\frac{d}{d_n}\right) + L_{d_n} & \text{dla } d > d_n \text{ (obsz. dom. fali ugiętej),} \end{cases} \quad (4.39)$$

gdzie dla  $d_k < d \leq d_{k+1}$  ( $k=0, \dots, n-1$ ):

$$L_{0n} = L_{d_k} + \frac{L_{d_{k+1}} - L_{d_k}}{d_{k+1} - d_k} \cdot (d - d_k), \quad (4.40)$$

natomiast parametr  $n$  przyjmuje następujące wartości:

$$n = \begin{cases} 2 & \text{dla } 0,8\text{GHz} \leq f < 5\text{GHz}, \\ 3 & \text{dla } 5\text{GHz} \leq f < 20\text{GHz}. \end{cases} \quad (4.41)$$

Do obliczania pozostałych zmiennych modelu służą poniższe wyrażenia:

$$d_k = \frac{1}{\sin \varphi} \sqrt{B_k^2 + (h_{SB} - h_{SR})^2}, \quad (4.42)$$

$$L_{d_k} = 20 \log \left( \frac{4\pi d_{kp}}{0,4^k \cdot \lambda} \right), \quad (4.43)$$

$$d_{kp} = \frac{1}{\sin \varphi_k} \sqrt{A_k^2 + (h_{SB} - h_{SR})^2}, \quad (4.44)$$

$$A_k = \frac{w(h_{SB} - h_{SR})(2k+1)}{2(h_{sr} - h_{SR})}, \quad (4.45)$$

$$B_k = \frac{w(h_{SB} - h_{SR})(2k+1)}{2(h_{sr} - h_{SR})} - k \cdot w, \quad (4.46)$$

$$\varphi_k = \arctan \left( \frac{B_k}{A_k} \tan \varphi \right). \quad (4.47)$$

Opisywany model może być stosowany dla:

- dowolnej średniej wysokości  $h_{sr}$  budynków,
- $\Delta h_{SB} \in \langle 1; 100 \rangle [m]$ ,
- $\Delta h_{SR} \in \langle 4; 10 \rangle [m]$ ,
- $d \in \langle 20; 5000 \rangle [m]$ ,
- $f \in \langle 800; 20000 \rangle [MHz]$ ,
- $w \in \langle 10; 25 \rangle [m]$ ,
- $d \in \langle 10; 5000 \rangle [m]$ .

Podobnie jak w przypadku modelu dla środowisk miejskich, zalecane jest stosowanie opisywanego modelu dla tras propagacyjnych o długościach nie większych niż 1 km.

## 4.2. Analiza porównawcza wybranych znanych modeli propagacyjnych

Analiza przydatności opisanych modeli propagacyjnych do projektowania ruchomych systemów radiowych w warunkach terminalu kontenerowego wykonana została poprzez porównanie zmierzonych wartości tłumienia propagacyjnego z wartościami obliczonymi przy użyciu tych modeli [3, 4, 5]. Porównanie to bazuje na dwóch miarach dopasowania danych pomiarowych do modeli matematycznych, a mianowicie na:

- błędzie średnim (*ME*) wyrażonym ogólną zależnością (3.63), której postać dla omawianej sytuacji wygląda następująco:

$$ME [dB] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (L_{p,i} - L_{o,i}), \quad (4.48)$$

- błędzie standardowym estymacji (*SEE*) wyrażonym ogólną zależnością (3.62), której postać dla omawianej sytuacji wygląda następująco:

$$SEE [dB] = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (L_{p,i} - L_{o,i})^2}, \quad (4.49)$$

przy czym  $L_{p,i}$  [dB] oznacza pomierzoną wartość tłumienia propagacyjnego w pojedynczym,  $i$ -tym łączu radiowym, zaś  $L_{o,i}$  [dB] oznacza obliczoną wartość tłumienia w tym łączu, natomiast  $N$  jest liczebnością próby.

Jak wiadomo, błąd średni jest miarą stopnia rozproszenia wyników pomiarów wokół badanego modelu, natomiast błąd standardowy estymacji jest miarą dokładności estymacji rzeczywistej wartości tłumienia propagacyjnego przy pomocy badanego modelu poprzez określenie odchylenia standardowego rozproszenia wszystkich punktów pomiarowych wokół badanego modelu. Błąd *SEE* służy do oceny jakości dopasowania danego modelu do danych pomiarowych, tzn. im błąd jest mniejszy, tym model jest lepiej dopasowany [70]. Przy czym należy zaznaczyć, że model propagacyjny można uznać za wystarczająco dokładny, jeśli wartość błędu *SEE* nie przekracza 8 dB [79, 97].

W tab. 4.1 zestawiono błędy *ME* i *SEE* dla różnych wariantów wybranych znanych modeli tłumienia propagacyjnego oraz dla różnych zakresów danych pomiarowych, mianowicie dla zbioru wszystkich zebranych podczas badań danych oraz dla zbioru danych wynikającego z zakresu stosowalności danego modelu.

Tab. 4.5. Zestawienie błędów *ME* i *SEE* dla wybranych modeli propagacyjnych [5]

<b>Model propagacyjny</b>	<b>Wariant modelu</b>	<b>Zakres danych pomiarowych</b>	<b><i>N</i></b>	<b><i>ME</i> [dB]</b>	<b><i>SEE</i> [dB]</b>
Model dla systemów dostępowych w TK	LOS1	Zakres stosowności (Wszystkie dane)	287582	3,8	8,3
	NLOS1			3,0	7,6
COST 231 Walfisch-Ikegami	Tereny podmiejskie	Wszystkie dane	287582	-5,3	10,6
		Zakres stosowności	130968	-2,2	7,9
	Centra dużych miast	Wszystkie dane	287582	-10,1	16,0
		Zakres stosowności	130968	-3,9	9,3
ITU-R P.1411 NLOS1 (śr. miejskie)	Średnie miasta	Wszystkie dane	287582	-8,4	13,4
		Zakres stosowności	254184	-8,9	13,7
	Centra dużych miast	Wszystkie dane	287582	-8,8	13,9
		Zakres stosowności	254184	-9,4	14,3
ITU-R P.1411 NLOS1 (śr. podmiejskie)	Tereny podmiejskie	Wszystkie dane	287582	-4,5	10,0
		Zakres stosowności	190581	-5,9	10,8

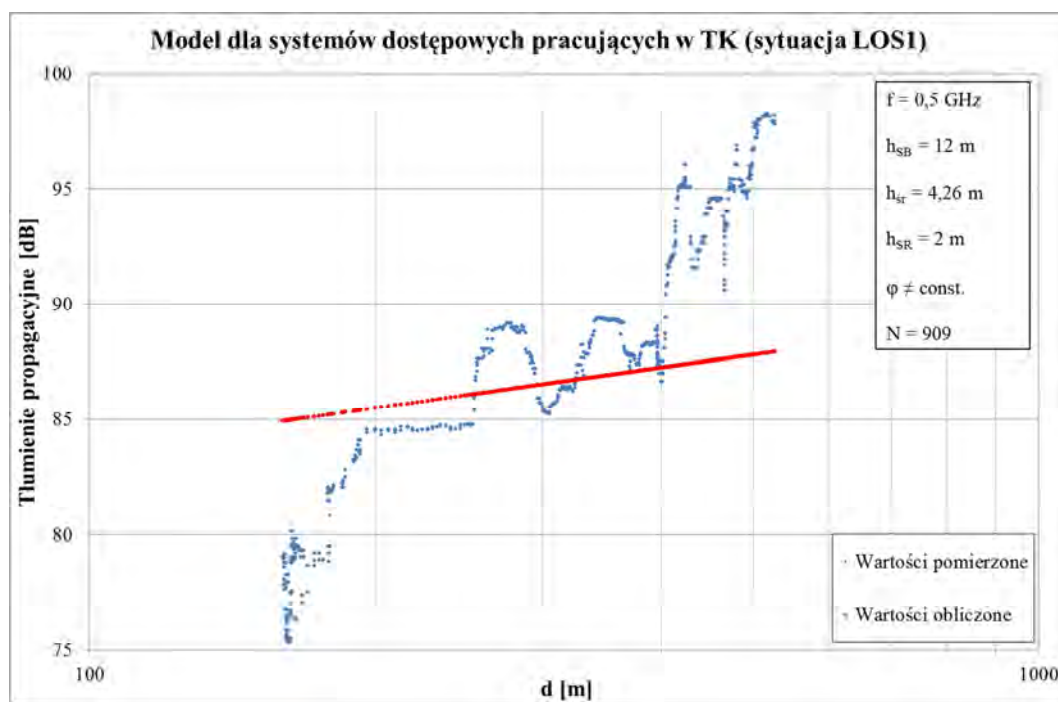
Kolejne cztery podrozdziały zawierają szczegółową charakterystykę wyników analizy przydatności wybranych modeli na podstawie wartości błędów zebranych w powyższej tabeli.

#### 4.2.1. Analiza modelu dla systemów dostępowych w terminalu kontenerowym

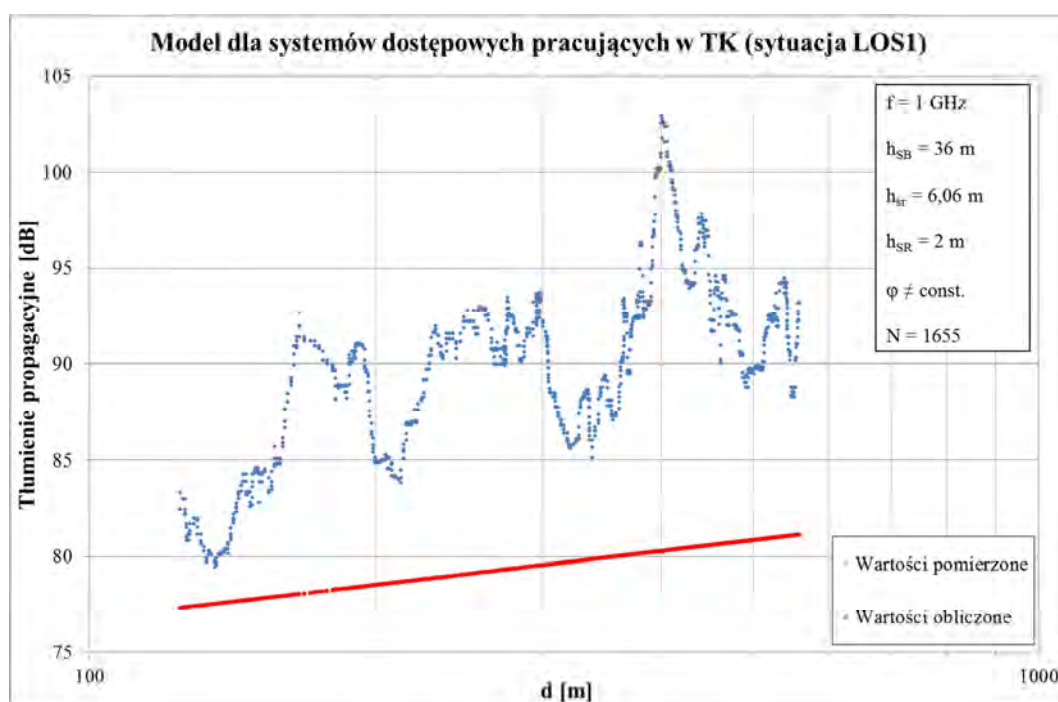
W przypadku modelu dla systemów dostępowych pracujących w warunkach terminalu kontenerowego dla badanych wariantów LOS1 i NLOS1 błąd średni wyniósł odpowiednio 3,8 i 3 dB, co w świetle zależności (4.48) świadczy o niedoszacowaniu obliczonego tłumienia propagacyjnego względem wartości pomierzonych. Jest to sytuacja szczególnie niekorzystna z punktu widzenia projektanta i może skutkować niewystarczającym pokryciem radiowym na obszarze, dla którego projektowany jest określony system łączności bezprzewodowej. W takim stanie rzeczy, pomimo tego, że standardowy błąd estymacji wynosi 8,3 i 7,9 dB, odpowiednio dla wariantu LOS1 i NLOS1, nie jest zalecane stosowanie tego modelu do szacowania tłumienia w ruchomych systemach radiokomunikacyjnych, pracujących w badanym środowisku. Przedstawione na rys. 4.4 – 4.11 przykładowe wykresy tłumienia potwierdzają fakt niedostatecznego dopasowania modelu do danych pomiarowych, przy czym lepiej dopasowany jest model dla wariantu NLOS1.

Wykresy te, podobnie jak wszystkie następne dotyczą jedynie wybranych fragmentów serii pomiarowych.

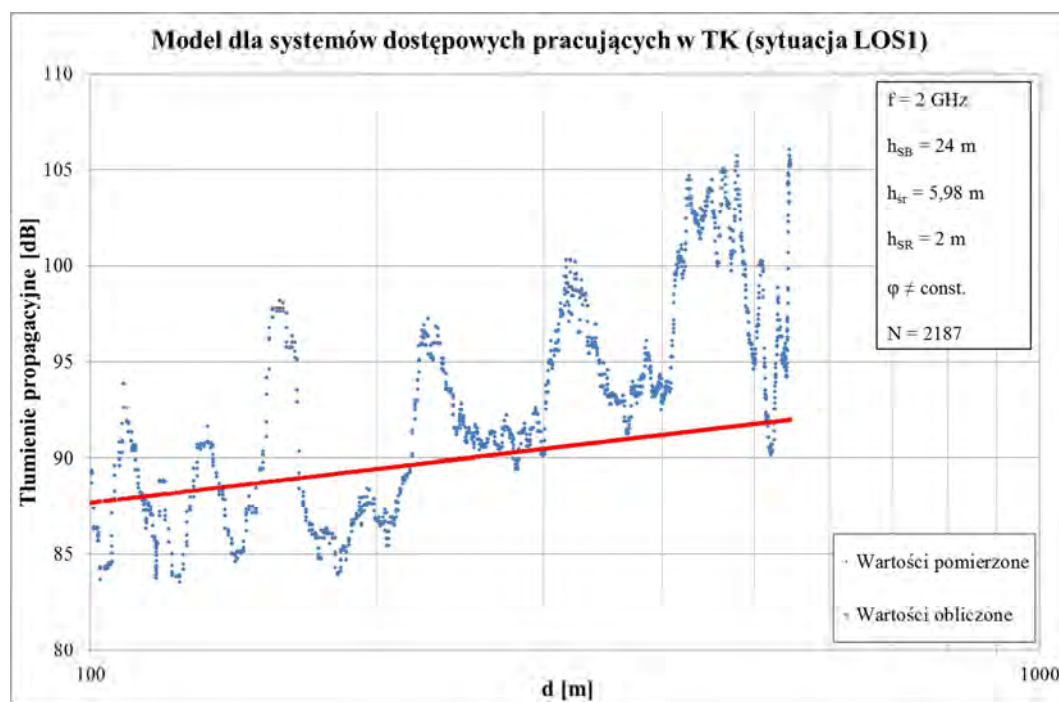




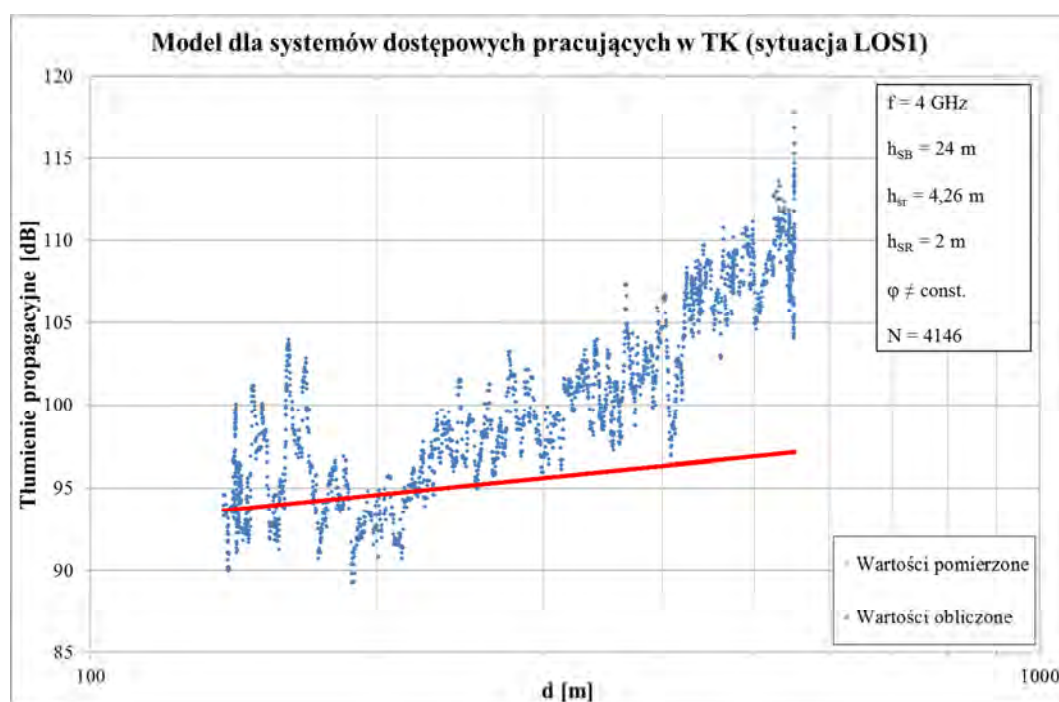
Rys. 4.4. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji LOS1 i dla  $f = 500 \text{ MHz}$



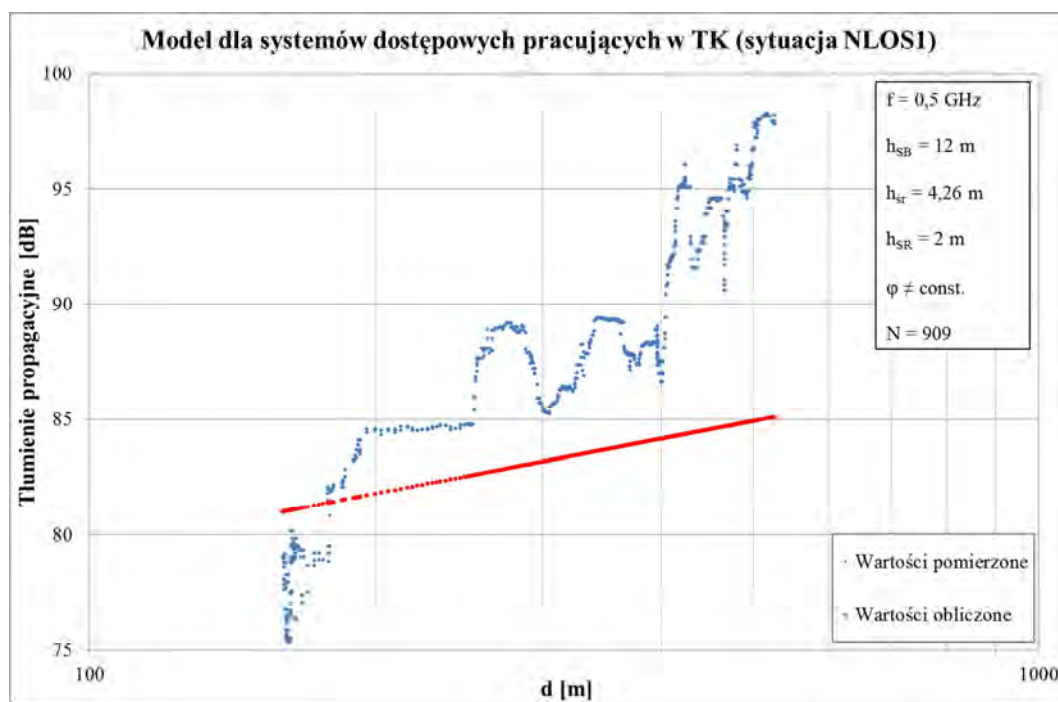
Rys. 4.5. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji LOS1 i dla  $f = 1000 \text{ MHz}$



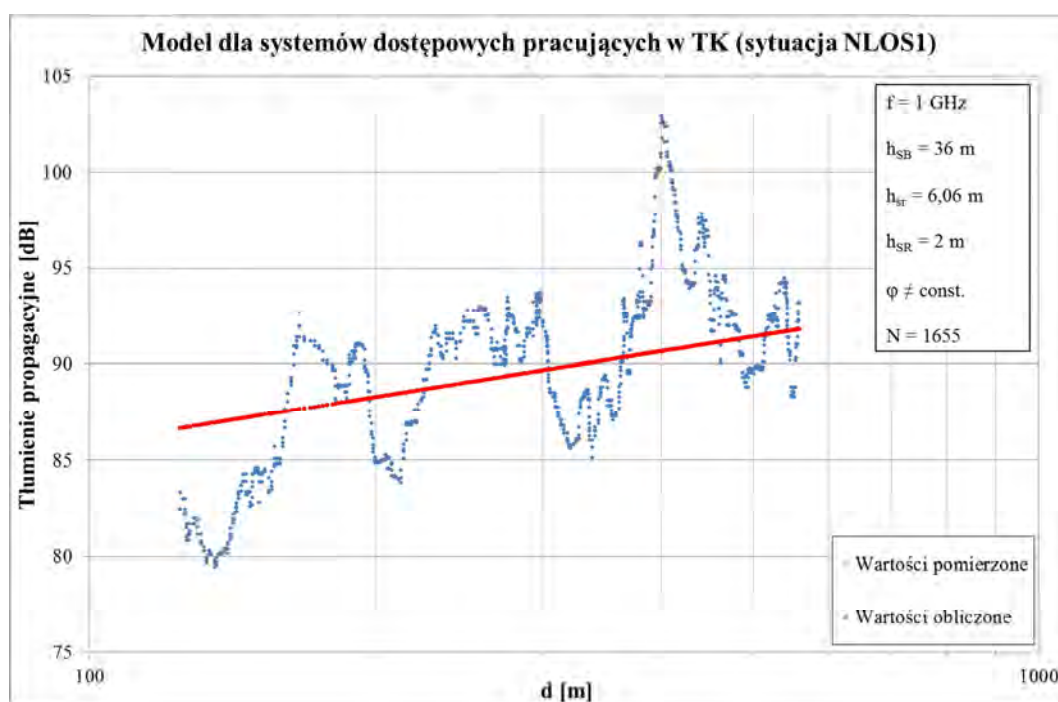
Rys. 4.6. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji LOS1 i dla  $f = 2000$  MHz



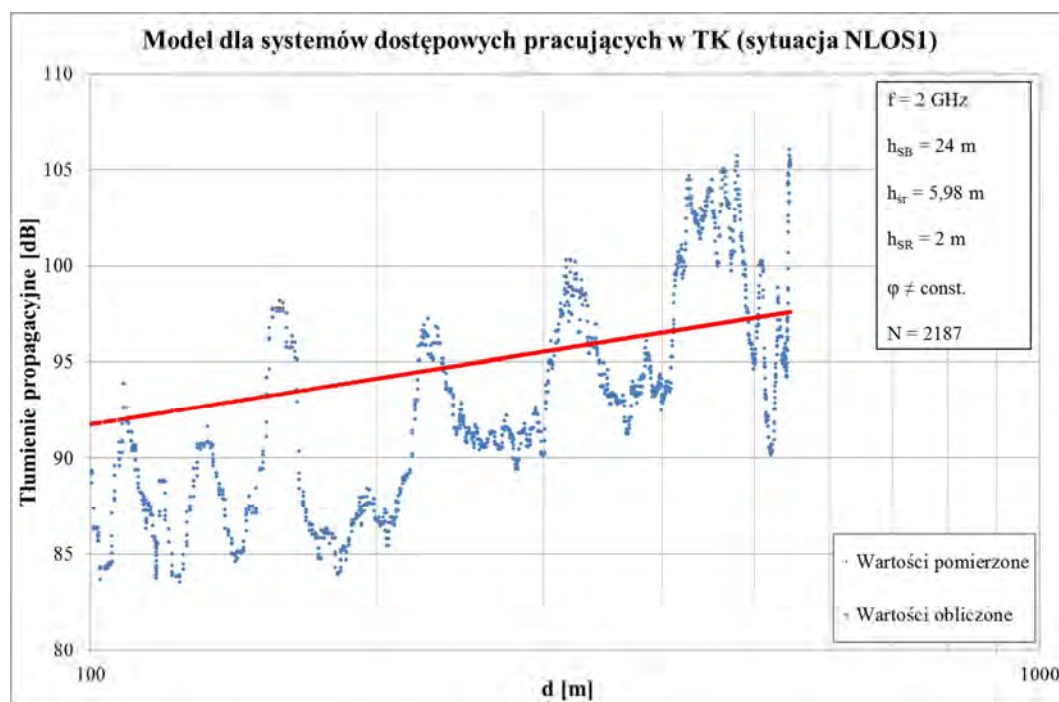
Rys. 4.7. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji LOS1 i dla  $f = 4000$  MHz



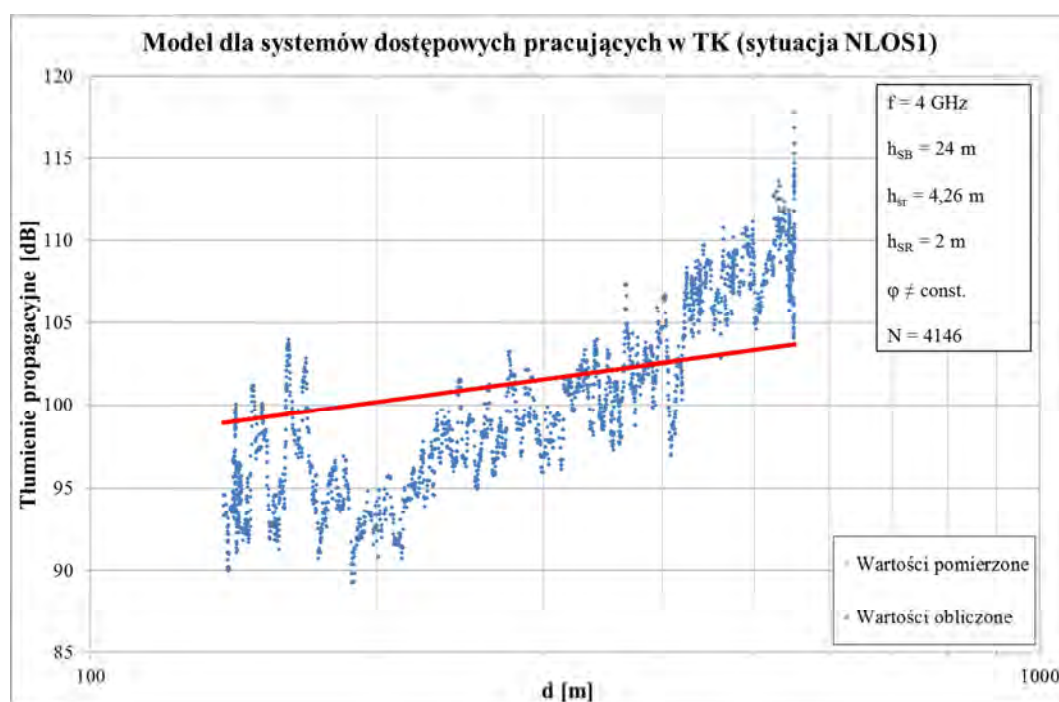
Rys. 4.8. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji NLOS1 i dla  $f = 500$  MHz



Rys. 4.9. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji NLOS1 i dla  $f = 1000$  MHz



Rys. 4.10. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji NLOS1 i dla  $f = 2000$  MHz

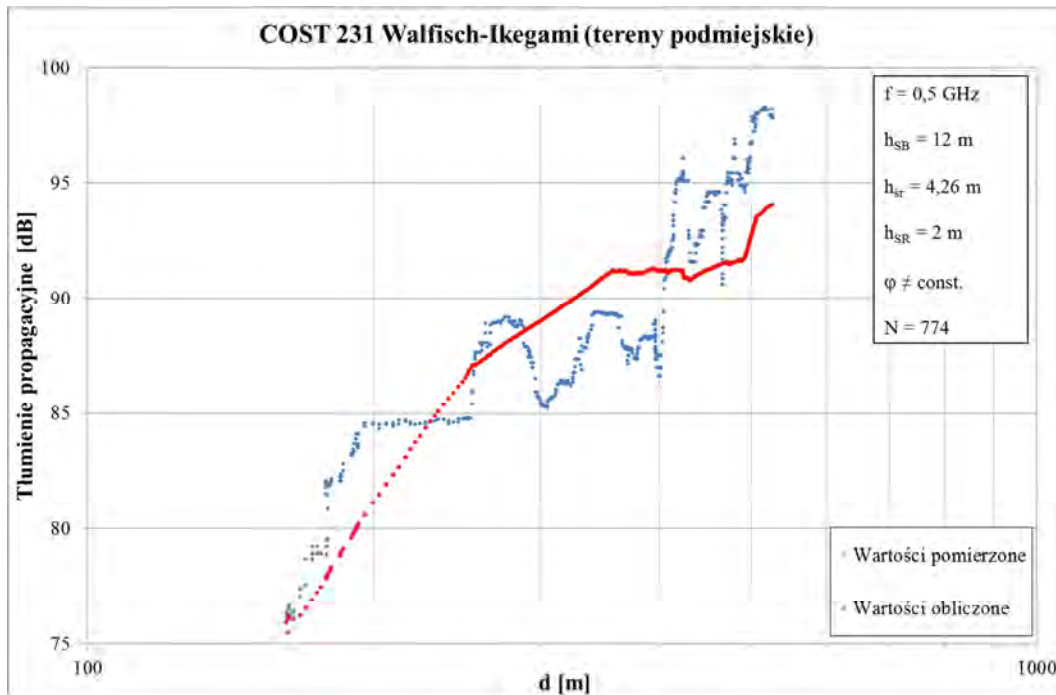


Rys. 4.11. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji NLOS1 i dla  $f = 4000$  MHz

#### 4.2.2. Analiza modelu COST 231 Walfischa-Ikegami

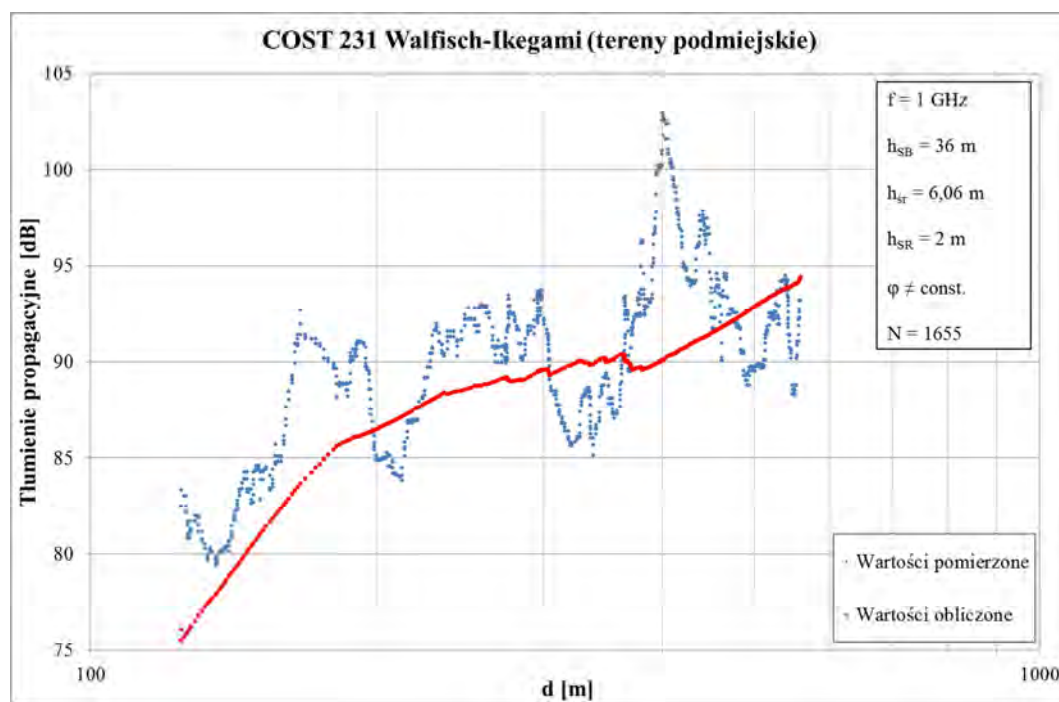
W przypadku zastosowania modelu COST 231 Walfischa-Ikegami do szacowania tłumienia propagacyjnego w ruchomych sieciach radiokomunikacyjnych, których parametry zawierają się w zakresie stosowalności także należy liczyć się z błędami przekraczającymi zadowalające wartości, przy czym dla wariantu modelu dla terenów podmiejskich błąd średni wynosi  $-2,2$  dB, co świadczy o przeszacowaniu obliczonych wartości tłumienia w odniesieniu do wartości pomierzonych, z kolei błąd *SEE* jest w przybliżeniu równy określonej w [97] wartości granicznej i wynosi  $7,9$  dB. Wartości te potwierdzają w pewnym stopniu słuszność zastosowania tej wersji modelu – przy braku dedykowanych modeli, stanowiących rozwiązanie wygodniejsze i dokładniejsze – do szacowania tłumienia w badanym środowisku, jak miało to miejsce podczas projektowania systemu łączności trunkingowej na dla terminalu kontenerowego Gdynia Container Terminal SA [86]. Dla tego samego wariantu modelu, ale dla wszystkich pomierzonych danych, łącznie z tymi spoza zakresu stosowalności modelu, błędy *ME* i *SEE* są znacząco wyższe i wynoszą odpowiednio  $-5,3$  dB i  $10,6$  dB.

Na rys. 4.12 – 4.15 przedstawione zostały przykładowe wykresy tłumienia propagacyjnego pomierzonego i obliczonego przy użyciu omawianej wersji modelu, dla różnych parametrów, zarówno z jego zakresu stosowalności, jak i spoza tego zakresu.

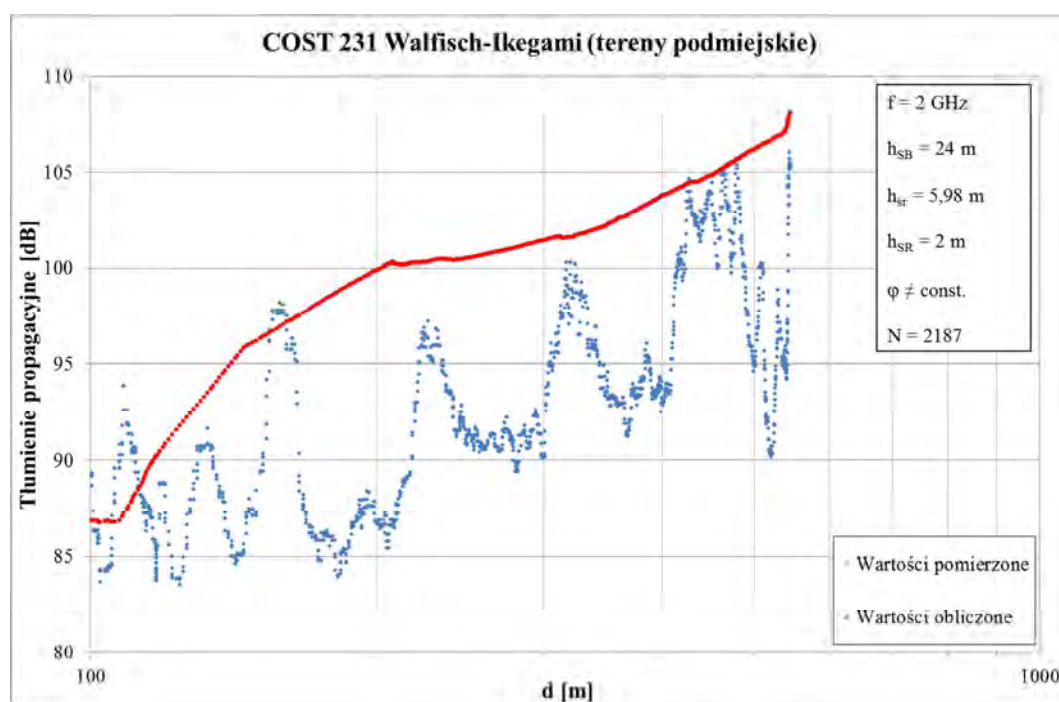


Rys. 4.12. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu Walfischa-Ikegami dla terenów podmiejskich i dla  $f = 500$  MHz (poza zakresem stosowalności)

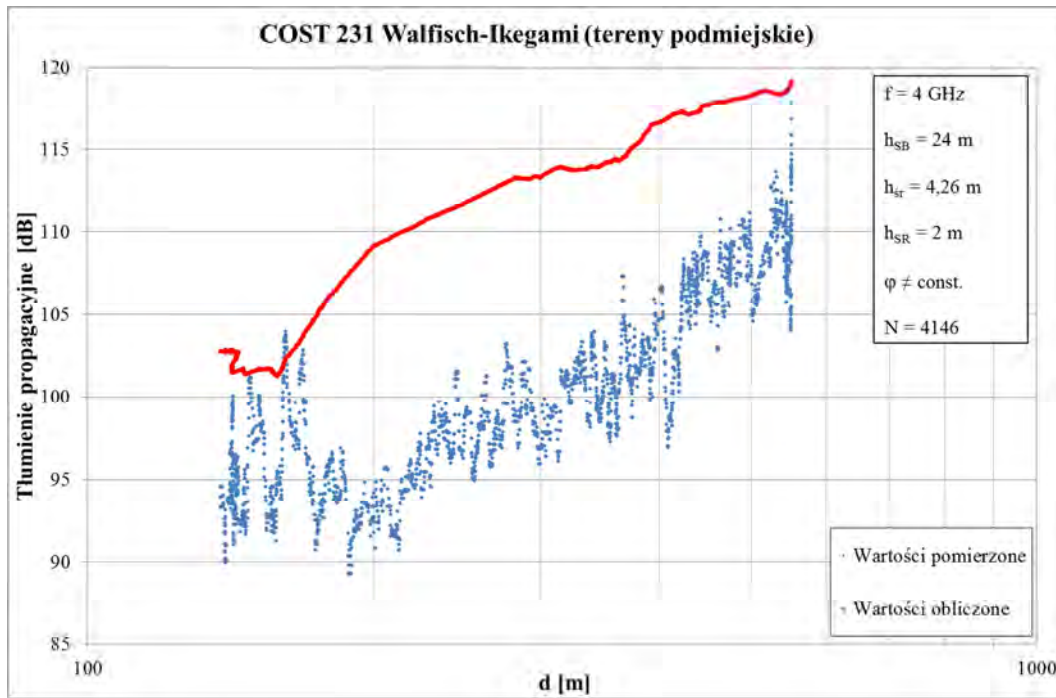




Rys. 4.13. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu Walfischa-Ikegami dla terenów podmiejskich i dla  $f = 1000 \text{ MHz}$  (zakres stosowności)



Rys. 4.14. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu Walfischa-Ikegami dla terenów podmiejskich i dla  $f = 2000 \text{ MHz}$  (zakres stosowności)



Rys. 4.15. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu Walfischa-Ikegami dla terenów podmiejskich i dla  $f = 4000$  MHz (poza zakresem stosowalności)

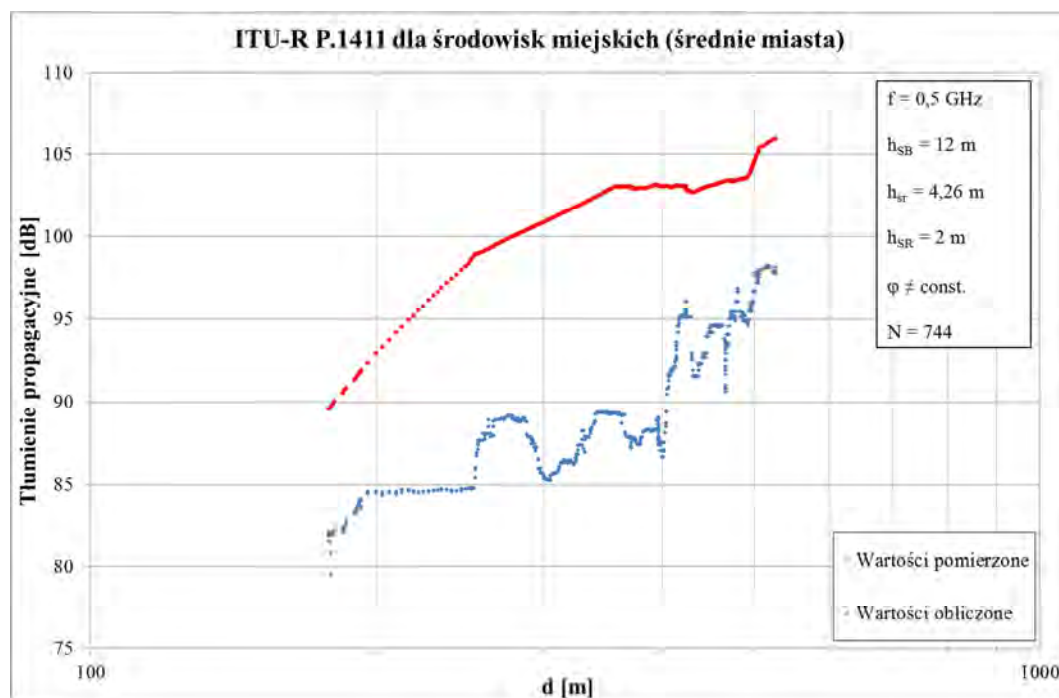
W przypadku wariantu omawianego modelu dla centrów dużych miast uzyskane wyniki są znacząco gorsze niż w przypadku najlepszym, jakim jest wariant dla terenów podmiejskich. Mianowicie dla zakresu stosowalności błąd średni wynosi  $-3,9$  dB, a standardowy błąd estymacji jest na poziomie  $9,3$  dB. Dla wszystkich danych pomiarowych uzyskane wyniki są jeszcze gorsze, a wartości poszczególnych błędów wynoszą  $-10,1$  dB dla *ME* i  $16$  dB dla *SEE*.

Dodatkowego wyjaśnienia wymaga niejednoznaczność tłumienia propagacyjnego dla najkrótszych długości trasy propagacyjnej (rys. 4.15), gdzie jednej jej wartości odpowiada kilka wartości tłumienia. Jest to wynikiem różnych wartości kąta orientacji ulicy względem fali bezpośredniej. Podobna sytuacja ma miejsce na wykresie z rys. 4.19.

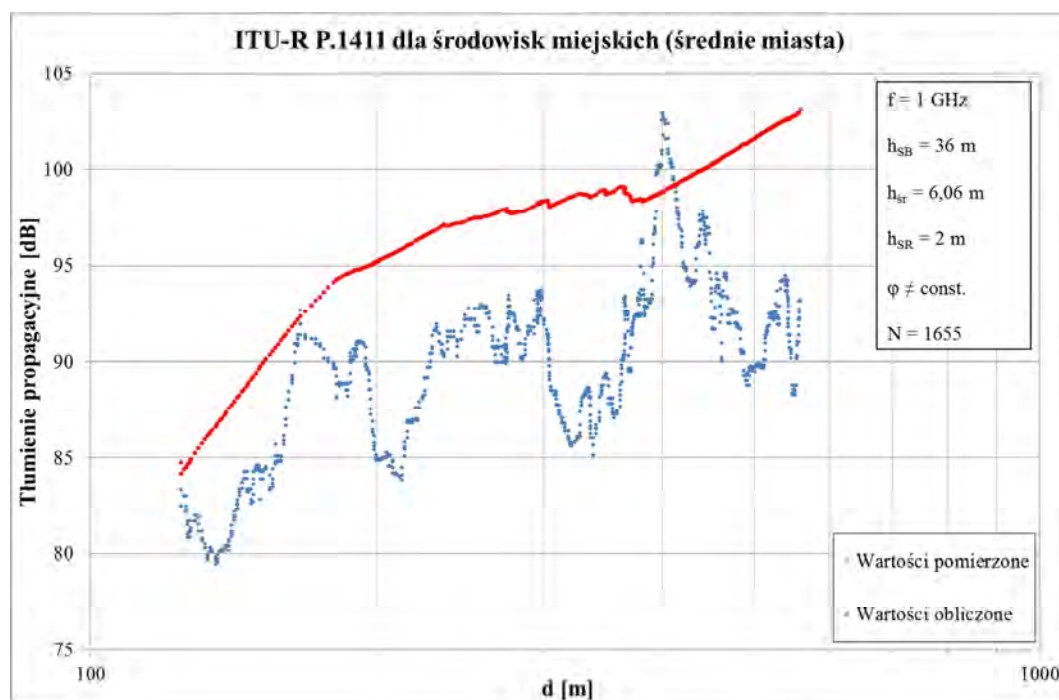
#### 4.2.3. Analiza modelu ITU-R P.1411 dla środowisk miejskich

Najgorzej w porównaniu z pozostałymi wybranymi modelami propagacyjnymi wypadł model z zalecenia ITU-R P.1411 dla środowisk miejskich. Niezależnie od wariantu modelu, ani też od zakresu przeanalizowanych danych pomiarowych błąd średni wynosi od  $-8,4$  do  $-9,4$  dB, co świadczy o dużym, nawet trzykrotnym (w mierze liniowej) przeszacowaniu obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w odniesieniu do wartości pomierzonych. Wartości błędu standardowego estymacji wahają się w zakresie od  $13,4$  do  $14,3$  dB, co dyskwalifikuje ten model do zastosowania w badanym środowisku.

Na rys. 4.16 – 4.19 przedstawione zostały przykładowe wykresy tłumienia propagacyjnego dla różnych wartości parametrów, dla wersji modelu dla średnich miast oraz dla danych z zakresu stosowalności modelu, a także spoza tego zakresu.

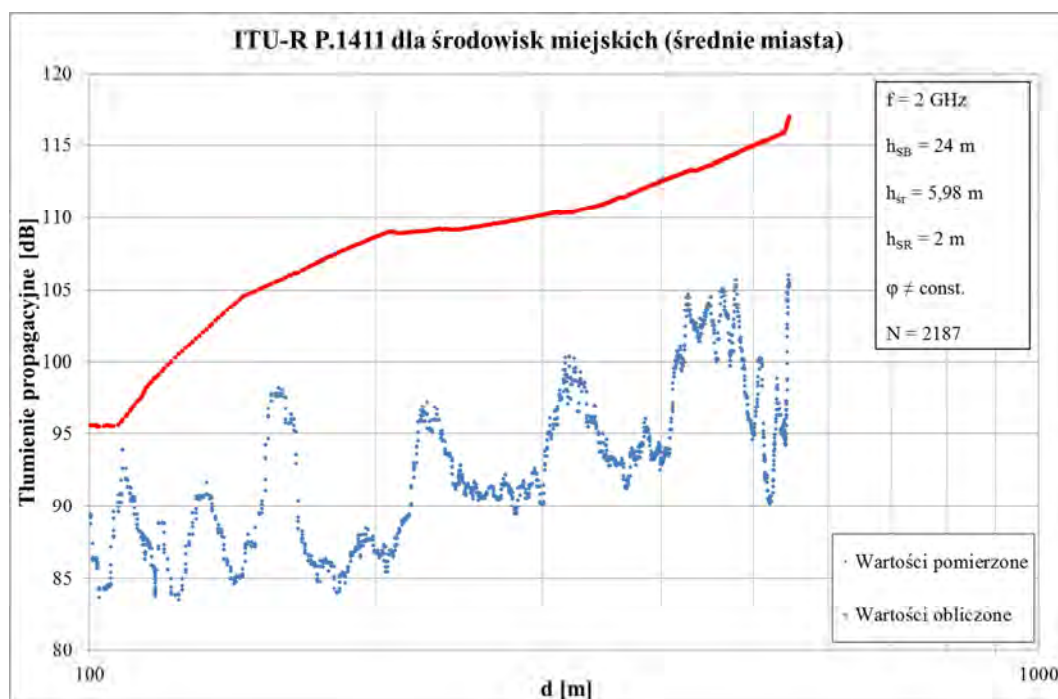


Rys. 4.16. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu ITU-R P.1411 dla średnich miast i dla  $f = 500 \text{ MHz}$  (poza zakresem stosowalności)

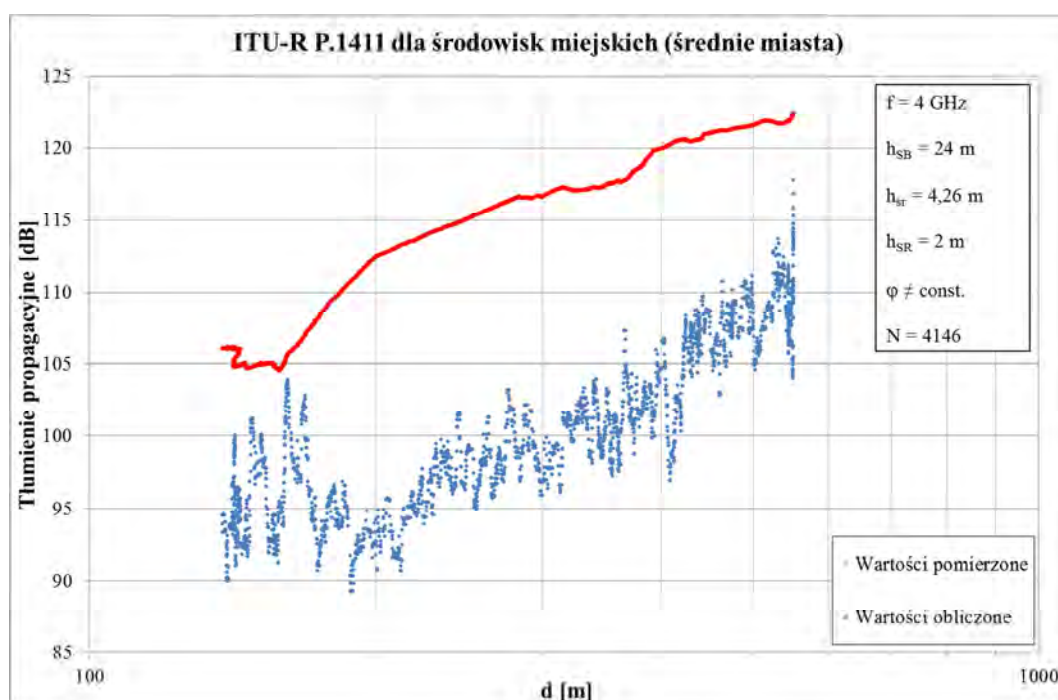


Rys. 4.17. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu ITU-R P.1411 dla średnich miast i dla  $f = 1000 \text{ MHz}$  (zakres stosowalności)





Rys. 4.18. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu ITU-R P.1411 dla średnich miast i dla  $f = 2000 \text{ MHz}$  (zakres stosowności)



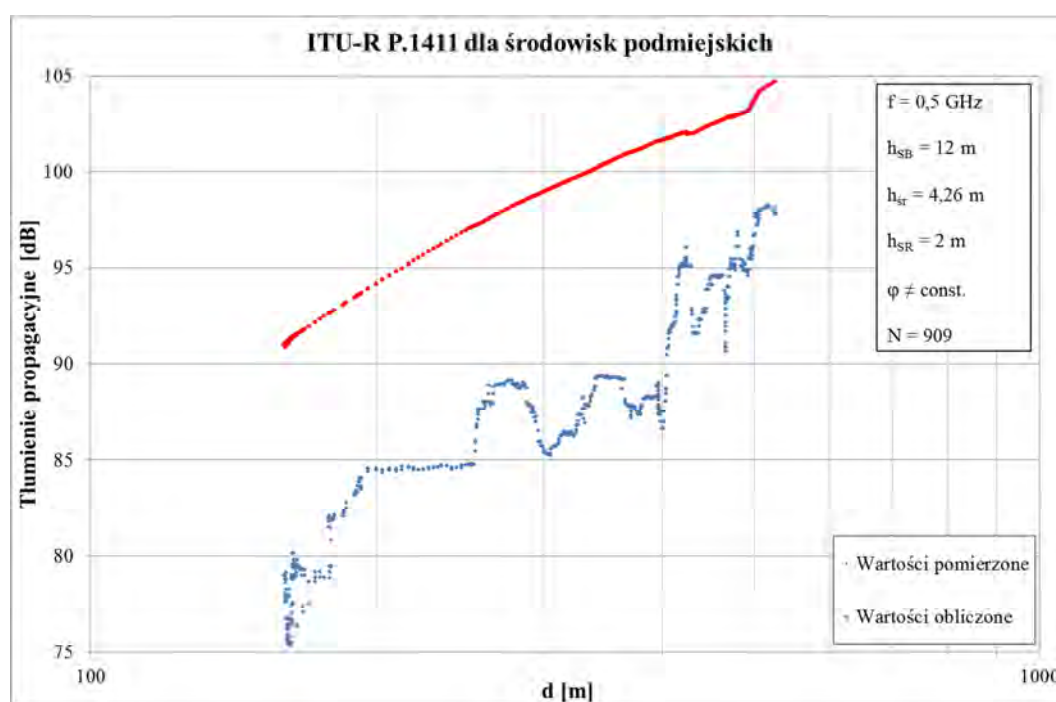
Rys. 4.19. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu ITU-R P.1411 dla średnich miast i dla  $f = 4000 \text{ MHz}$  (zakres stosowności)

Powyższe wykresy potwierdzają nieprzydatność tego modelu do szacowania tłumienia fali radiowej w badanym środowisku.

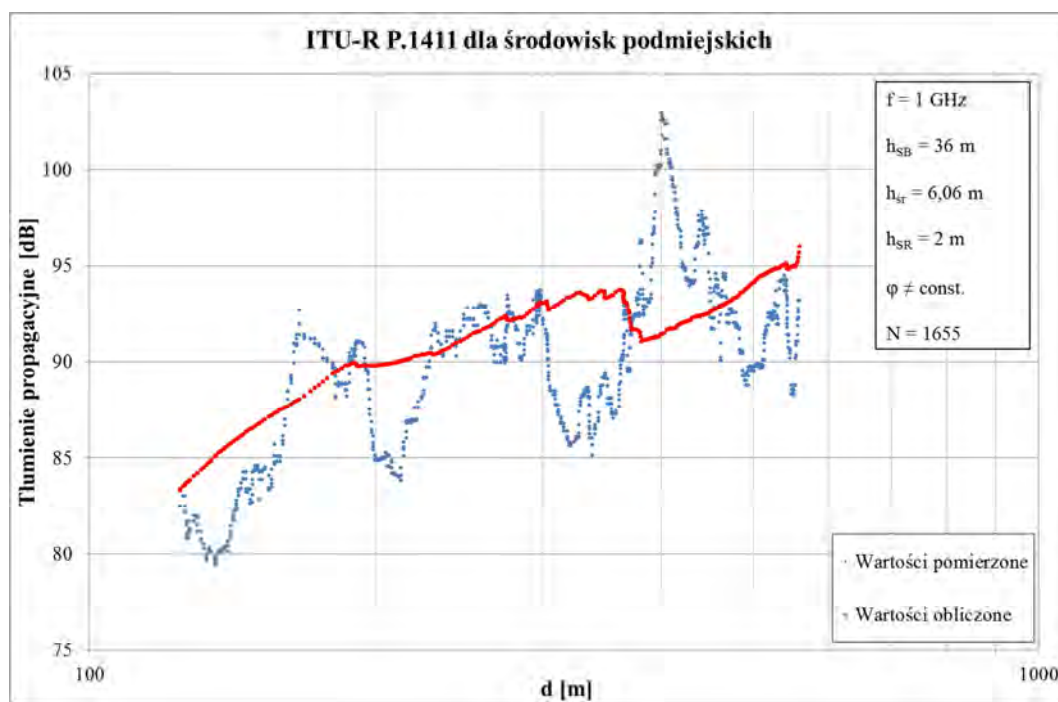
#### 4.2.4. Analiza modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich

Wyniki uzyskane podczas szacowania wartości tłumienia propagacyjnego w systemach ruchomych na terenie terminalu kontenerowego przy użyciu modelu z zalecenia ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich są lepsze niż dla przypadku poprzedniego, jednak uzyskane wartości błędów także wykluczają możliwość zastosowania niezmienniczej postaci tego modelu z zadowalającą dokładnością. Dla danych z zakresu stosowności modelu błąd średni wyniósł -5,9 dB, natomiast uzyskany błąd standardowy estymacji jest na poziomie 10,8 dB. W przypadku wzięcia pod uwagę wszystkich pomierzonych danych błędy te wynoszą odpowiednio: -4,5 dB i 10 dB. Ten model również przeszacowuje wartości tłumienia fali radiowej w porównaniu z wartościami pomierzonymi.

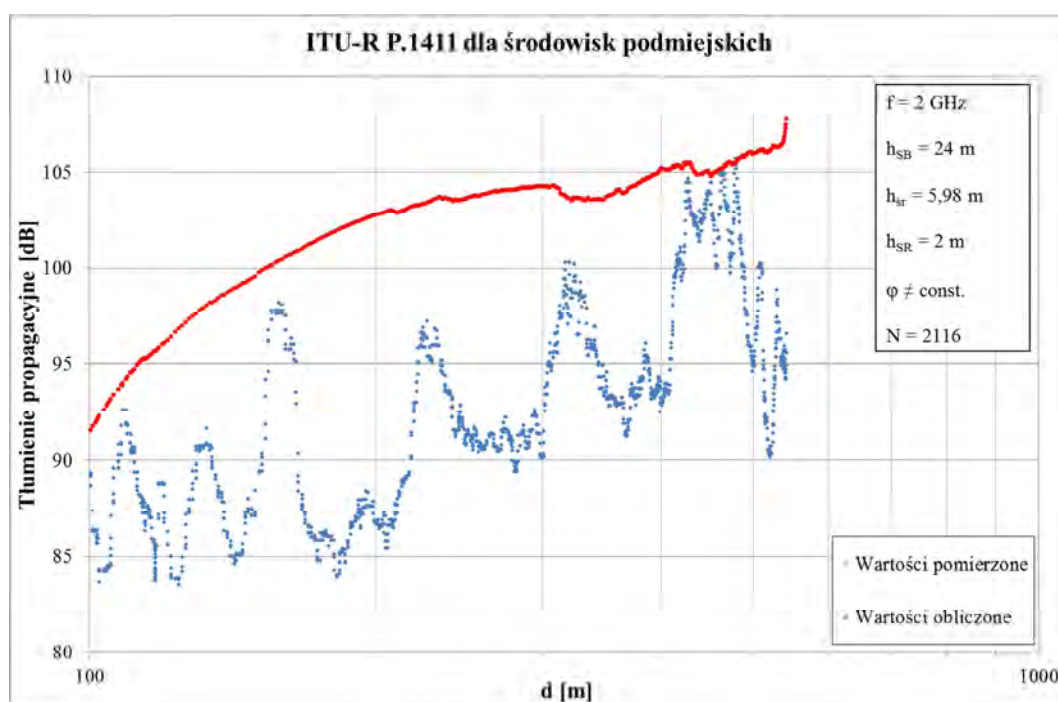
Na rys. 4.20 – 4.23 przedstawiono przykładowe wykresy tłumienia propagacyjnego pomierzonego i obliczone przy użyciu analizowanego modelu, dla różnych wartości parametrów modelu oraz dla danych pomiarowych zarówno z zakresu stosowności tego modelu, jak i spoza tego zakresu. Wykresy te potwierdzają w sposób graficzny fakt przeszacowywania wartości tłumienia w odniesieniu do jego wartości pomierzonych.



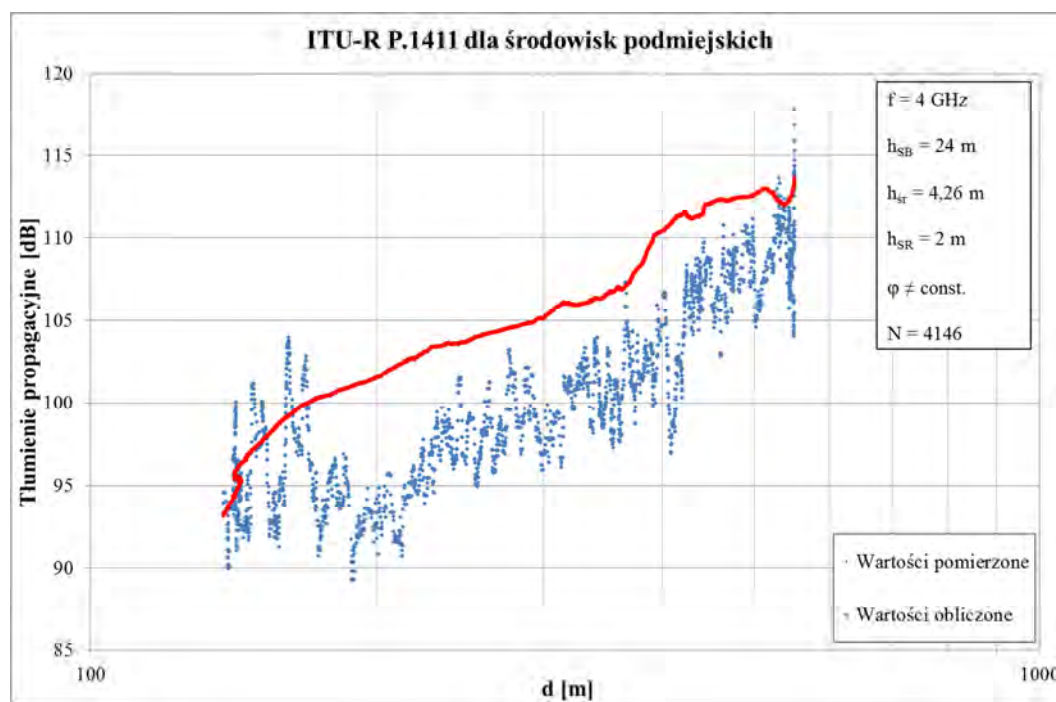
Rys. 4.20. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich i dla  $f = 500$  MHz (poza zakresem stosowności)



Rys. 4.21. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich i dla  $f = 1000 \text{ MHz}$  (zakres stosowności)



Rys. 4.22. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich i dla  $f = 2000 \text{ MHz}$  (zakres stosowności)



Rys. 4.23. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich i dla  $f = 4000$  MHz (poza zakresem stosowalności)

W podrozdziale przedstawiona została analiza przydatności wybranych modeli propagacyjnych do projektowania ruchomych systemów radiowych w warunkach terminalu kontenerowego. Została ona przeprowadzona na podstawie oceny dopasowania wybranych modeli do danych uzyskanych w wyniku badań pomiarowych. Analiza ta wykazała niedostateczne dopasowanie tych modeli do danych eksperymentalnych. W takim stanie rzeczy konieczne jest zwiększenie dokładności szacowania tłumienia fal radiowych w ruchomych systemach bezprzewodowych, pracujących w nietypowych środowiskach propagacyjnych. W pierwszej kolejności zwiększono tę dokładność poprzez modyfikację istniejących modeli, co zostało opisane w następnym podrozdziale.

### 4.3. Statystyczne dopasowanie wybranych modeli propagacyjnych

Dopasowanie statystyczne modeli jest powszechnie stosowane w przypadku konieczności użycia istniejącego modelu dla innego zakresu częstotliwości, bądź dla nowego środowiska propagacyjnego [1, 58, 61, 110]. Polega to na dopasowaniu modelu do danych empirycznych zgromadzonych podczas szczegółowych pomiarów w danym środowisku [98].

Statystyczne dopasowanie wybranych modeli propagacyjnych do warunków panujących w środowisku przemysłowym zostało zrealizowane poprzez dodanie funkcji

korekcyjnych do oryginalnych modeli. Argumenty tych funkcji są zgodne z parametrami charakterystycznymi poszczególnych modeli, a sposób ich dodania do oryginalnych postaci modelu nie jest przypadkowy i został poprzedzony rozległymi badaniami wstępnymi, których rezultaty przedstawione zostały w [6, 10].

Estymatory współczynników każdej z funkcji korekcyjnych uzyskane zostały w wyniku przeprowadzenia wielowymiarowej (wielorakiej) regresji liniowej (patrz podrozdział 3.2.3) w oparciu o zbiór wyników pomiarów tłumienia propagacyjnego, uzyskanych na terenie DCT Gdańsk. Dla uproszczenia w dalszej części rozprawy estymatory te nazywane są skrótowo współczynnikami. Ponadto każda z funkcji korekcyjnych została poddana analizie statystycznej zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziałach 3.3.2 i 3.3.3. Wielowymiarowa regresja jest bardzo powszechnie stosowana przy dopasowywaniu modeli do konkretnych środowisk propagacyjnych, tak jak miało to miejsce między innymi w [2].

Dla przypomnienia, istotność statystyczna poszczególnych współczynników funkcji korekcyjnych została potwierdzona poprzez porównanie obliczonej ze wzoru (3.59) wartości statystyki testowej  $t$  z wartością krytyczną testu, która dla założonego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  wynosi  $t_{0,05} = 1,96$ . Dany współczynnik istotnie różni się od zera, jeśli spełniona jest nierówność  $|t| \geq t_{0,05}$ .

Ocena istotności regresji zrealizowana została przy użyciu statystyki testowej  $F$ , wyrażonej zależnością (3.60), której obliczona wartość porównana została z wartością  $F_{0,05}$  krytyczną testu na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Wartość ta zależy od liczby  $k$  zmiennych objaśniających modelu, co zostało przedstawione w tab. 3.1. Uzyskana w wyniku regresji funkcja korekcyjna ma uzasadnienie jedynie wtedy, gdy jest ona istotna statystycznie, tzn. gdy  $|F| \geq F_{0,05}$ .

Po przeanalizowaniu istotności poszczególnych funkcji korekcyjnych ocenie poddane zostały zmodyfikowane modele, dopasowane do warunków panujących w badanym środowisku propagacyjnym. Do tego celu zastosowano błąd średni  $ME$  oraz standardowy błąd estymacji  $SEE$ , wyrażone odpowiednio równaniami (4.48) i (4.49), przy czym należy pamiętać, że w przypadku obliczania błędu średniego na podstawie tej samej próby, która wykorzystana została do oszacowania współczynników funkcji regresji, jego wartość zawsze będzie równa 0, co jest wynikiem własności zastosowanej metody najmniejszych kwadratów. Dodatkowo obliczono wartości współczynników indeterminacji

( $\varphi^2$ ) i determinacji ( $R^2$ ), korzystając z zależności odpowiednio (3.64) i (3.65), przy czym dla analizowanego w niniejszej rozprawie przypadku, współczynnik indeterminacji można zapisać w sposób następujący:

$$\varphi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (L_{p,i} - L_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^N (L_{p,i} - L_{p,\bar{s}r})^2}, \quad (4.50)$$

gdzie:

- $L_{o,i}$  –  $i$ -ta wartość tłumienia propagacyjnego, oszacowana na podstawie analizowanego modelu,
- $L_{p,i}$  – pomierzona  $i$ -ta wartość tłumienia propagacyjnego,
- $L_{p,\bar{s}r}$  – wartość średnia pomierzonego tłumienia propagacyjnego,
- $N$  – liczebność próby (liczba pomierzonych wartości tłumienia propagacyjnego).

Przypomnieć należy, że współczynnik determinacji  $R^2$  określa liczbowo jaka część zmienności tłumienia propagacyjnego została wyjaśniona przez analizowany model matematyczny, natomiast współczynnik indeterminacji  $\varphi^2$  określa jaka część jego zmienności ma swoje źródło w działaniu innych przyczyn, nieuwzględnionych w danym modelu.

W celu uogólnienia wartości współczynnika determinacji, ze wzoru (3.66) obliczony został poprawiony współczynnik determinacji ( $R_{popr}^2$ ), który uwzględnia wpływ liczby zmiennych niezależnych modelu.

Uzyskane wyniki zaprezentowane zostały w kolejnych podrozdziałach wraz z przykładowymi wykresami tłumienia propagacyjnego.

#### **4.3.1. Dopasowanie modelu dla systemów dostępowych pracujących na terenie terminalu kontenerowego**

W przypadku modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym, dla sytuacji LOS1, opisaną zależnością (4.2) i dla sytuacji NLOS1, opisaną wzorem (4.4), dopasowanie polegało na dodaniu dwóch funkcji korekcyjnych:  $\Delta L_{LOS1}(f, d, h_{SB} - h_{sr})$  i  $\Delta L_{NLOS1}(f, d, h_{SB} - h_{sr})$  w następujący sposób:

$$L'_{LOS1} [dB] = L_{LOS1} [dB] + \Delta L_{LOS1} [dB], \quad (4.51)$$

$$L'_{NLOS1} [dB] = L_{NLOS1} [dB] + \Delta L_{NLOS1} [dB]. \quad (4.52)$$

Parametry charakterystyczne modelu stanowią jednocześnie argumenty funkcji korekcyjnych, przy czym dla sytuacji LOS1 funkcja korekcyjna nie ma wyrazu wolnego, gdyż we wstępnym etapie obliczenia wykazały, że jest on nieistotny statystycznie. Obie funkcje korekcyjne można zapisać jak niżej:

$$\begin{aligned} \Delta L_{LOS1} [dB] &= L_p [dB] - L_{LOS1} [dB] = \\ &= a_L \log(f [MHz]) + b_L \log(d [km]) + c_L \log(h_{SB} [m] - h_{sr} [m]), \end{aligned} \quad (4.53)$$

$$\begin{aligned} \Delta L_{NLOS1} [dB] &= L_p [dB] - L_{NLOS1} [dB] = \\ &= a_N \log(f [MHz]) + b_N \log(d [km]) + c_N \log(h_{SB} [m] - h_{sr} [m]) + d_N, \end{aligned} \quad (4.54)$$

gdzie  $L_p$  stanowi wartość tłumienia propagacyjnego wynikająca z pomiarów.

Współczynniki tak zdefiniowanych funkcji korekcyjnych zostały wyznaczone przy użyciu wielorakiej regresji liniowej, a ich wartości, wraz z wynikami przeprowadzonej analizy statystycznej zebrane zostały w tab. 4.2.

Tab. 4.2. Zestawienie współczynników funkcji korekcyjnych oraz wyników analizy istotności dla modelu dla systemów dostępowych

	$\Delta L_{LOS1}(f, d, h_{SB} - h_{sr})$			$\Delta L_{NLOS1}(f, d, h_{SB} - h_{sr})$			
$\hat{\beta}_i$	$a_L$	$b_L$	$c_L$	$a_N$	$b_N$	$c_N$	$d_N$
	<b>-0,2</b>	<b>14</b>	<b>11,3</b>	<b>-0,2</b>	<b>11,9</b>	<b>-11,6</b>	<b>22,5</b>
$s_{\hat{\beta}_i}$	$s_{a_L}$	$s_{b_L}$	$s_{c_L}$	$s_{a_N}$	$s_{b_N}$	$s_{c_N}$	$s_{d_N}$
	0,0124	0,0337	0,0317	0,0319	0,0342	0,0353	0,1193
$t$	-16,1	415,4	356,5	-6,3	348,0	-328,6	188,6
$N$	287582			287582			
$k$	3			3			
$F_{0,05}$	2,6			2,6			
$F$	138117			78144			

Uzyskane wyniki pozwalają zapisać ostateczną postać funkcji korekcyjnych:

$$\Delta L_{LOS1} [dB] = -0,2 \log f + 14 \log d + 11,3 \log (h_{SB} - h_{sr}), \quad (4.55)$$

$$\Delta L_{NLOS1} [dB] = -0,2 \log f + 11,9 \log d - 11,6 \log (h_{SB} - h_{sr}) + 22,5, \quad (4.56)$$

których dodanie do odpowiednich zależności oryginalnego modelu umożliwia szacowanie tłumienia z dokładnością, której liczbowym odzwierciedleniem są wyniki analizy przystawalności zmodyfikowanego modelu do danych pomiarowych, zebrane w tab. 4.3.

Tab. 4.3. Zestawienie wyników analizy przydatności dopasowanego modelu dla systemów dostępowych do szacowania tłumienia propagacyjnego w radiowym systemie ruchomym w warunkach terminalu kontenerowego

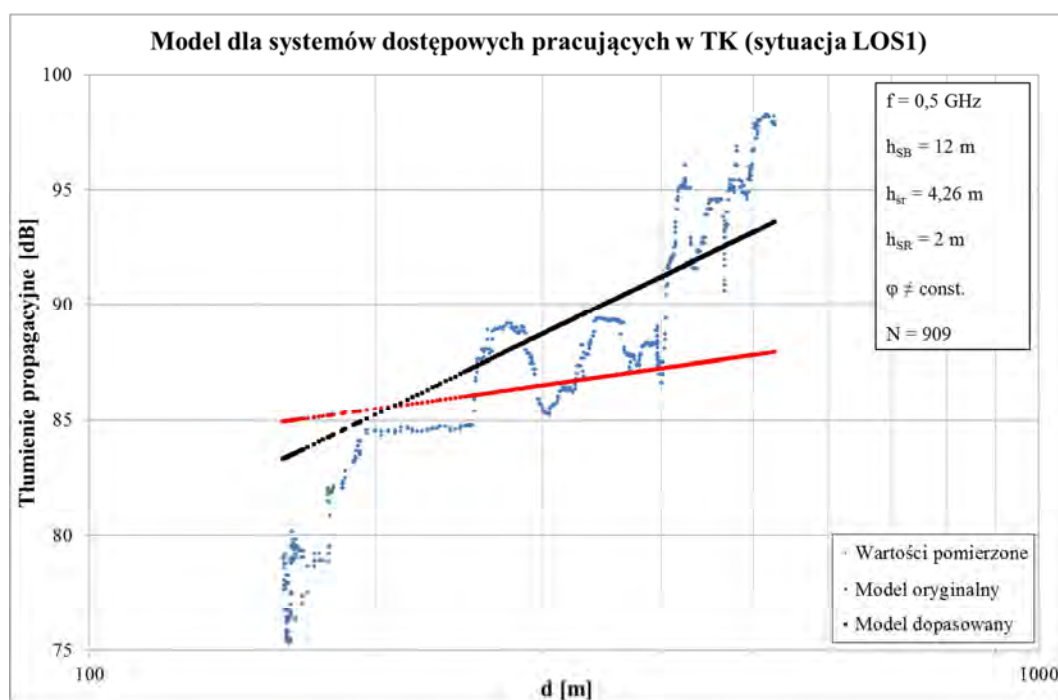
	Dla sytuacji LOS1	Dla sytuacji NLOS1
$N$	287582	287582
$\varphi^2$	0,248	0,248
$R^2$	0,752	0,752
$R^2_{popr}$	0,752	0,752
$ME [dB]$	0	0
$SEE [dB]$	5,3	5,3

Łatwo zauważyć, że po dodaniu funkcji korekcyjnych do oryginalnego modelu dla obu sytuacji, tak zmodyfikowane modele są prawie identyczne, tzn.  $L'_{LOS1} \approx L'_{NLOS1}$ . Wnika to z faktu, że do wyznaczenia współczynników funkcji korekcyjnych użyto wszystkich danych pomiarowych, bez podziału na sytuacje LOS i NLOS. Zastosowanie tej samej serii danych do równań o tej samej postaci powoduje, że metoda regresji zawsze doprowadza ich współczynniki do takiej samej wartości, niezależnie od wartości początkowych (z oryginalnego modelu). W związku z powyższym uzyskane wyniki oceny przystawalności są identyczne dla obu badanych sytuacji modelu. Standardowy błąd estymacji na poziomie 5,3 dB wskazują na względnie dobre dopasowanie zmodyfikowanych modeli do danych pomiarowych. Współczynnik indeterminacji wynosi 0,248, z kolei poprawiony współczynnik determinacji, wynoszący 0,752 pozwala stwierdzić, że przeszło 75% zmienności tłumienia propagacyjnego zostało wyjaśnione przez zmodyfikowany model.

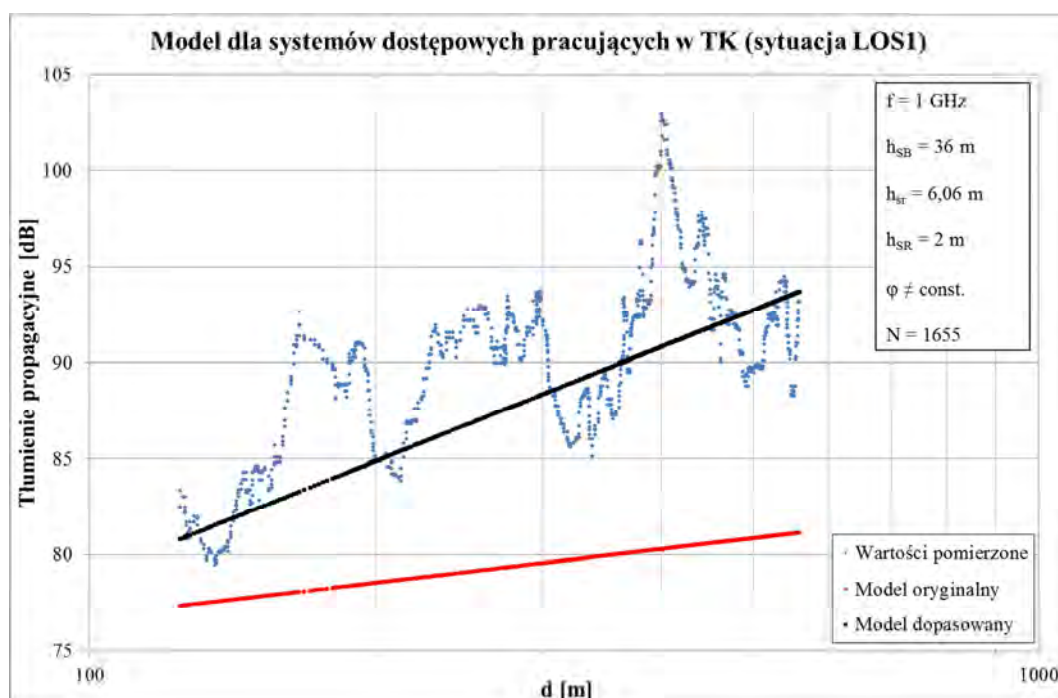
Porównanie wykresów tłumienia propagacyjnego obliczonego na podstawie modelu oryginalnego i dopasowanego, na tle wartości pomierzonych, przedstawione zostało na rys. 4.24 – 4.27 dla sytuacji LOS1 oraz na rys. 4.28 – 4.31 dla sytuacji NLOS1. Na



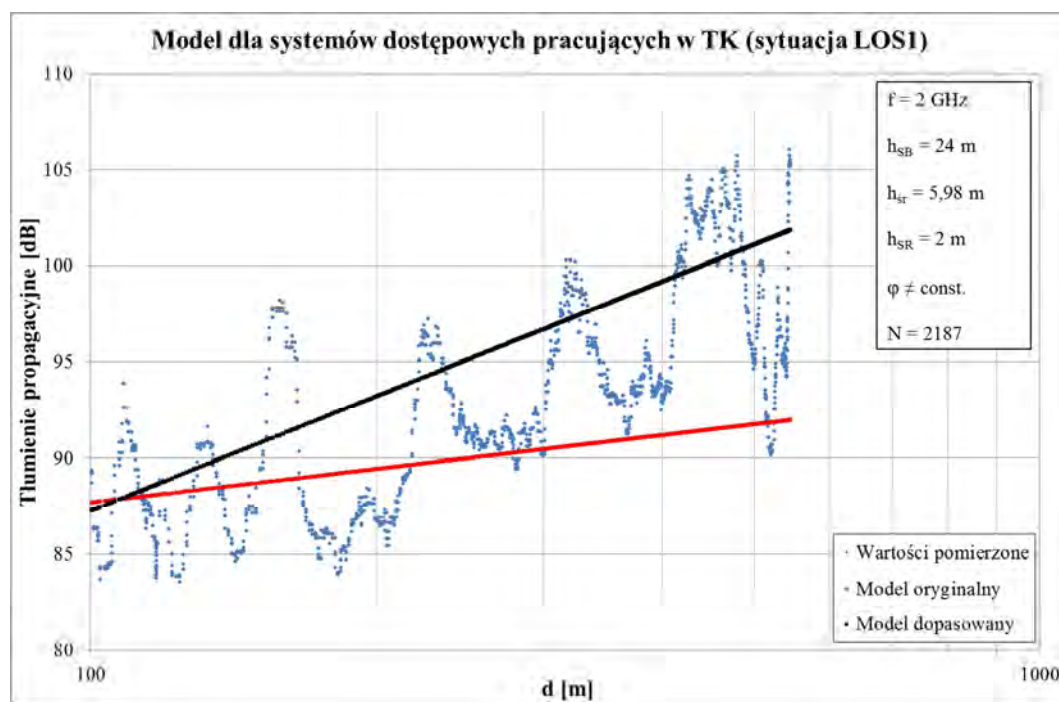
wykresach zauważyć można znaczącą poprawę dopasowania wartości obliczonych przy użyciu zmodyfikowanego modelu do danych empirycznych, co skutkuje lepszym przewidywaniem zmian tłumienia przy zmianach poszczególnych parametrów modelu.



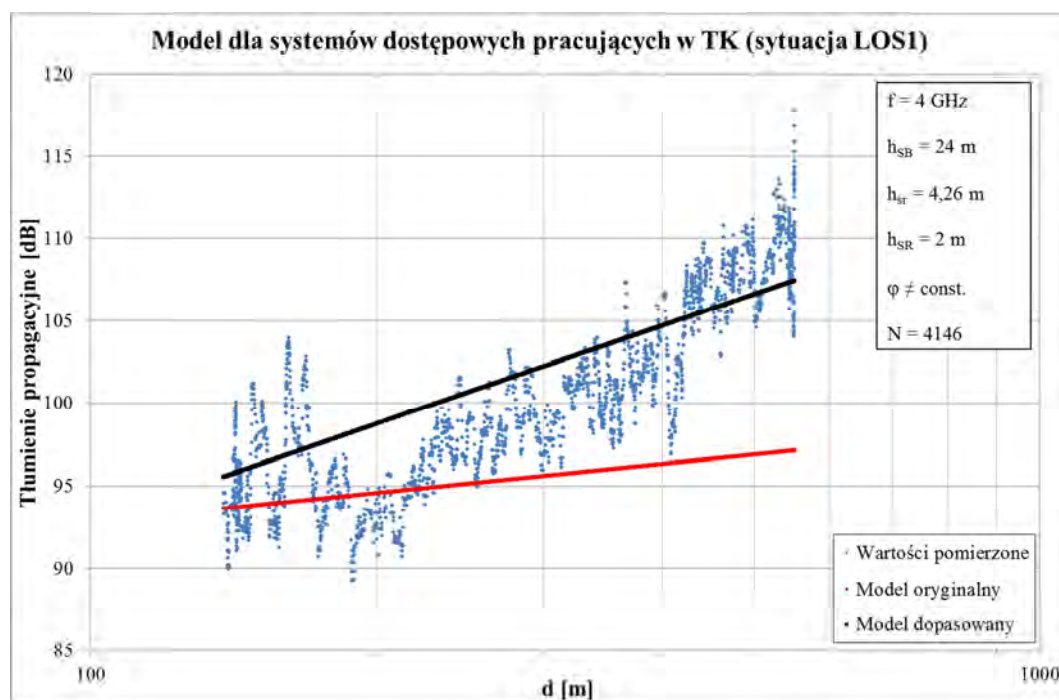
Rys. 4.24. Porównanie modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji LOS1 i dla  $f = 500 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



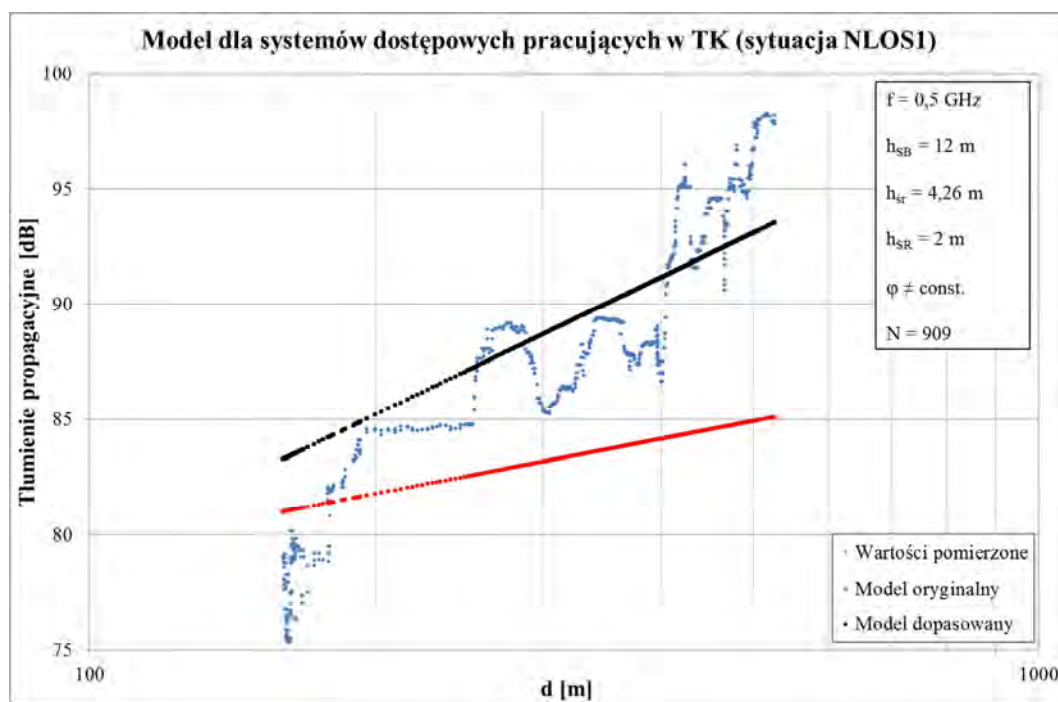
Rys. 4.25. Porównanie modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji LOS1 i dla  $f = 1000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



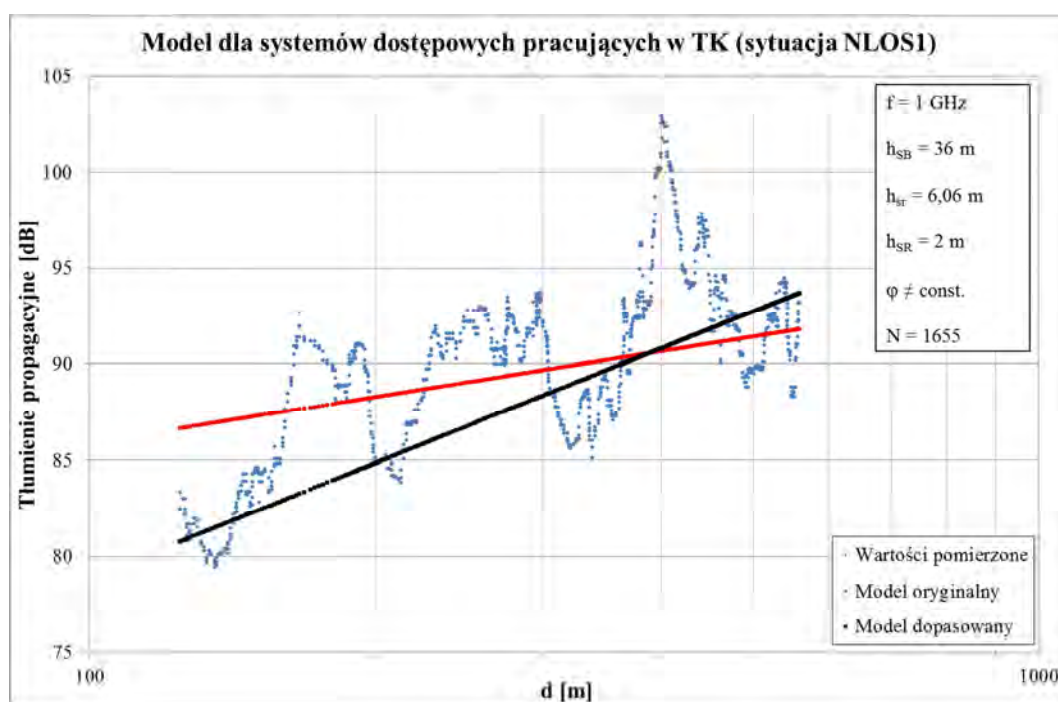
Rys. 4.26. Porównanie modelu dla systemów dostępnych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji LOS1 i dla  $f = 2000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



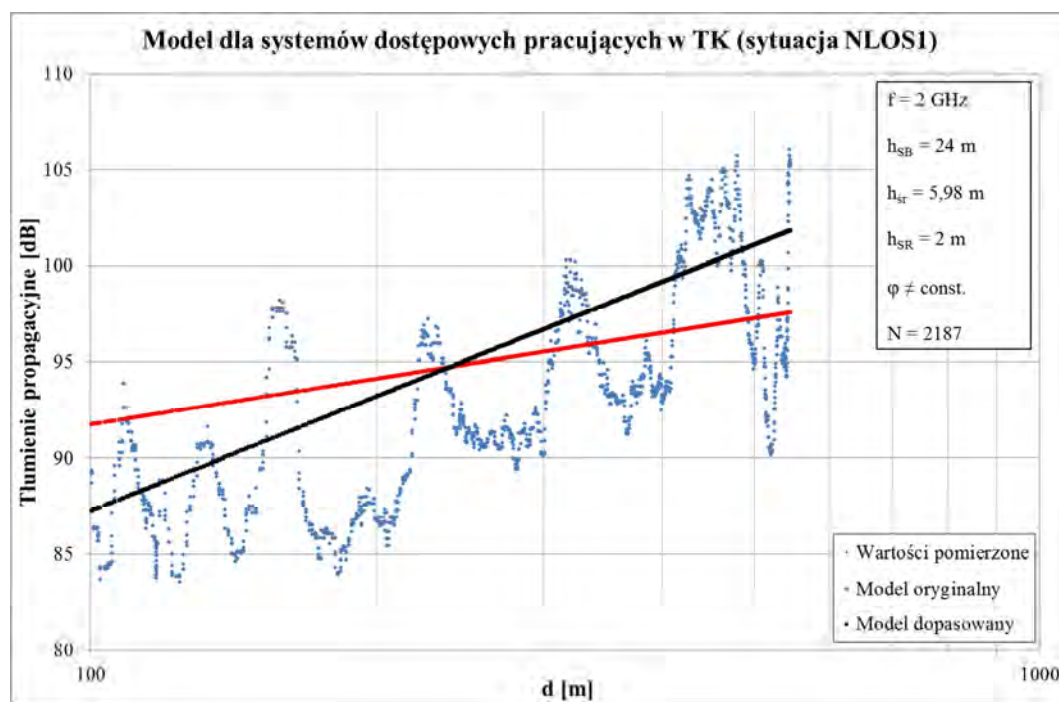
Rys. 4.27. Porównanie modelu dla systemów dostępnych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji LOS1 i dla  $f = 4000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



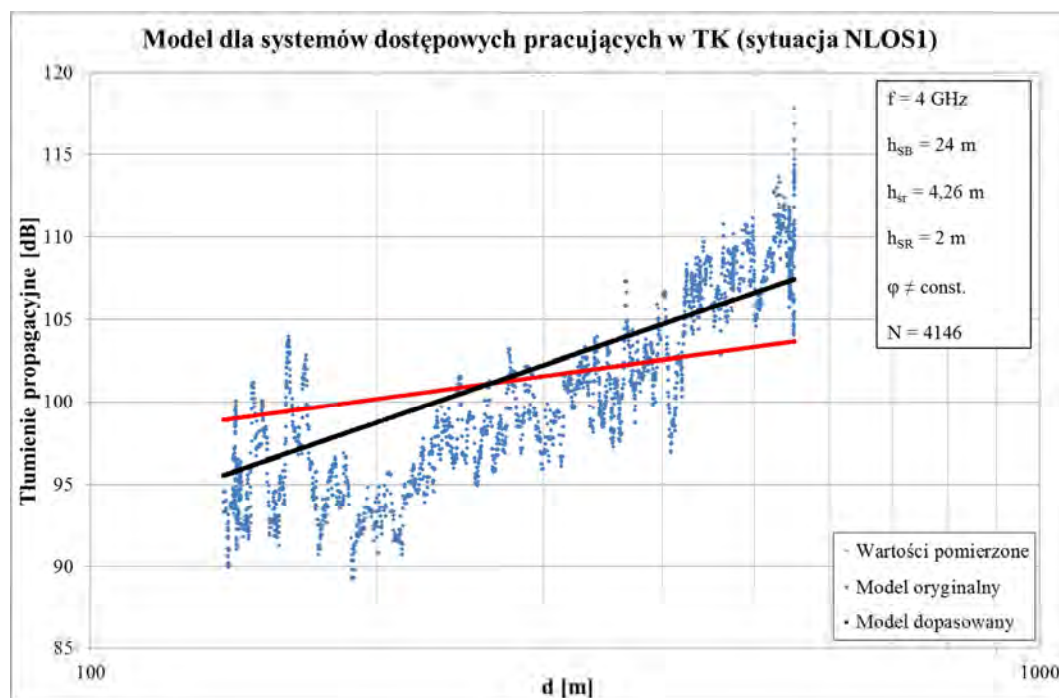
Rys. 4.28. Porównanie modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji NLOS1 i dla  $f = 500 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



Rys. 4.29. Porównanie modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji NLOS1 i dla  $f = 1000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



Rys. 4.30. Porównanie modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji NLOS1 i dla  $f = 2000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



Rys. 4.31. Porównanie modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym dla sytuacji NLOS1 i dla  $f = 4000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu

### 4.3.2. Dopasowanie modelu COST 231 Walfischa-Ikegamiiego

Model COST 231 Walfischa-Ikegamiiego został zmodyfikowany poprzez dodanie do podstawowej zależności na tłumienie propagacyjne (patrz wzór (4.6)) dwóch funkcji korekcyjnych  $\Delta L_{WI1}(f, d, \Delta h_{SR}, \Delta h_{SB}, \varphi)$  i  $\Delta L_{WI2}(f, d)$  w sposób następujący:

$$L'_{WI} [dB] = \begin{cases} L_{wp} + L_{rts} + L_{msd} + \Delta L_{WI1} & \text{dla } L_{rts} + L_{msd} > 0, \\ L_{wp} + \Delta L_{WI2} & \text{dla } L_{rts} + L_{msd} \leq 0. \end{cases} \quad (4.57)$$

Funkcje korekcyjne zostały uzależnione od parametrów charakterystycznych modelu i wyrażone zostały poniższymi wyrażeniami:

$$\begin{aligned} \Delta L_{WI1} [dB] &= L_p [dB] - L_{wp} [dB] - L_{rts} [dB] - L_{msd} [dB] = \\ &= a_{WI1} \log(f [MHz]) + b_{WI1} \log(d [km]) + c_{WI1} \log(\Delta h_{SR} [m]) + \\ &+ d_{WI1} \log(\Delta h_{SB} [m]) + e_{WI1} \varphi [^\circ] + f_{WI1}, \end{aligned} \quad (4.58)$$

$$\begin{aligned} \Delta L_{WI2} [dB] &= L_p [dB] - L_{wp} [dB] = \\ &= a_{WI2} \log(f [MHz]) + b_{WI2} \log(d [km]) + c_{WI2}. \end{aligned} \quad (4.59)$$

Współczynniki powyższych funkcji obliczone zostały przy użyciu wielowymiarowej regresji liniowej zarówno dla wersji modelu przeznaczonej dla terenów podmiejskich, jak i dla centrów dużych miast. Wartości tych współczynników, wraz z wynikami przeprowadzonej analizy statystycznej zebrane zostały w tab. 4.4 dla terenów podmiejskich i tab. 4.5 dla centrów dużych miast.

Tab. 4.4. Zestawienie współczynników funkcji korekcyjnych oraz wyników analizy istotności dla modelu COST 231 Walfischa-Ikegamiiego w wariancie dla terenów podmiejskich

	$\Delta L_{WI1}^p(f, d, \Delta h_{SR}, \Delta h_{SB}, \varphi)$						$\Delta L_{WI2}^p(f, d)$		
$\hat{\beta}_i$	$a_{WI1}$	$b_{WI1}$	$c_{WI1}$	$d_{WI1}$	$e_{WI1}$	$f_{WI1}$	$a_{WI2}$	$b_{WI2}$	$c_{WI2}$
	<b>-17,9</b>	<b>-15,0</b>	<b>-12,9</b>	<b>5,2</b>	<b>-0,08</b>	<b>48,2</b>	<b>2,3</b>	<b>-9,1</b>	<b>-8,7</b>
$s_{\hat{\beta}_i}$	$s_{a_{WI1}}$	$s_{b_{WI1}}$	$s_{c_{WI1}}$	$s_{d_{WI1}}$	$s_{e_{WI1}}$	$s_{f_{WI1}}$	$s_{a_{WI2}}$	$s_{b_{WI2}}$	$s_{c_{WI2}}$
	0,0348	0,0433	0,0912	0,0361	0,00045	0,1309	0,1235	0,0967	0,3238
$t$	-514,4	-346,4	-141,5	144,0	-177,8	368,2	18,6	-94,1	-26,9
$N$	269308						18274		
$k$	5						2		
$F_{0,05}$	2,21						3,04		
$F$	89535						8455		

Tab. 4.5. Zestawienie współczynników funkcji korekcyjnych oraz wyników analizy istotności dla modelu COST 231 Walfischa-Ikegamiiego w wariancie dla centrów dużych miast

	$\Delta L_{WI1}^C(f, d, \Delta h_{SR}, \Delta h_{SB}, \varphi)$						$\Delta L_{WI2}^C(f, d)$		
$\hat{\beta}_i$	$a_{WI1}$	$b_{WI1}$	$c_{WI1}$	$d_{WI1}$	$e_{WI1}$	$f_{WI1}$	$a_{WI2}$	$b_{WI2}$	$c_{WI2}$
	<b>-31,9</b>	<b>-16,7</b>	<b>-8,8</b>	<b>5,5</b>	<b>-0,09</b>	<b>86,7</b>	<b>5,9</b>	<b>-7,5</b>	<b>-16,8</b>
$s_{\hat{\beta}_i}$	$s_{a_{WI1}}$	$s_{b_{WI1}}$	$s_{c_{WI1}}$	$s_{d_{WI1}}$	$s_{e_{WI1}}$	$s_{f_{WI1}}$	$s_{a_{WI2}}$	$s_{b_{WI2}}$	$s_{c_{WI2}}$
	0,0381	0,0438	0,0983	0,0389	0,00048	0,1429	0,1809	0,1046	0,4671
$t$	-837,3	-381,3	-89,5	141,4	-187,5	606,7	32,6	-71,7	-36,0
$N$	270978						16604		
$k$	5						2		
$F_{0,05}$	2,21						3,04		
$F$	176175						6955		

Uzyskane wyniki pozwalają zapisać ostateczną postać funkcji korekcyjnych dla wariantu dla terenów podmiejskich:

$$\Delta L_{WI1}^P [dB] = -17,9 \log(f [MHz]) - 15 \log(d [km]) + \\ -12,9 \log(\Delta h_{SR} [m]) + 5,2 \log(\Delta h_{SB} [m]) - 0,08 \varphi [^\circ] + 48,2, \quad (4.60)$$

$$\Delta L_{WI2}^P [dB] = 2,3 \log(f [MHz]) - 9,1 \log(d [km]) - 8,7, \quad (4.61)$$

oraz dla wariantu dla centrów dużych miast:

$$\Delta L_{WI1}^C [dB] = -31,9 \log(f [MHz]) - 16,7 \log(d [km]) + \\ -8,8 \log(\Delta h_{SR} [m]) + 5,5 \log(\Delta h_{SB} [m]) - 0,09 \varphi [^\circ] + 86,7, \quad (4.62)$$

$$\Delta L_{WI2}^C [dB] = 5,9 \log(f [MHz]) - 7,5 \log(d [km]) - 16,8, \quad (4.63)$$

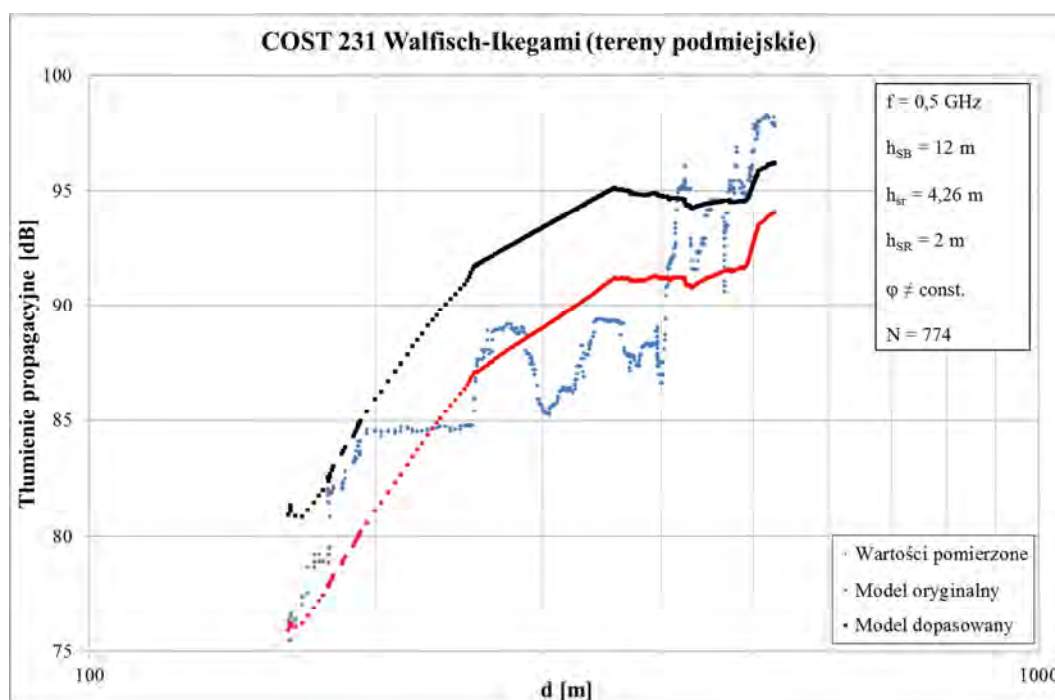
Dodanie powyższych funkcji korekcyjnych do odpowiednich zależności oryginalnego modelu umożliwia szacowanie tłumienia propagacyjnego w radiowych systemach ruchomych w warunkach terminalu kontenerowego. Jakość dopasowania zmodyfikowanego modelu do badanych warunków wrażliwą wyniki analizy zebrane w tab. 4.6.



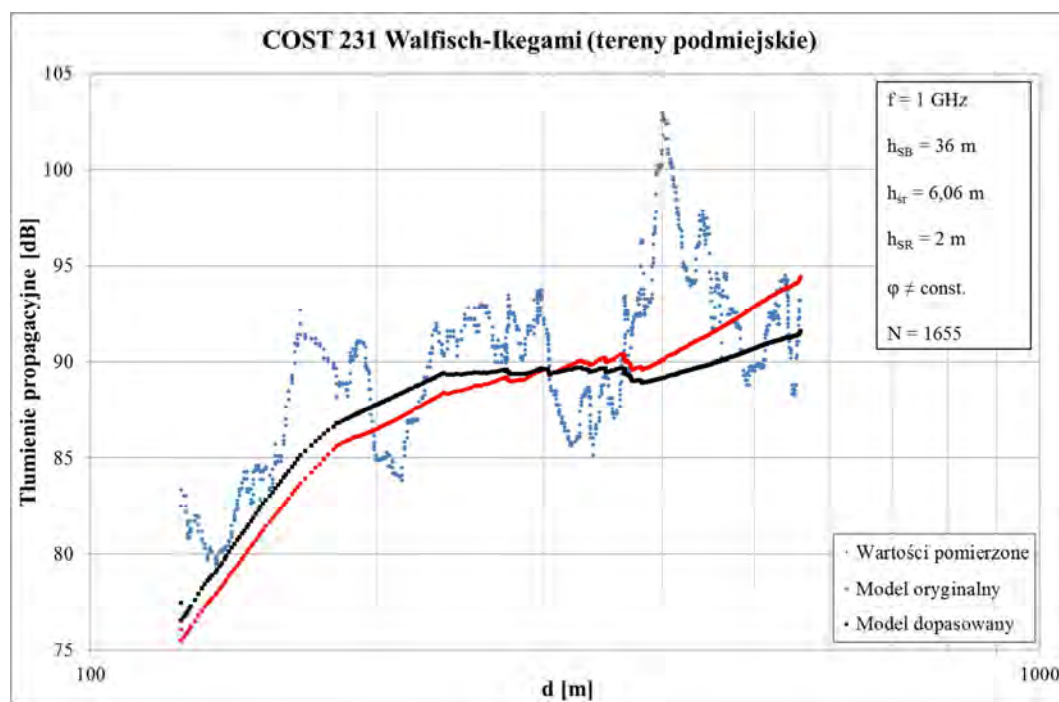
Tab. 4.6. Zestawienie wyników analizy przydatności dopasowanego modelu COST 231 Walfischa-Ikegami do szacowania tłumienia propagacyjnego w radiowym systemie ruchomym w warunkach terminalu kontenerowego

	Wariant dla terenów podmiejskich	Wariant dla centrów dużych miast
$N$	287582	287582
$\varphi^2$	0,242	0,282
$R^2$	0,758	0,718
$R^2_{popr}$	0,758	0,718
$ME [dB]$	0	0
$SEE [dB]$	5,2	5,7

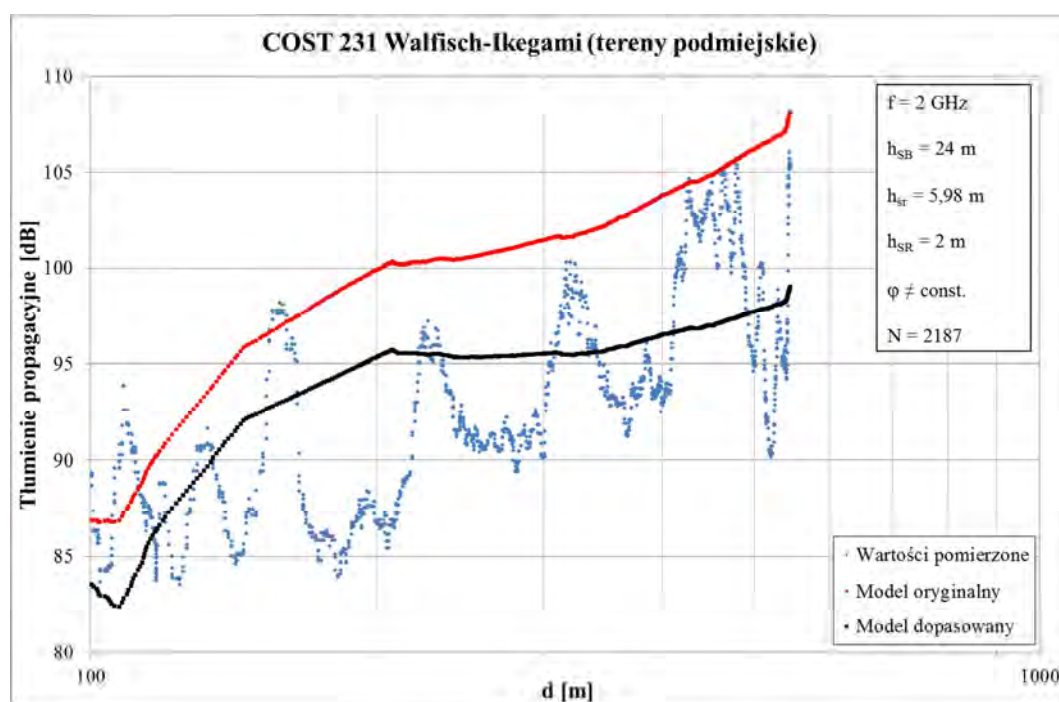
Na rys. 4.32 – 4.35 przedstawione zostały przykładowe wykresy tłumienia propagacyjnego obliczonego przy pomocy oryginalnego i zmodyfikowanego modelu Walfischa-Ikegami dla wariantu przeznaczonego dla terenów podmiejskich. Podobnie jak miało to miejsce w przypadku wykresów z rys. 4.15 i 4.19, niejednoznaczność tłumienia propagacyjnego dla najkrótszych długości trasy propagacyjnej (rys. 4.35) jest wynikiem różnych wartości kąta orientacji ulicy względem fali bezpośredniej. Podobna sytuacja ma miejsce na wykresach z rys. 4.39 i 4.43.



Rys. 4.32. Porównanie modelu Walfischa-Ikegami dla terenów podmiejskich i dla  $f = 500 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu

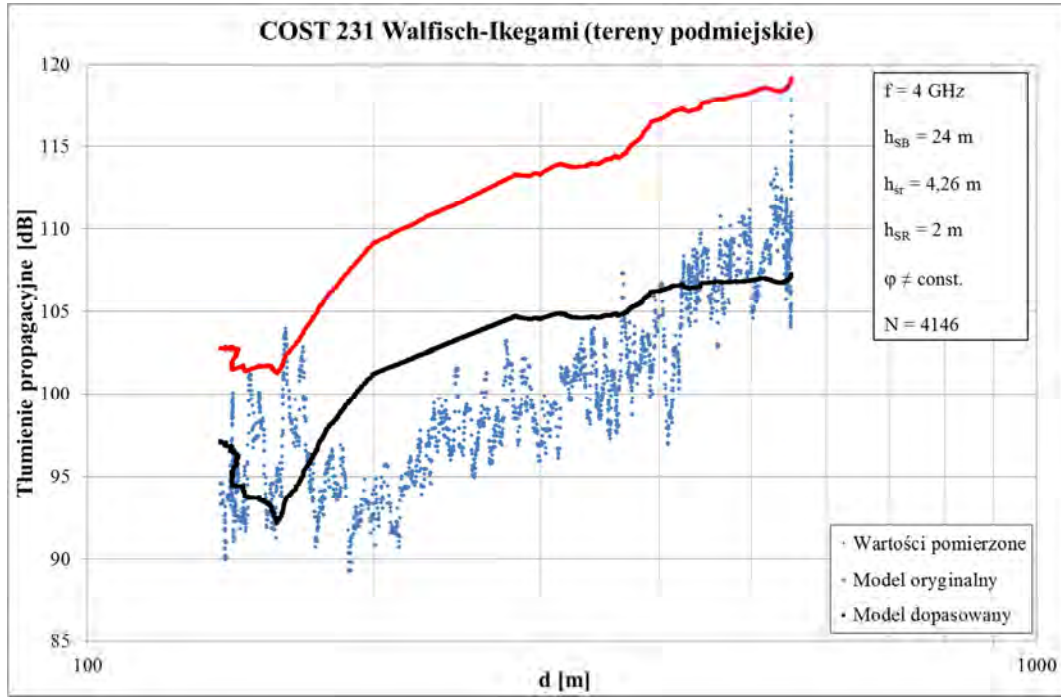


Rys. 4.33. Porównanie modelu Walfischa-Ikegami dla terenów podmiejskich i dla  $f = 1000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



Rys. 4.34. Porównanie modelu Walfischa-Ikegami dla terenów podmiejskich i dla  $f = 2000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu





Rys. 4.35. Porównanie modelu Walfischa-Ikegami dla terenów podmiejskich i dla  $f = 4000$  MHz przed i po dopasowaniu

Na wykresach można zauważyć, że w zdecydowanej większości przypadków zmodyfikowany model jest lepiej dopasowany do danych empirycznych niż model oryginalny. Wyjątkiem od powyższego jest sytuacja z rys. 4.32, gdzie model oryginalny zdaje się lepiej odzwierciedlać rzeczywiste wartości tłumienia propagacyjnego. Wynika to z faktu, że liczebność przedstawionego na wykresie fragmentu serii pomiarowej jest stosunkowo nieduża ( $N = 774$ ), a co za tym idzie ten podzbiór danych miał mały wpływ na wartości współczynników funkcji korekcyjnych. Jest to jednak sytuacja szczególna, nie mająca wpływu na statystyczną ocenę modelu zmodyfikowanego.

#### 4.3.3. Dopasowanie modelu ITU-R P.1411 dla środowisk miejskich

W przypadku modelu z zalecenia ITU-R P.1411 przeznaczonego dla środowisk miejskich, jego dopasowanie do warunków panujących w terminalu kontenerowym oparte jest na dodaniu jednej funkcji korekcyjnej  $\Delta L_{NLOS1,M}(f, d, \Delta h_{SR}, \Delta h_{SB}, \varphi)$  w sposób przedstawiony poniżej:

$$L'_{NLOS1,M} [dB] = \Delta L_{NLOS1,M} + \begin{cases} L_{wp}^{ITU} + L_{rts}^{ITU} + L_{msd}^{ITU} & \text{dla } L_{rts}^{ITU} + L_{msd}^{ITU} > 0, \\ L_{wp}^{ITU} & \text{dla } L_{rts}^{ITU} + L_{msd}^{ITU} \leq 0, \end{cases} \quad (4.64)$$

przy czym funkcja ta wyrażona została następująco:

$$\begin{aligned} \Delta L_{NLOS1,M} [dB] &= L_p [dB] - L_{NLOS1,M} [dB] = \\ &= a_M \log(f [MHz]) + b_M \log(d [m]/1000) + \\ &+ c_M \log(\Delta h_{SR} [m]) + d_M \log(\Delta h_{SB} [m]) + e_M \varphi [^\circ] + f_M. \end{aligned} \quad (4.65)$$

Współczynniki powyższej funkcji wyznaczone zostały dla dwóch wariantów modelu, mianowicie dla wariantu przeznaczonego dla średnich miast oraz dla wariantu przeznaczonego dla centrów dużych miast. Wartości współczynników oraz wyniki analizy ich istotności zestawione zostały w tab. 4.7 i tab. 4.8.

Tab. 4.7. Zestawienie współczynników funkcji korekcyjnej oraz wyników analizy istotności dla modelu ITU-R P.1411 dla środowisk miejskich w wariancie dla średnich miast

		$\Delta L_{NLOS1,M}^S(f, d, \Delta h_{SR}, \Delta h_{SB}, \varphi)$					
$\hat{\beta}_i$		$a_M$	$b_M$	$c_M$	$d_M$	$e_M$	$f_M$
			<b>-6,0</b>	<b>-19,7</b>	<b>-6,9</b>	<b>0,72</b>	<b>-0,22</b>
$s_{\hat{\beta}_i}$		$s_{a_M}$	$s_{b_M}$	$s_{c_M}$	$s_{d_M}$	$s_{e_M}$	$s_{f_M}$
		0,0462	0,0505	0,1252	0,0504	0,0006	0,1756
$t$		-129,9	-390,1	-55,1	14,3	-366,7	57,0
$N$	287582						
$k$	5						
$F_{0,05}$	2,21						
$F$	52648						

Tab. 4.8. Zestawienie współczynników funkcji korekcyjnej oraz wyników analizy istotności dla modelu ITU-R P.1411 dla środowisk miejskich w wariancie centrów dużych miast

		$\Delta L_{NLOS1,M}^C(f, d, \Delta h_{SR}, \Delta h_{SB}, \varphi)$					
$\hat{\beta}_i$		$a_M$	$b_M$	$c_M$	$d_M$	$e_M$	$f_M$
			<b>-6,0</b>	<b>-20,0</b>	<b>-9,4</b>	<b>-0,12</b>	<b>-0,23</b>
$s_{\hat{\beta}_i}$		$s_{a_M}$	$s_{b_M}$	$s_{c_M}$	$s_{d_M}$	$s_{e_M}$	$s_{f_M}$
		0,0477	0,0521	0,1291	0,0520	0,0006	0,1811
$t$		-125,8	-383,9	-72,8	-2,3	-383,3	65,7
$N$	287582						
$k$	5						
$F_{0,05}$	2,21						
$F$	52251						

W świetle powyższych wyników można zapisać dwie postaci funkcji korekcyjnych dla każdego wariantu analizowanego modelu. Dla wariantu przeznaczony dla średnich miast funkcja korekcyjna wygląda następująco:

$$\Delta L_{NLOS1,M}^S [dB] = -6 \log(f [MHz]) - 19,7 \log(d [m]/1000) + \\ - 6,9 \log(\Delta h_{SR} [m]) + 0,72 \log(\Delta h_{SB} [m]) - 0,22\varphi [^\circ] + 10. \quad (4.66)$$

Natomiast dla wariantu dla centrów dużych miast, funkcja ta wyraża się jak niżej:

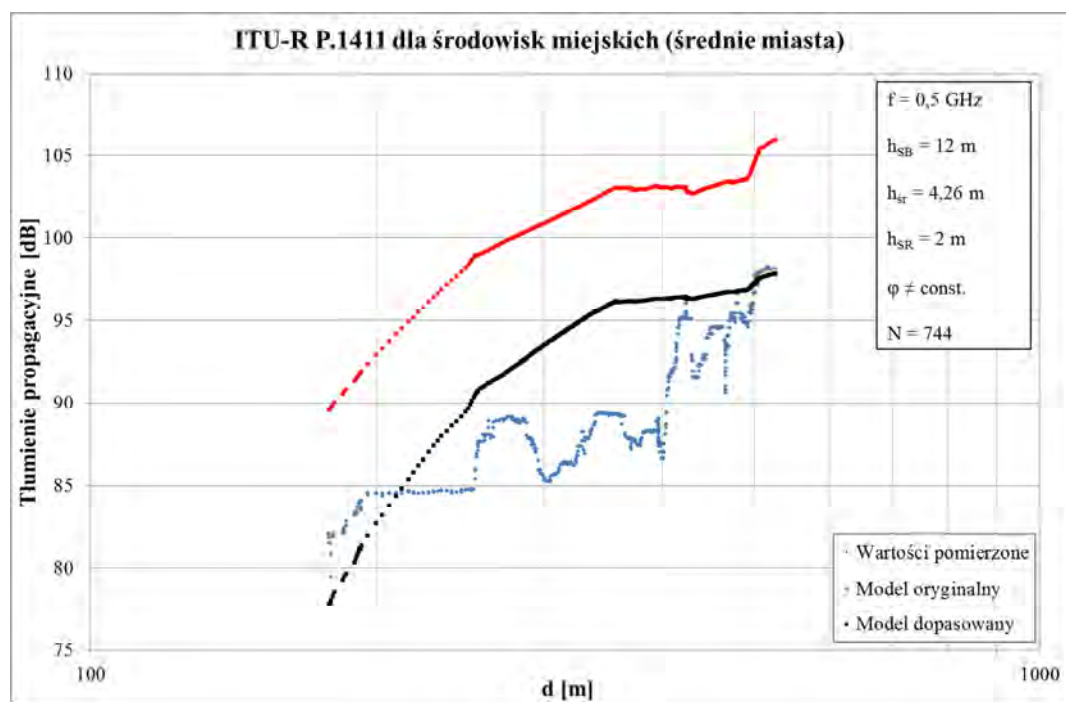
$$\Delta L_{NLOS1,M}^C [dB] = -6 \log(f [MHz]) - 20 \log(d [m]/1000) + \\ - 9,4 \log(\Delta h_{SR} [m]) - 0,12 \log(\Delta h_{SB} [m]) - 0,23\varphi [^\circ] + 11,9. \quad (4.67)$$

Model ITU-R P.1411 przeznaczony dla środowisk miejskich po dopasowaniu do warunków panujących w środowisku przemysłowym pozwala na lepszą dokładność szacowania tłumienia propagacyjnego w badanym środowisku, przy czym wyniki analizy przystawalności zmodyfikowanego modelu zawarte są w tab. 4.9.

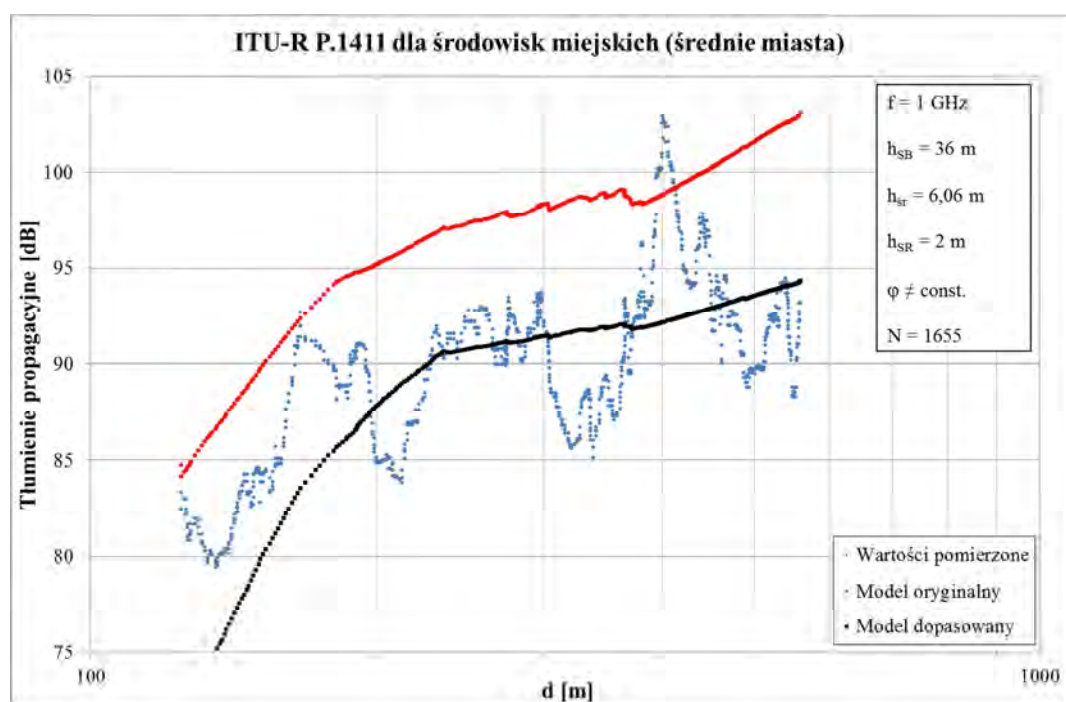
Tab. 4.9. Zestawienie wyników analizy przydatności dopasowanego modelu ITU-R P.1411 dla środowisk miejskich do szacowania tłumienia propagacyjnego w radiowym systemie ruchomym w warunkach terminalu kontenerowego

	<b>Wariant dla średnich miast</b>	<b>Wariant dla centrów dużych miast</b>
$N$	287582	287582
$\varphi^2$	0,504	0,536
$R^2$	0,496	0,464
$R^2_{popr}$	0,496	0,464
$ME [dB]$	0	0
$SEE [dB]$	7,6	7,8

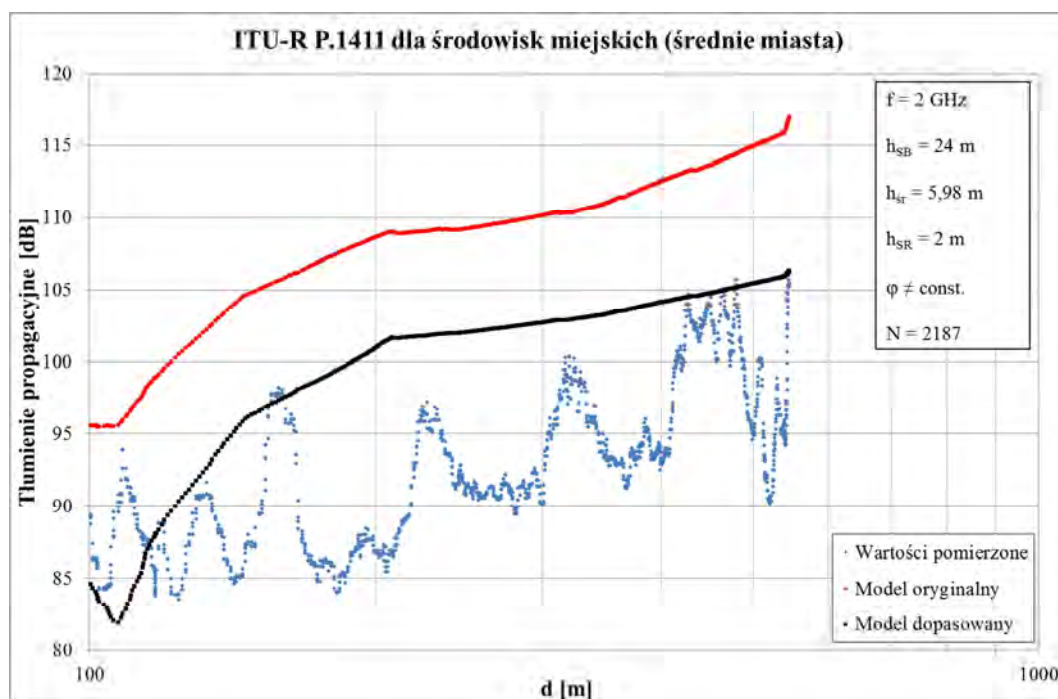
Przykładowe wykresy porównujące zależność tłumienia od długości trasy propagacji, dla różnych parametrów łącza radiowego, wykreślone na podstawie modelu oryginalnego i dopasowanego w wariantcie dla średnich miast przedstawione zostały na rys. 4.36 – 4.39.



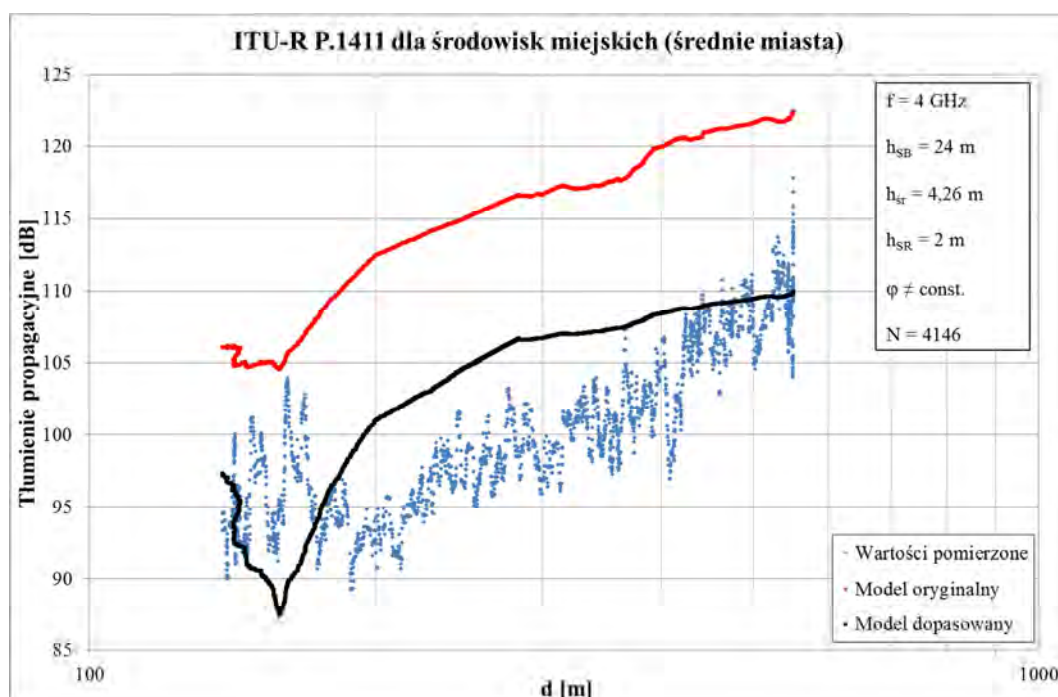
Rys. 4.36. Porównanie modelu ITU-R P.1411 dla średnich miast i dla  $f = 500 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



Rys. 4.37. Porównanie modelu ITU-R P.1411 dla średnich miast i dla  $f = 1000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



Rys. 4.38. Porównanie modelu ITU-R P.1411 dla średnich miast i dla  $f = 2000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



Rys. 4.39. Porównanie modelu ITU-R P.1411 dla średnich miast i dla  $f = 4000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu

Z wykresów widać, że zmodyfikowany model lepiej przystaje do danych empirycznych niż w przypadku modelu oryginalnego, jednakże wartość współczynnika determinacji poniżej 50% wskazuje na to, że zmienność tłumienia jest niewystarczająco determinowana zmiennością parametrów modelu.

#### 4.3.4. Dopasowanie modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich

Model z zalecenia ITU-R P.1411 przeznaczony dla środowisk podmiejskich różni trzy sposoby szacowania tłumienia propagacyjnego w zależności od lokalizacji stacji ruchomej na danym obszarze, a co za tym idzie, w zależności od zjawisk fizycznych, które mają dominujący wpływ na propagację fali radiowej. W związku z tym dopasowanie tego modelu do warunków terminalu kontenerowego bazuje na trzech funkcjach korekcyjnych, których argumentami są parametry charakterystyczne tego modelu:  $\Delta L_{NLOS1,P}^B(d, \lambda)$ ,  $\Delta L_{NLOS1,P}^O(d, h_{SB} - h_{SR}, h_{sr} - h_{SR}, \varphi)$  i  $\Delta L_{NLOS1,P}^U(d, \lambda, h_{SB} - h_{SR}, h_{sr} - h_{SR}, \varphi)$ , dodanych do podstawowej zależności (patrz wzór (4.39)) na tłumienie propagacyjne w sposób następujący:

$$L'_{NLOS1,P} [dB] = \begin{cases} 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) + \Delta L_{NLOS1,P}^B & (\text{obsz. dom. fali bezpośredniej}), \\ L_{0n} + \Delta L_{NLOS1,P}^O & (\text{obsz. dom. fali odbitej}), \\ 32,1 \cdot \log\left(\frac{d}{d_n}\right) + L_{d_n} + \Delta L_{NLOS1,P}^U & (\text{obsz. dom. fali ugiętej}). \end{cases} \quad (4.68)$$

Jak można zauważyć, w zbiorze argumentów funkcji  $\Delta L_{NLOS1,P}^O$  nie występuje długość fali ( $\lambda$ ), ponieważ wstępne analizy wykazały, że współczynnik regresji dla tej zmiennej niezależnej nie jest istotnie różny od zera. Poszczególne funkcje wyrażone zostały poniższymi zależnościami:

$$\Delta L_{NLOS1,P}^B [dB] = L_p [dB] - 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = a_B \log(d [m]) + b_B \log(\lambda [m]) + c_B, \quad (4.69)$$

$$\begin{aligned} \Delta L_{NLOS1,P}^O [dB] &= L_p [dB] - L_{0n} [dB] = \\ &= a_o \log(d [m]) + b_o \log(h_{SB} [m] - h_{SR} [m]) + \\ &+ c_o \log(h_{sr} [m] - h_{SR} [m]) + d_o \varphi [^\circ] + e_o, \end{aligned} \quad (4.70)$$

$$\begin{aligned} \Delta L_{NLOS1,P}^U [dB] &= L_p [dB] - 32,1 \cdot \log\left(\frac{d}{d_n}\right) - L_{d_n} = \\ &= a_U \log(d [m]) + b_U \log(\lambda [m]) + c_U \log(h_{SB} [m] - h_{SR} [m]) + \\ &+ d_U \log(h_{sr} [m] - h_{SR} [m]) + e_U \varphi [^\circ] + f_U. \end{aligned} \quad (4.71)$$

Powyższe funkcje poddane zostały analizie regresji liniowej, co pozwoliło uzyskać wartości współczynników. Wartości te oraz wyniki analizy ich istotności zestawione zostały w tab. 4.10, tab. 4.11 i tab. 4.12.

Tab. 4.10. Zestawienie współczynników funkcji korekcyjnej oraz wyników analizy istotności dla modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich (obszar dominacji fali bezpośredniej)

		$\Delta L_{NLOS1,P}^B(d, \lambda)$		
$\hat{\beta}_i$	$a_B$	$b_B$	$c_B$	
		<b>-6,5</b>	<b>0,8</b>	<b>21,4</b>
$s_{\hat{\beta}_i}$	$s_{a_B}$	$s_{b_B}$	$s_{c_B}$	
	0,0481	0,0666	0,1241	
$t$	-135,1	12,0	172,4	
$N$	50991			
$k$	2			
$F_{0,05}$	3,04			
$F$	9162			

Tab. 4.11. Zestawienie współczynników funkcji korekcyjnej oraz wyników analizy istotności dla modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich (obszar dominacji fali odbitej)

		$\Delta L_{NLOS1,P}^O(d, h_{SB} - h_{SR}, h_{sr} - h_{SR}, \varphi)$				
$\hat{\beta}_i$	$a_O$	$b_O$	$c_O$	$d_O$	$e_O$	
		<b>-22,5</b>	<b>15,6</b>	<b>-16,6</b>	<b>-0,2</b>	<b>46,2</b>
$s_{\hat{\beta}_i}$	$s_{a_O}$	$s_{b_O}$	$s_{c_O}$	$s_{d_O}$	$s_{e_O}$	
	0,1001	0,1332	0,1649	0,0012	0,2426	
$t$	-224,8	117,1	-100,7	-166,7	190,4	
$N$	99632					
$k$	4					
$F_{0,05}$	2,37					
$F$	13186					

Tab. 4.12. Zestawienie współczynników funkcji korekcyjnej oraz wyników analizy istotności dla modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich (obszar dominacji fali ugiętej)

		$\Delta L_{NLOS1,P}^U(d, \lambda, h_{SB} - h_{SR}, h_{sr} - h_{SR}, \varphi)$					
$\hat{\beta}_i$		$a_U$	$b_U$	$c_U$	$d_U$	$e_U$	$f_U$
			<b>-3,8</b>	<b>0,7</b>	<b>1,7</b>	<b>-15,1</b>	<b>-0,02</b>
$s_{\hat{\beta}_i}$		$s_{a_U}$	$s_{b_U}$	$s_{c_U}$	$s_{d_U}$	$s_{e_U}$	$s_{f_U}$
		0,0863	0,0529	0,0716	0,1550	0,0008	0,2304
$t$		-44,0	13,2	23,7	-97,4	25,0	26,9
$N$	136959						
$k$	5						
$F_{0,05}$	2,21						
$F$	3481						

Uzyskane wyniki pozwalają zapisać ostateczne postaci funkcji korekcyjnych:

$$\Delta L_{NLOS1,P}^B [dB] = -6,5 \log(d [m]) + 0,8 \log(\lambda [m]) + 21,4, \quad (4.72)$$

$$\begin{aligned} \Delta L_{NLOS1,P}^O [dB] = & -22,5 \log(d [m]) + 15,6 \log(h_{SB} [m] - h_{SR} [m]) + \\ & -16,6 \log(h_{sr} [m] - h_{SR} [m]) - 0,2\varphi [^\circ] + 46,2, \end{aligned} \quad (4.73)$$

$$\begin{aligned} \Delta L_{NLOS1,P}^U [dB] = & -3,8 \log(d [m]) + 0,7 \log(\lambda [m]) + 1,7 \log(h_{SB} [m] - h_{SR} [m]) + \\ & -15,1 \log(h_{sr} [m] - h_{SR} [m]) - 0,02\varphi [^\circ] + 6,2. \end{aligned} \quad (4.74)$$

Zmodyfikowanie modelu ITU-R P.1411 przeznaczonego dla środowisk podmiejskich przy pomocy powyższych funkcji korekcyjnych pozwala na dopasowanie tego modelu do warunków panujących w środowisku terminalu kontenerowego.

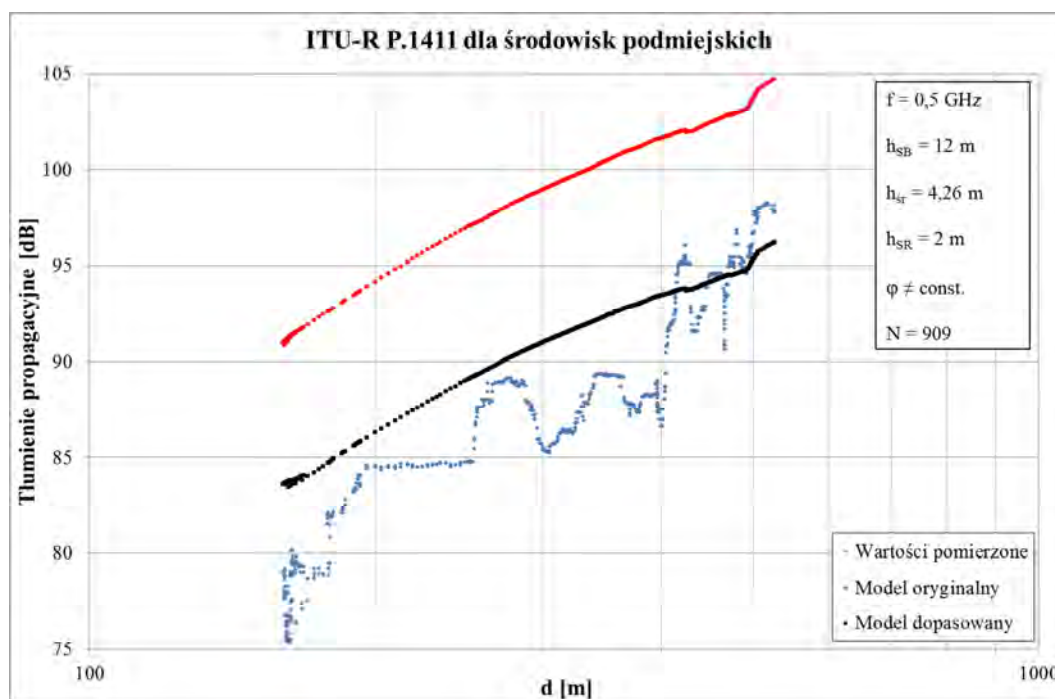
Wyniki analizy przystawalności zmodyfikowanego modelu do danych empirycznych zawarte są w tab. 4.13. Warto odnotować dużą wartość współczynnika determinacji, wynoszącą 0,785, co świadczy o tym, że zmiany tłumienia propagacyjnego w badanym środowisku są wyjaśniane przez zmienne modelu w 78,5%. Jest to wynik najlepszy spośród uzyskanych dla wszystkich zmodyfikowanych modeli.



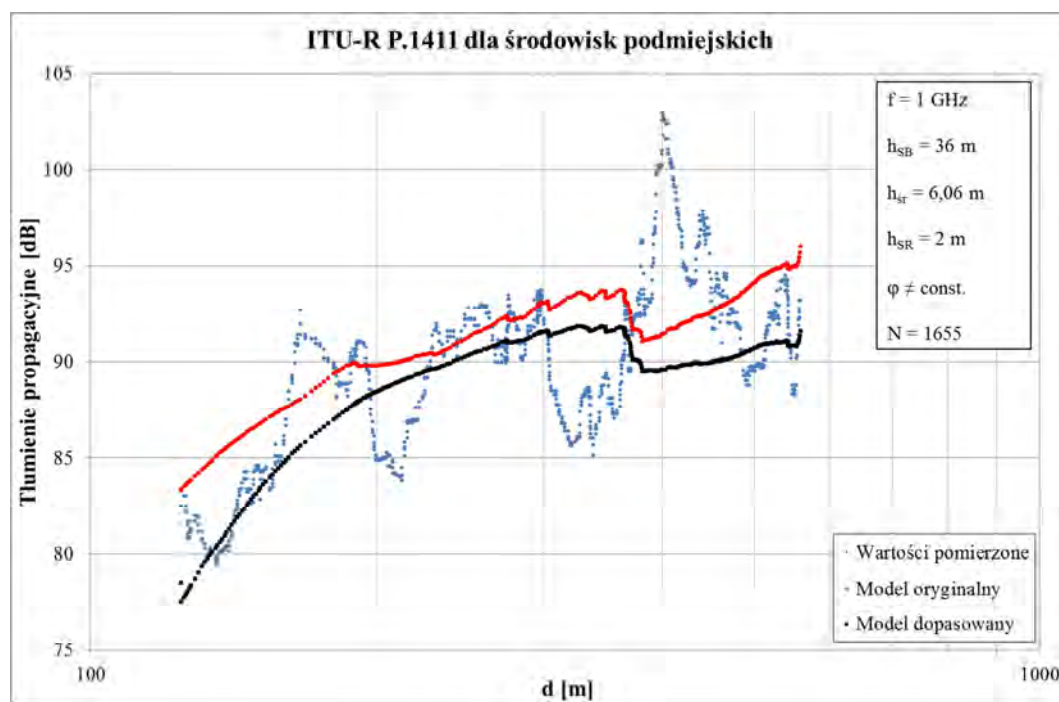
Tab. 4.13. Zestawienie wyników analizy przydatności dopasowanego modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich do szacowania tłumienia propagacyjnego w radiowym systemie ruchomym w warunkach terminalu kontenerowego

	Wariant dla środowisk podmiejskich
$N$	287582
$\varphi^2$	0,215
$R^2$	0,785
$R^2_{popr}$	0,785
$ME [dB]$	0
$SEE [dB]$	5,0

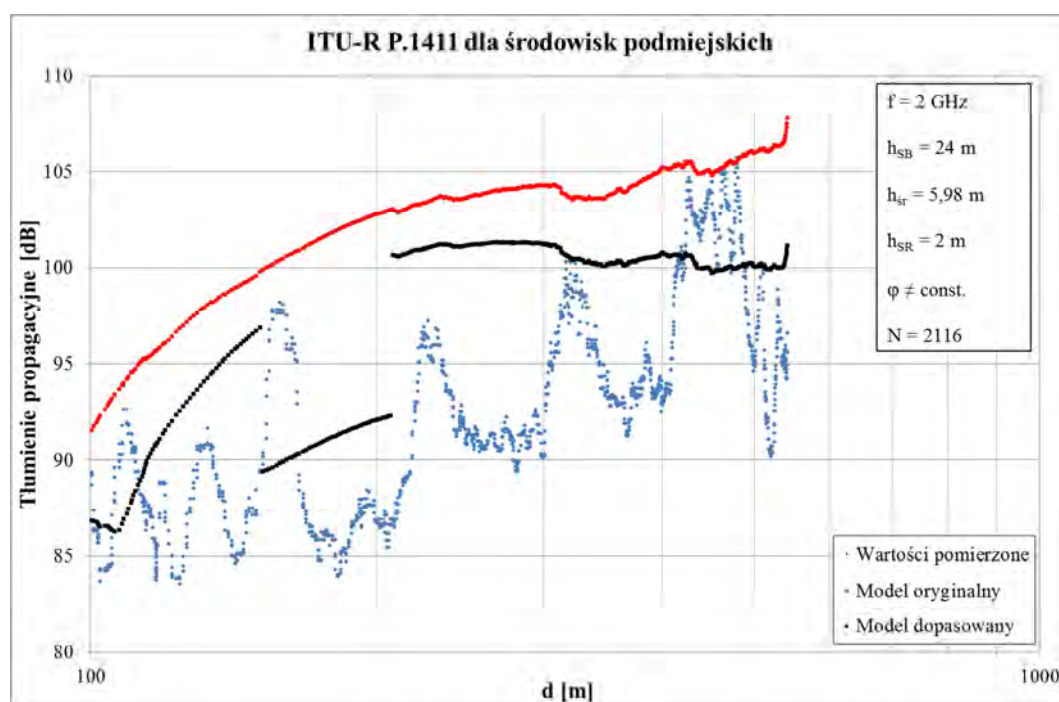
Porównanie zależności tłumienia od długości trasy propagacji, dla różnych parametrów łącza radiowego, dla modelu ITU-R oryginalnego i dopasowanego przedstawione zostało na przykładowych wykresach z rys. 4.40 – 4.43.



Rys. 4.40. Porównanie modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich i dla  $f = 500 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



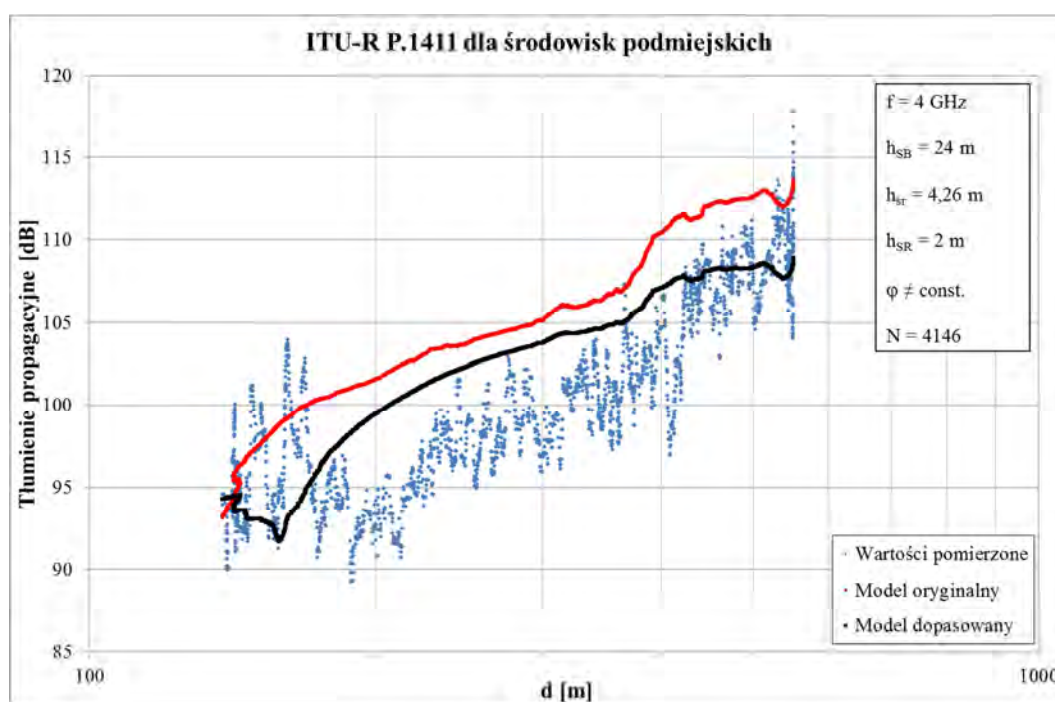
Rys. 4.41. Porównanie modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podziemnych i dla  $f = 1000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu



Rys. 4.42. Porównanie modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podziemnych i dla  $f = 2000 \text{ MHz}$  przed i po dopasowaniu

Na powyższym wykresie zauważyć można skokową zmianę wartości tłumienia obliczonego przy użyciu zmodyfikowanego modelu dla długości trasy propagacji wynoszącej 152 m, gdzie tłumienie gwałtownie maleje o 7,5 dB oraz dla długości trasy propagacji równej 208 m, gdzie jego wartość rośnie o 8,3 dB, przy czym nieciągłość ta jest

ograniczeniem przyjętej struktury równań w opisywanym modelu. Ma to związek z przejściem stacji ruchomej z obszaru dominacji fali odbitej do obszaru dominacji fali ugiętej, co ma miejsce w pierwszym przypadku ( $d = 152$  m) oraz z powrotem tej stacji do obszaru dominacji fali odbitej ( $d = 208$  m). Należy zauważyć, że ta zmiana w pewnym zakresie odpowiada zmianie wartości pomierzonych. Tłumienie obliczone przy użyciu modelu oryginalnego także ulega zmianie zgodnie ze wzorem (4.39), jednakże są to różnice rzędu dziesiątych części decybel, w związku z czym nie są tak widoczne, jak w przypadku modelu dopasowanego.



Rys. 4.43. Porównanie modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich i dla  $f = 500$  MHz przed i po dopasowaniu

Analizując powyższe wykresy oraz porównując je z analogicznymi wykresami dla innych zmodyfikowanych modeli należy zauważyć, że zmodyfikowany model z zalecenia ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich najlepiej odzwierciedla zmiany rzeczywistych wartości tłumienia propagacyjnego w badanym środowisku, co ma także odzwierciedlenie w danych liczbowych zebranych w tab. 4.13.

#### 4.3.5. Porównanie wybranych modeli przed i po statystycznym dopasowaniu – wykazanie tezy pomocniczej

Wartości błędu średniego oraz standardowego błędu estymacji tłumienia propagacyjnego w ruchomych systemach radiowych pracujących w warunkach terminalu kontenerowego uzyskane przy pomocy wybranych modeli znacząco się różnią z uzyskanymi przy pomocy modeli zmodyfikowanych. Zestawienie wartości tych błędów zostało zaprezentowane w tab. 4.14.

Tab. 4.14. Zestawienie błędów *ME* i *SEE* dla wybranych modeli przed i po modyfikacji

Model propagacyjny	Oryginalny wariant modelu	Przed dopasowaniem		Po dopasowaniu		
		<i>ME</i> [dB]	<i>SEE</i> [dB]	<i>ME</i> [dB]	<i>SEE</i> [dB]	$R^2_{popr}$
Model dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym	LOS1	3,8	8,3	0	5,3	0,752
	NLOS1	3,0	7,6	0	5,3	0,752
COST 231 Walfisch-Ikegami	Tereny podmiejskie	-5,3	10,6	0	5,2	0,758
	Centra dużych miast	-10,1	16,0	0	5,7	0,718
ITU-R P.1411 NLOS1 (śr. miejskie)	Średnie miasta	-8,4	13,4	0	7,6	0,496
	Centra dużych miast	-8,8	13,9	0	7,8	0,494
ITU-R P.1411 NLOS1 (śr. podmiejskie)	Tereny podmiejskie	-4,5	10,0	0	<b>5,0</b>	<b>0,785</b>

Można zauważyć, że dla wszystkich zmodyfikowanych modeli błąd średni wynosi 0, co – jak już wspomniano w niniejszej rozprawie – wynika z zastosowanej metody wyznaczania współczynników funkcji regresji. Dla dopasowanego modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym standardowy błąd estymacji wynosi 5,3 dB, co oznacza, że został on zredukowany o 3 dB dla wariantu LOS1 i o 2,3 dB dla wariantu NLOS1. Dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfischa-Ikegami błąd *SEE* wynosi 5,2 dB dla oryginalnego wariantu modelu dla terenów podmiejskich oraz 5,7 dB dla wariantu dla centrów dużych miast, co stanowi spadek błędu o odpowiednio 5,4 dB i 10,3 dB. W przypadku dopasowanego modelu ITU-R P.1411 dla środowisk miejskich uzyskany błąd *SEE* jest największy spośród pozostałych modeli i wynosi

7,6 dB dla wariantu dla średnich miast i 7,8 dB dla wariantu dla centrów dużych miast, co oznacza jego redukcję względem modelu oryginalnego o odpowiednio 5,8 dB i 6,1 dB. Najlepsze wyniki uzyskano dla dopasowanego modelu ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich, gdzie uzyskany standardowy błąd estymacji wynosi 5 dB, co oznacza jego redukcję względem modelu oryginalnego o 5 dB. Powyższe stwierdzenie potwierdzają też wykresy tłumienia propagacyjnego z Rys 4.40 – 4.43, gdzie model zmodyfikowany zdaje się najlepiej przystawać do danych empirycznych. Nie bez znaczenia pozostaje też fakt, że dla tego modelu uzyskano najwyższą wartość współczynnika determinacji, wynoszącą 0,785, co oznacza, że zmodyfikowany model wyjaśnia 78,5% zmienności tłumienia propagacyjnego w badanym środowisku.

W świetle powyższych wyników, dowiedziona została teza pomocnicza zakładająca, że poprzez statystyczne dopasowanie wybranych znanych modeli propagacyjnych można uzyskać poprawę dokładności estymowania tłumienia fali radiowej dla potrzeb projektowania ruchomych systemów radiowych w warunkach terminalu kontenerowego.



## ***Rozdział 5.***

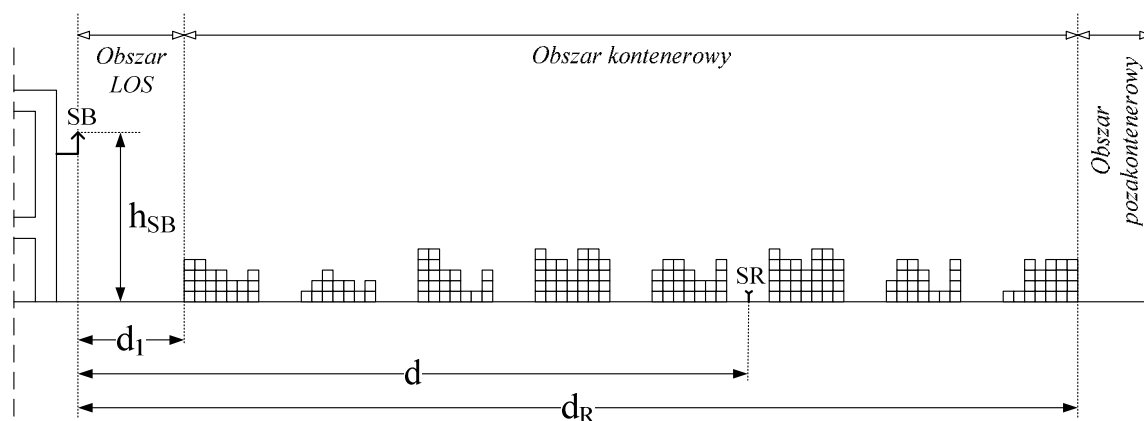
# ***Nowy empiryczny model tłumienia propagacyjnego dla terminalu kontenerowego***

W niniejszym rozdziale przedstawiono pierwszy i jak dotychczas jedyny w skali światowej model propagacyjny przeznaczony do estymowania tłumienia fal radiowych w ruchomych systemach bezprzewodowych, pracujących w środowisku terminalu kontenerowego, będącego przykładem otwartego środowiska uprzemysłowionego [11]. Jest to model empiryczny, który – w odróżnieniu od modeli deterministycznych – próbuje odtworzyć właściwości modelowanego kanału na podstawie pomiarów, przy pomocy metod statystycznych [57]. Model ten został nazwany akronimem RTK od słów: ruchomy, terminal, kontener.

Na wstępie określono czynniki wpływające na tłumienie propagacyjne. Następnie przedstawiono ujęcie analityczne nowego modelu, wraz ze sposobem jego uzyskania oraz przeanalizowano nowy model pod względem przystawalności wyników uzyskanych przy jego pomocy do danych empirycznych. W końcowej części rozdziału ocenie poddana została przydatność nowego modelu do szacowania tłumienia propagacyjnego w badanym środowisku i wykazana została główna teza rozprawy doktorskiej.

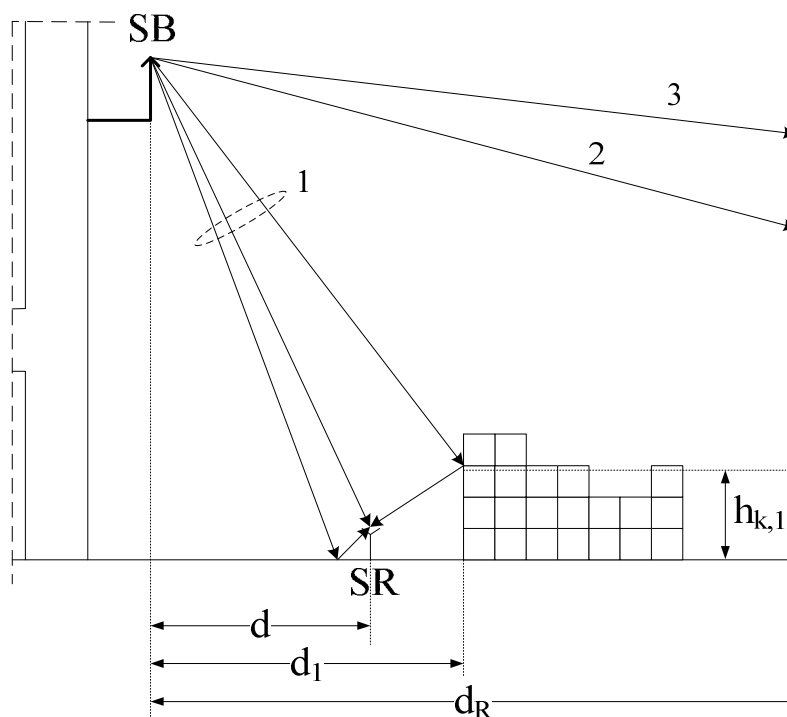
### **5.1. Określenie czynników wpływających na tłumienie propagacyjne**

Przedstawiona w podrozdziale 2.3.1 charakterystyka badanego terminalu kontenerowego DCT Gdańsk pozwala stwierdzić, że mamy do czynienia ze względnie regularną strukturą, jednakże podczas opracowywania nowego modelu należało wziąć pod uwagę zróżnicowanie warunków panujących w różnych miejscach terminalu kontenerowego. W związku z powyższym terminal ten został podzielony na trzy obszary, w których decydujący wpływ na tłumienie fali radiowej mają określone mechanizmy propagacyjne. Podział ten został przedstawiony na rys. 5.1, gdzie zaznaczono także położenie stacji bazowej (SB) na suwnicy nabrzeżowej oraz przykładowe położenie stacji ruchomej (SR). Zaznaczone odległości  $d_I$ ,  $d$  i  $d_R$  opisane zostały w dalszej części niniejszego podrozdziału.



Rys. 5.1. Przekrój poprzeczny DCT Gdańsk wraz z zaznaczonym podziałem na obszary

Obszar pierwszy, nazywany w dalszej części rozprawy obszarem LOS, określono dla długości  $d$  tras propagacji mniejszych od odległości  $d_1$  między anteną stacji bazowej a pierwszym rzędem pól składowych ( $d \leq d_1$ ), gdzie przeważający wpływ na moc sygnału radiowego docierającego do anteny stacji ruchomej ma fala bezpośrednia oraz fala odbita od kontenerów położonych w pierwszym rzędzie lub odbita od podłoża (promienie oznaczone „1” na rys. 5.2).

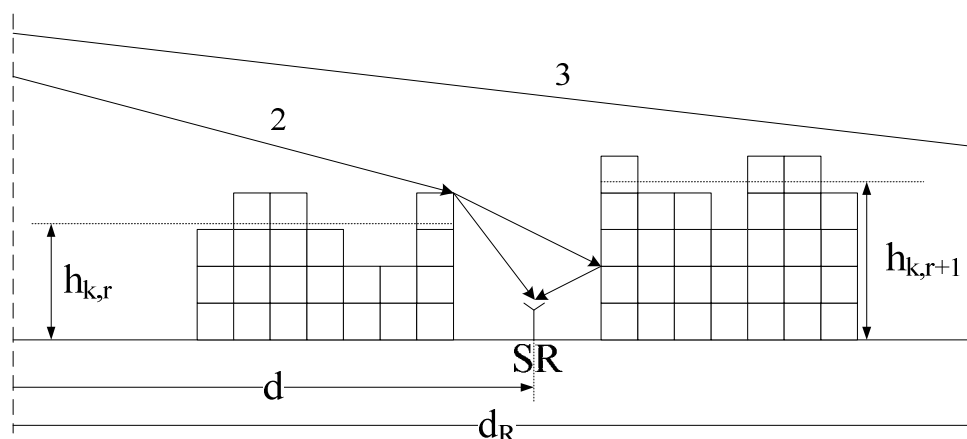


Rys. 5.2. Przykładowy scenariusz propagacji fal radiowych w obszarze LOS

W takiej sytuacji na tłumienie – oprócz oczywistych czynników, tj. częstotliwości, długości trasy propagacji i wysokości zawieszenia anteny stacji bazowej – wpływ ma średnia wysokość ( $h_{k,1}$ ) stosu kontenerów w pierwszym rzędzie pól składowych.



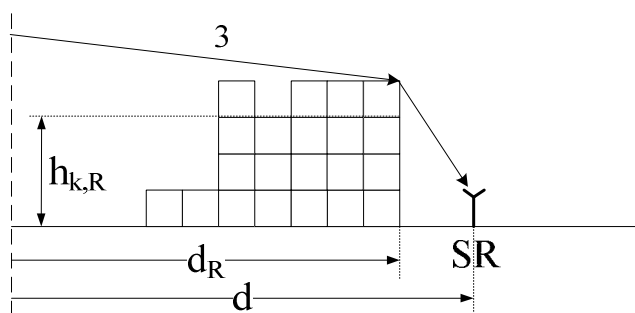
Obszar drugi, nazwany obszarem kontenerowym, określono dla długości tras propagacji większych od  $d_I$ , a mniejszych od odległości  $d_R$  między anteną stacji bazowej, a końcem ostatniego,  $R$ -tego rzędu pól składowych ( $d_I < d \leq d_R$ ), gdzie decydujący wpływ na moc sygnału radiowego docierającego do anteny stacji ruchomej ma dyfrakcja na krawędziach kontenerów na drodze propagacji fali radiowej, zwłaszcza na krawędziach kontenerów w ostatnim rzędzie przed stacją ruchomą, oraz odbicie fali od kontenerów ustawionych w kolejnym rzędzie za stacją ruchomą (promień „2” na rys. 5.3).



Rys. 5.3. Przykładowy scenariusz propagacji fal radiowych w obszarze kontenerowym

Dodatkowymi czynnikami – poza oczywistymi – wpływającymi na tłumienie propagacyjne w tym podobszarze są: kąt ( $\varphi$ ) nadejścia fali radiowej do stacji ruchomej względem osi głównego ciągu komunikacyjnego, średnia wysokość ( $h_{k,d}$ ) stosów kontenerów na drodze propagacji oraz średnia wysokość ( $h_{k,r+1}$ ) stosów kontenerów w rzędzie  $r+1$ , czyli kolejnym za stacją ruchomą.

Obszar trzeci, nazywany dalej obszarem pozakontenerowym, określono dla długości tras propagacyjnych większych od  $d_R$  ( $d > d_R$ ), gdzie decydujący wpływ na moc sygnału docierającego do anteny stacji ruchomej ma ubytek energii fali radiowej spowodowany dyfrakcją na krawędziach stosów kontenerów na całej drodze propagacji fali radiowej. Do stacji ruchomej dociera niewielka część energii dzięki dyfrakcji fali na krawędziach stosów w ostatnim rzędzie (promień oznaczony jako „3” na rys. 5.4). W związku z tym, dodatkowymi czynnikami wpływającymi na wartość tłumienia propagacyjnego w tym podobszarze są: kąt ( $\varphi$ ) nadejścia fali radiowej do stacji ruchomej, średnia wysokość ( $h_{k,t}$ ) stosów kontenerowych na terenie całego terminalu oraz stopień zajętości przez stosy kontenerów całkowitej powierzchni przeznaczonej na składowanie kontenerów w terminalu, wyrażony przez współczynnik ( $S_t$ ) zajętości terminalu, zdefiniowany w dalszej części podrozdziału.



Rys. 5.4. Przykładowy scenariusz propagacji fal radiowych w obszarze pozakontenerowym

Statystyczna istotność takiego podziału została zweryfikowana – z 95% współczynnikiem ufności – przy pomocy testu Z dla dwóch prób, który opisany został w podrozdziale 3.3.1 niniejszej rozprawy. W celu obliczenia wartości statystyki testowej dla każdej pary obszarów, na które podzielony został terminal, należało obliczyć wartości średnie oraz wariancje tłumienia propagacyjnego w każdym z tych obszarów. Wyniki tych obliczeń zestawione zostały w tab. 5.1.

Tab. 5.1. Parametry statystyczne prób tłumienia propagacyjnego dla różnych obszarów badanego terminalu kontenerowego

	Wartość średnia tłumienia	Wariancja tłumienia	Liczebność próby
Obszar LOS	92	88,5	54283
Obszar kontenerowy	96,8	105,9	196239
Obszar pozakontenerowy	100,5	110,1	29195

Wartości średnie, wariancje oraz liczebności prób tłumienia fali radiowej pomierzonych w różnych obszarach badanego środowiska posłużyły do wyznaczenia przy pomocy zależności (3.56) wartości statystyk testowych Z, które zestawione zostały w tab. 5.2.

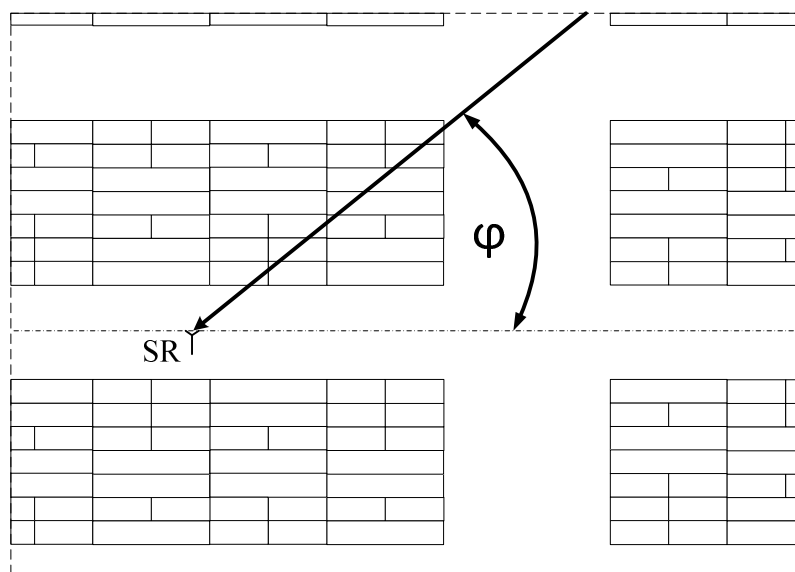
Tab. 5.2. Wartości statystyki testowej Z obliczone dla trzech par obszarów badanego terminalu kontenerowego

LOS-Kontenerowy	LOS-Pozakontenerowy	Kontenerowy-Pozakontenerowy
Z = -103,0	Z = -115,7	Z = -56,4

Pamiętając, że wartością krytyczną testu dla założonego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  (95% współczynnik ufności) jest  $Z_{0,05} = 1,96$  oraz, że różnice między wartościami średnimi z porównywanych prób są istotne statystycznie, gdy  $|Z| \geq Z_{0,05}$ , można stwierdzić, że różnice między wartościami średnimi tłumienia w poszczególnych obszarach nie są spowodowane losowym charakterem prób, co oznacza, że warunki propagacyjne w poszczególnych obszarach istotnie różnią się między sobą.

Na podstawie wstępnej analizy uwarunkowań propagacyjnych określone zostały istotne czynniki mające wpływ na wartość tłumienia sygnału radiowego w środowisku terminalu kontenerowego, z których dość oczywiste to:

- częstotliwość  $f$  [MHz] fali radiowej,
- długość  $d$  [m] trasy propagacji fali radiowej, definiowana jako odległość (na płaszczyźnie) pomiędzy miejscem instalacji anteny stacji bazowej, a lokalizacją anteny stacji ruchomej (patrz rys. 5.1),
- wysokość  $h_{SB}$  [m] zawieszenia anteny stacji bazowej nad poziomem powierzchni terminalu kontenerowego (patrz rys. 5.1),
- kąt  $\varphi$  [°] nadejścia fali radiowej do anteny stacji ruchomej, określony jako kąt ostry pomiędzy kierunkiem fali a osią głównego ciągu komunikacyjnego między polami składowymi, tak jak zostało to przedstawione na rys. 5.5.



Rys. 5.5. Zobrazowanie kąta nadejścia fali radiowej do anteny stacji ruchomej

Istotne są także parametry charakterystyczne dla tego typu uprzemysłowionych środowisk propagacyjnych:

- powierzchniowy współczynnik  $S_t$  zajętości terminalu, określany jako stosunek powierzchni terminalu zajętej przez stosy kontenerów do całkowitej powierzchni przeznaczonej na składowanie kontenerów,
- powierzchniowy współczynnik  $S_i$  zajętości  $i$ -tego rzędu pól składowych, określany jako stosunek powierzchni zajętej przez stosy kontenerów w tym rzędzie do całkowitej powierzchni przeznaczonej w tym rzędzie na składowanie kontenerów,
- średnia wysokość  $h_{k,t}$  [m] stosu kontenerów na obszarze całego terminalu,
- średnia wysokość  $h_{k,i}$  [m] stosu kontenerów w  $i$ -tym rzędzie pól składowych,
- średnia wysokość  $h_{k,d}$  [m] stosu kontenerów na drodze propagacji sygnału radiowego,
- średnia wysokość  $h_{k,r+1}$  [m] stosu kontenerów w rzędzie pól składowych znajdującym się za stacją ruchomą i powodującym odbicie fali radiowej (patrz rys. 5.3).

Dla porządku należy dodać, że – podobnie jak w przypadku wszystkich innych modeli propagacyjnych dla analizowanego zakresu częstotliwości – tłumienie deszczu, mgieł oraz gazów atmosferycznych nie ma istotnego wpływu na całkowite tłumienie propagacyjne [25, 47, 48].

## 5.2. Ujęcie analityczne nowego empirycznego modelu tłumienia propagacyjnego

Przeprowadzona analiza uwarunkowań propagacyjnych w poszczególnych podobszarach terminalu kontenerowego posłużyła do sformułowania ogólnej zależności na tłumienie propagacyjne  $L_{RTK}$  w tym środowisku:

$$L_{RTK} [dB] = \begin{cases} L_{LOS} [dB] & \text{dla } d \leq d_1 \text{ (obszar LOS),} \\ L_K [dB] & \text{dla } d_1 < d \leq d_R \text{ (obszar kontenerowy),} \\ L_{PK} [dB] & \text{dla } d > d_R \text{ (obszar pozakontenerowy),} \end{cases} \quad (5.1)$$

gdzie:

- $L_{LOS}$  – tłumienie fali radiowej (wyrażone w [dB]) w obszarze LOS,
- $L_K$  – tłumienie fali radiowej (wyrażone w [dB]) w obszarze kontenerowym,
- $L_{PK}$  – tłumienie fali radiowej (wyrażone w [dB]) w obszarze pozakontenerowym.

Tłumienie w poszczególnych obszarach uzależnione zostało od czynników propagacyjnych określonych w podrozdziale 5.1, przy czym wszystkie zmienne zostały wyrażone w jednostkach podanych w tymże podrozdziale, jeżeli nie zostało to zaznaczone inaczej.

Przykładowy scenariusz propagacji fal radiowych w obszarze LOS przedstawiony został na rys. 5.2. Do anteny stacji ruchomej dociera fala bezpośrednia oraz fala odbita od kontenerów ustawionych w pierwszym rzędzie pól składowych i od podłoża. Tłumienie w tym przypadku przedstawiono za pomocą poniższej funkcji:

$$L_{LOS} = L_{wp} + a_{LOS} \log(h_{SB} - h_{k,1}) + b_{LOS}, \quad (5.2)$$

gdzie czynnik  $L_{wp}$  jest związany z falą bezpośrednią i wyrażany jest dobrze znaną zależnością na tłumienie fali radiowej w wolnej przestrzeni propagacyjnej (zwane niekiedy podstawowymi stratami transmisji w wolnej przestrzeni [92]), które stanowi podstawowy i najbardziej znaczący składnik bilansu energetycznego każdego łącza radiowego, w którym ma miejsce wzajemna widoczność anten [69]:

$$L_{wp} = 20 \log f + 20 \log d - 27,6, \quad (5.3)$$

natomiast czynnik  $(h_{SB} - h_{k,1})$  jest związany z falą odbitą od kontenerów w pierwszym rzędzie pól składowych, przy czym spełnione powinno być założenie:  $h_{SB} > h_{k,1}$ .

Przykładowy scenariusz mający miejsce w obszarze kontenerowym przedstawiony został na rys. 5.3, gdzie do anteny stacji ruchomej dociera fala radiowa ugięta na krawędziach kontenerów w  $r$ -tym rzędzie pól składowych oraz fala odbita od kontenerów ustawionych w rzędzie kolejnym ( $r+1$ ). Tłumienie propagacyjne w tym obszarze wyrażone zostało następującą funkcją:

$$L_K = a_K \log f + b_K \log d + c_K \log(h_{SB} - h_{k,d}) + d_K \log(h_{SB} - h_{k,r+1}) + e_K \log \varphi + f_K, \quad (5.4)$$

gdzie czynnik  $(h_{SB} - h_{k,d})$  związany jest ze stratami energii fali radiowej wskutek lokalnych mechanizmów dyfrakcji na krawędziach kontenerów na trasie propagacji tej fali, a średnią wysokość stosów kontenerów na tej trasie wyznacza się z następującej zależności:

$$h_{k,d} = \frac{\sum_{i=1}^r h_{k,i} \cdot S_i}{\sum_{i=1}^r S_i}, \quad (5.5)$$

natomiast czynnik  $(h_{SB}-h_{k,r+1})$  jest związany z falą radiową odbitą od kontenerów w rzędzie pól składowych kolejnych za stacją ruchomą. Dla wzoru (5.4) zakłada się, że  $h_{SB} > h_{k,d}$ ,  $h_{SB} > h_{k,r+1}$  oraz  $0[^\circ] < \varphi \leq 90[^\circ]$ .

Ostatni rozpatrywany osobno obszar znajduje się za ostatnim rzędem pól składowych. Przykładowy scenariusz propagacji fal radiowych w tym obszarze przedstawiony został na rys. 5.4, natomiast tłumienie propagacyjne wyrażono następującą funkcją:

$$L_{PK} = a_{PK} \log f + b_{PK} \log d + c_{PK} \log(h_{SB} - h_{k,t}) + d_{PK} \log S_t + e_{PK} \log \varphi + f_{PK}, \quad (5.6)$$

gdzie czynnik  $(h_{SB}-h_{k,t})$  związany z tłumieniem fali radiowej w wyniku jej dyfrakcji na krawędziach kontenerów na całej drodze propagacji, a średnią wysokość stosów kontenerów na całym obszarze terminalu oblicza się przy użyciu następującego wyrażenia:

$$h_{k,t} = \frac{\sum_{i=1}^R h_{k,i} \cdot S_i}{\sum_{i=1}^R S_i}, \quad (5.7)$$

natomiast czynnik  $S_t$  odzwierciedla wpływ liczby kontenerów składowanych na całym obszarze terminalu, przy czym zakłada się, że:  $h_{SB} > h_{k,t}$ ,  $0[^\circ] < \varphi \leq 90[^\circ]$  oraz  $S_t > 0$ .

W powyższych równaniach wartość  $r=1,2,\dots,R-1$  oznacza numer rzędu pól składowych przed stacją ruchomą (licząc od stacji bazowej), natomiast  $R$  stanowi liczbę wszystkich rzędów pól składowych na terenie terminalu. W przypadku DCT Gdańsk zmienna  $R$  przyjmuje wartość 8, co widać na rys. 2.12.

Współczynniki funkcji (ich estymatory) wyrażających tłumienie propagacyjne w poszczególnych obszarach, określonych poprzez równania (5.2), (5.4) i (5.6) wyznaczono dzięki przeprowadzeniu – według algorytmu opisanego w podrozdziale 3.2.3 niniejszej rozprawy – wielorakiej regresji liniowej na próbach tłumienia propagacyjnego pomierzonego w tych obszarach.

Każdy ze współczynników oraz każda z funkcji została poddana analizie statystycznej zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 3.3.2, mianowicie istotność statystyczna poszczególnych współczynników została potwierdzona poprzez porównanie obliczonej ze wzoru (3.59) wartości statystyki testowej  $t$  z wartością krytyczną testu, która dla założonego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  wynosi  $t_{0,05} = 1,96$ . Dany współczynnik istotnie różni się od zera, jeśli spełniona jest nierówność  $|t| \geq t_{0,05}$ .

Ocena istotności regresji została zrealizowana przy użyciu statystyki testowej  $F$ , wyrażonej zależnością (3.60), której obliczona wartość została porównana z wartością  $F_{0,05}$  krytyczną testu na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Wartość ta zależna jest od liczby  $k$  zmiennych objaśniających modelu (patrz tab. 3.1). Uzyskana w wyniku regresji funkcja jest istotna statystycznie, gdy  $|F| \geq F_{0,05}$ . Wyniki analizy dla funkcji przeznaczonych dla wszystkich trzech obszarów zestawione zostały w tab. 5.3 – 5.6.

Tab. 5.3. Zestawienie współczynników funkcji oraz wyników analizy istotności dla modelu RTK dla obszaru LOS

$\hat{\beta}_i$	$a_{LOS}$	$b_{LOS}$
	<b>-4,2</b>	<b>11,6</b>
$s_{\hat{\beta}_i}$	$s_{a_{LOS}}$	$s_{b_{LOS}}$
	0,0736	0,0899
$t$	-57,1	129,0
$N$	54283	
$k$	1	
$F_{0,05}$	3,84	
$F$	3248	

W przypadku funkcji dla obszaru LOS otrzymane współczynniki spełniają kryterium istotności statystycznej, podobnie jak cała, uzyskana w wyniku regresji funkcja.

Tab. 5.4. Zestawienie współczynników funkcji oraz wyników analizy istotności dla modelu RTK dla obszaru kontenerowego

$\hat{\beta}_i$	$a_k$	$b_k$	$c_k$	$d_k$	$e_k$	$f_k$
	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>-18</b>	<b>6,2</b>	<b>4</b>	<b>-21,8</b>
$s_{\hat{\beta}_i}$	$s_{a_k}$	$s_{b_k}$	$s_{c_k}$	$s_{d_k}$	$s_{e_k}$	$s_{f_k}$
	0,0346	0,0713	0,1358	0,1286	0,0587	0,2938
$t$	578,0	350,6	-132,5	48,2	68,1	-74,2
$N$	196239					
$k$	5					
$F_{0,05}$	2,21					
$F$	149146					

Także w przypadku funkcji dla obszaru kontenerowego wartości statystyk  $t$  i  $F$  znacząco przekraczają wartości krytyczne odpowiednich testów, co dowodzi nieprzypadkowości otrzymanej funkcji wyrażającej tłumienie propagacyjne w tym obszarze.

Tab. 5.5. Zestawienie współczynników funkcji oraz wyników analizy istotności dla modelu RTK dla obszaru pozakontenerowego

$\hat{\beta}_i$	$a_{PK}$	$b_{PK}$	$c_{PK}$	$d_{PK}$	$e_{PK}$	$f_{PK}$
	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>-18</b>	<b>13,5</b>	<b>4</b>	<b>-21,8</b>
$s_{\hat{\beta}_i}$	$s_{a_{PK}}$	$s_{b_{PK}}$	$s_{c_{PK}}$	$s_{d_{PK}}$	$s_{e_{PK}}$	$s_{f_{PK}}$
	0,0803	1,0309	0,0875	0,2327	0,9390	4,36
$t$	249,1	29,1	-205,7	58,0	4,3	-5,0
$N$	29195					
$k$	5					
$F_{0,05}$	2,21					
$F$	29687					

Funkcja opisująca tłumienie fali radiowej w obszarze pozakontenerowym, podobnie jak w pozostałych przypadkach, jest istotna statystycznie, na co wskazuje dużo większa od krytycznej wartość statystyki testowej  $F$ . Warto odnotowania są nieco mniejsze wartości statystyk testowych  $t$  dla współczynników  $e_{PK}$  i  $f_{PK}$ , jednakże ich wartości bezwzględne nadal są większe od wartości krytycznej  $t_{0,05}$ , która dla założonego współczynnika ufności wynosi 1,96. Zatem i w tym przypadku dowiedziona została hipoteza, potwierdzająca istotność statystyczną współczynników analizowanej funkcji regresji.

W świetle powyższego należy dla podsumowania i usystematyzowania wyników sformułować raz jeszcze postać analityczną modelu RTK, mianowicie ogólna zależność (5.1) wyraża tłumienie propagacyjne występujące w systemach radiokomunikacji ruchomej pracujących w środowisku terminalu kontenerowego, natomiast tłumienie propagacyjne dla poszczególnych obszarów wyrażone jest następująco:

$$L_{LOS} = L_{wp} - 4,2 \log(h_{SB} - h_{k,1}) + 11,6, \quad (5.8)$$

$$L_K = 20 \log f + 25 \log d - 18 \log(h_{SB} - h_{k,d}) + 6,2 \log(h_{SB} - h_{k,r+1}) + 4 \log \varphi - 21,8, \quad (5.9)$$

$$L_{PK} = 20 \log f + 30 \log d - 18 \log(h_{SB} - h_{k,t}) + 13,5 \log S_t + 4 \log \varphi - 21,8, \quad (5.10)$$



a występujące w powyższych równaniach zmienne mają następujący sens:

- $f$  [MHz] – częstotliwość sygnału radiowego,
- $d$  [m] – długość trasy propagacji sygnału radiowego,
- $L_{wp}$  [dB] – tłumienie fali radiowej w wolnej przestrzeni propagacyjnej (patrz (5.3)),
- $h_{SB}$  [m] – wysokość (nad poziomem terenu) zawieszenia anteny stacji bazowej,
- $h_{k,l}$  [m] – średnia wysokość stosu kontenerów w pierwszym rzędzie pól składowych,
- $h_{k,d}$  [m] – średnia wysokość stosu kontenerów na drodze propagacji sygnału radiowego, wyrażona zależnością (5.5),
- $h_{k,r+1}$  [m] – średnia wysokość stosu kontenerów w rzędzie pól składowych kolejnym za stacją ruchomą, licząc od strony umiejscowienia stacji bazowej,
- $\varphi$  [°] – kąt nadejścia fali radiowej do anteny stacji ruchomej,
- $h_{k,t}$  [m] – średnia wysokość stosu kontenerów na całym obszarze terminalu kontenerowego, wyrażona zależnością (5.7),
- $S_t$  – powierzchniowy współczynnik zajętości terminalu kontenerowego.

Model RTK jest przeznaczony do szacowania tłumienia propagacyjnego w ruchomych systemach bezprzewodowych pracujących w warunkach terminalu kontenerowego, dla następujących zakresów parametrów:

- $f \in \langle 500; 4000 \rangle$  [MHz],
- $d \in \langle 50; 620 \rangle$  [m],
- $h_{SB} \in \langle 12; 36 \rangle$  [m],
- $h_{SR} = 2$  [m],

oraz przy następujących założeniach:

- $h_{SB} > h_{k,l}$ ,
- $h_{SB} > h_{k,d}$ ,
- $h_{SB} > h_{k,r+1}$ ,
- $h_{SB} > h_{k,t}$ ,
- $0[^\circ] < \varphi \leq 90[^\circ]$ ,
- $0 < S_t \leq 1$ .

Jeżeli średnia wysokość  $h_{k,l}$  stosu kontenerów w pierwszym rzędzie pól składowych jest równa 0, co jest równoznaczne z brakiem kontenerów w tym rzędzie, to jako pierwszy rząd pól składowych należy rozważyć kolejny, dla którego  $h_{k,l} > 0$ .

Wysokość zawieszenia anteny stacji ruchomej jest stała, a jej wartość odpowiada sytuacji, w której antena zainstalowana została na dachu pojazdu poruszającego się po terenie terminalu kontenerowego, lub – z nieznacznym przybliżeniem – kiedy antena zintegrowana jest z terminalem ruchomym, z którego korzysta użytkownik pieszy.

### 5.3. Analiza nowego modelu empirycznego

Po przeanalizowaniu istotności poszczególnych równań ocenie poddane zostały modele do szacowania tłumienia w poszczególnych obszarach oraz łącznie dla całego modelu RTK. Do tego celu posłużono się błędem średni  $ME$  oraz standardowym błędem estymacji  $SEE$ , wyrażonymi odpowiednio zależnościami (4.48) i (4.49). Dodatkowo obliczono wartości współczynników indeterminacji ( $\varphi^2$ ) i determinacji ( $R^2$ ), korzystając z zależności odpowiednio (4.50) i (3.65), przy czym wpływ liczby zmiennych objaśniających modelu uwzględniony został poprzez obliczenie ze wzoru (3.66) poprawionego współczynnika determinacji ( $R_{popr}^2$ ).

#### 5.3.1. Analiza modelu RTK dla obszaru LOS

Tłumienie sygnału radiowego w obszarze LOS szacowane jest przy pomocy równania (5.8), uzależniającego jego wartość od częstotliwości  $f$  sygnału i długości  $d$  trasy propagacji, w sposób wyrażony przez tłumienie propagacyjne w wolnej przestrzeni (patrz równanie (5.3)). Ponadto tłumienie w analizowanym obszarze zależy od różnicy wysokości  $h_{SB}$  zawieszenia anteny stacji bazowej i średniej wysokości  $h_{k,l}$  stosu kontenerów w pierwszym rzędzie pól składowych, przy czym wartość tłumienia jest tym mniejsza, im ta różnica jest większa. Wyniki analizy statystycznej modelu RTK dla obszaru LOS zestawione zostały w tab. 5.6.

Uzyskany błąd średni wynosi 0 dB, co wynika z zastosowanej metody wyznaczania współczynników modelu, natomiast standardowy błąd estymacji tłumienia propagacyjnego jest na poziomie 4,6 dB, co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu modelu do danych pomiarowych zebranych w analizowanym obszarze.

Tab. 5.6. Zestawienie wyników analizy statystycznej modelu RTK dla obszaru LOS

	<b>Obszar LOS</b>
$N$	54283
$\varphi^2$	0,235
$R^2$	0,765
$R^2_{popr}$	0,765
$ME [dB]$	0,0
$SEE [dB]$	4,6

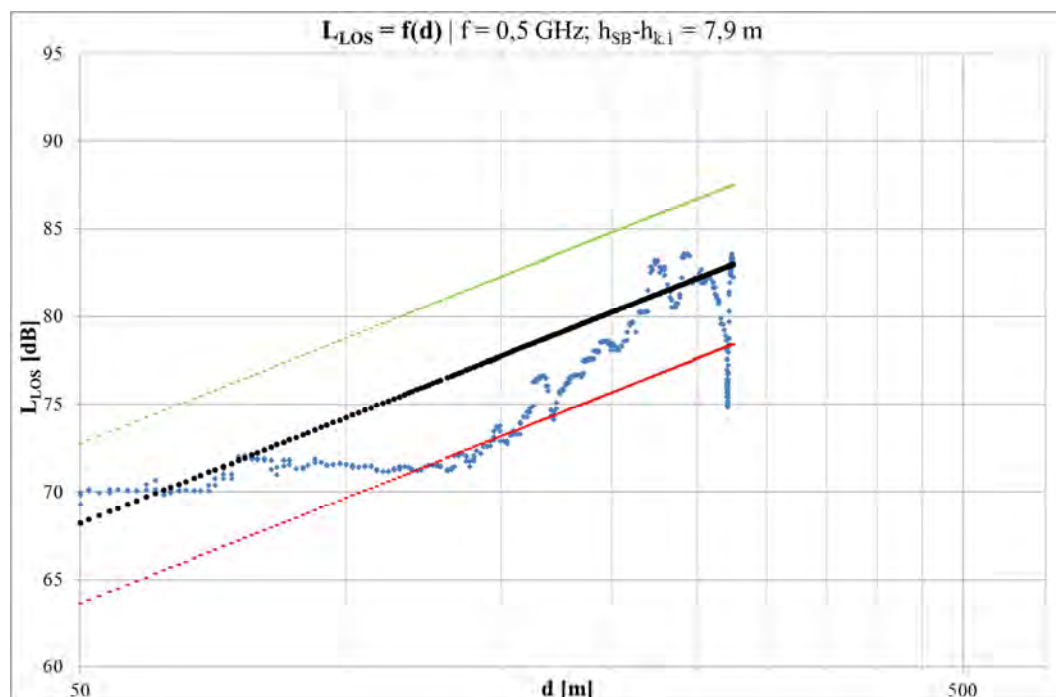
Dodatkowo, wartość współczynnika determinacji wskazuje, że zmienność tłumienia propagacyjnego w tym obszarze jest wyjaśniana w 76,5% przez zmienność parametrów modelu. Część zależna od innych przyczyn, niż uwzględnione w modelu, to zaledwie 23,5%.

W tab. 5.7 zestawiono wartości błędów  $ME$  i  $SEE$  dla obszaru LOS z podziałem na cztery różne częstotliwości sygnału radiowego. Model jest najlepiej dopasowany do danych pomiarowych dla 1 GHz, dla których standardowy błąd estymacji wynosi 3,8 dB. Jednakże dla tej częstotliwości model w największym stopniu (dla analizowanych przypadków) niedoszacowuje tłumienia propagacyjnego, o czym świadczy błąd średni na poziomie 1,3 dB. Najgorsze dopasowanie do danych empirycznych występuje dla częstotliwości 2 GHz, dla której błąd  $SEE$  wynosi 5,1 dB, natomiast błąd średni jest dodatni i wynosi 0,3 dB. Dla 500 MHz i dla 4 GHz model nieznacznie przeszacowuje wartości tłumienia propagacyjnego, o czym świadczą wartości  $ME$  odpowiednio -0,4 dB i -0,6 dB.

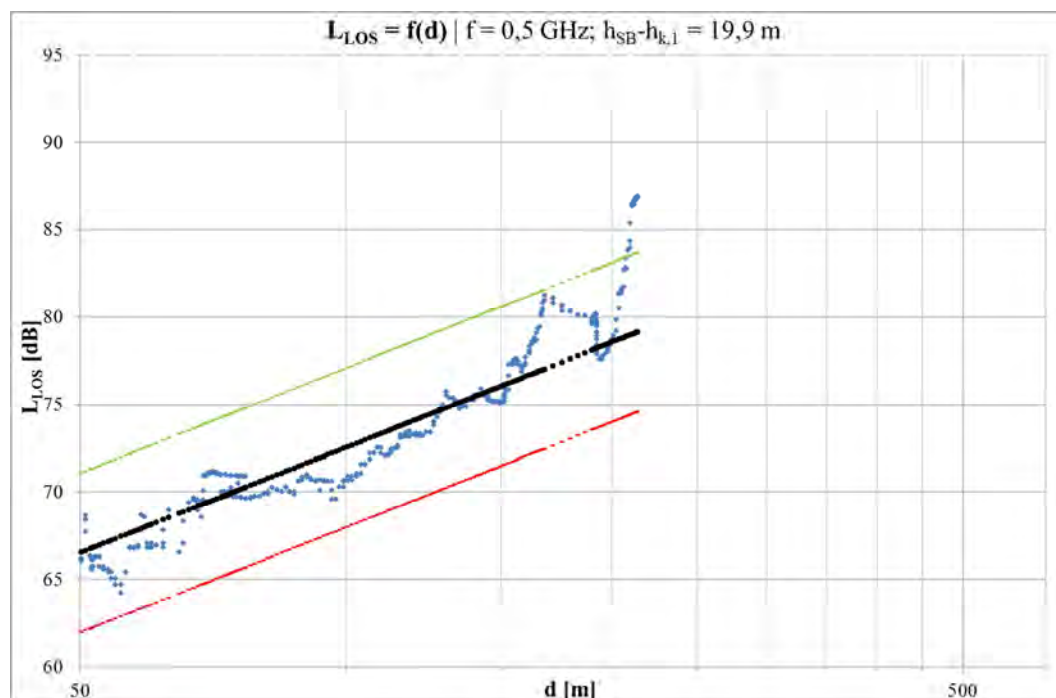
Tab. 5.7. Zestawienie błędów  $ME$  i  $SEE$  dla modelu RTK dla obszaru LOS dla różnych częstotliwości sygnału radiowego

	<b>Obszar LOS</b>		
	<b>ME [dB]</b>	<b>SEE [dB]</b>	<b>N</b>
<b>0,5 GHz</b>	-0,4	4,2	5138
<b>1 GHz</b>	1,3	3,8	9367
<b>2 GHz</b>	0,3	5,1	14466
<b>4 GHz</b>	-0,6	4,6	25312

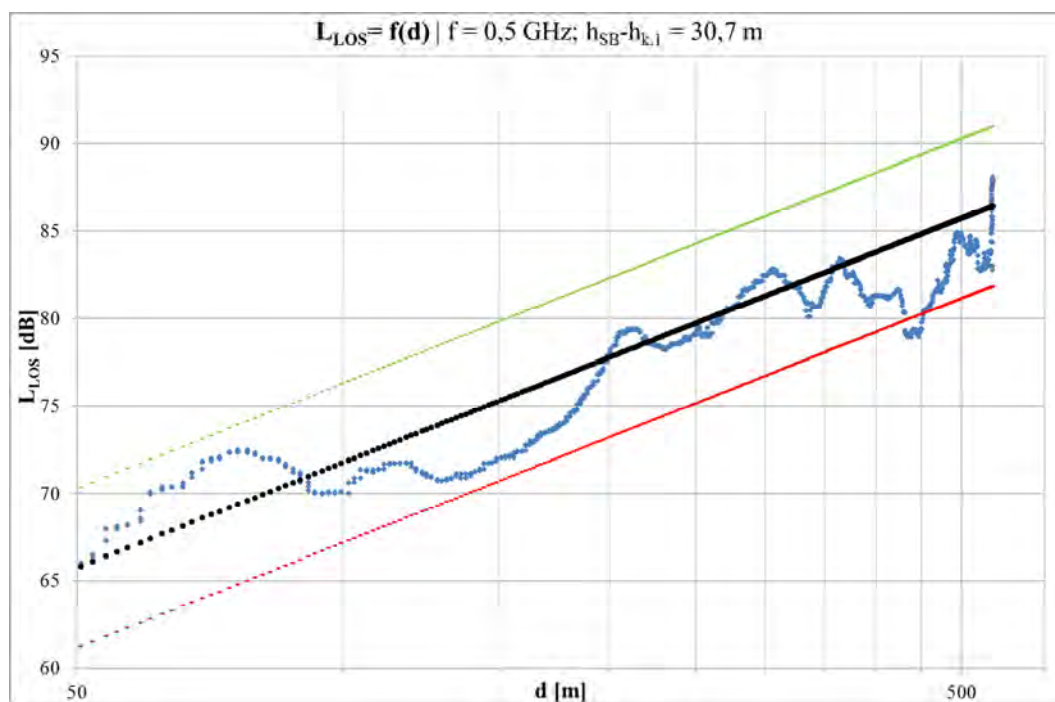
Na rys. 5.6 – 5.17 przedstawione zostały przykładowe wykresy tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS, przedstawiające wartości pomierzone ( $L_{p,LOS}$ ) oraz obliczone ( $L_{LOS}$ ) na podstawie modelu, dla wybranych fragmentów serii pomiarowych, a także wartości powiększone i pomniejszone o  $SEE$ .



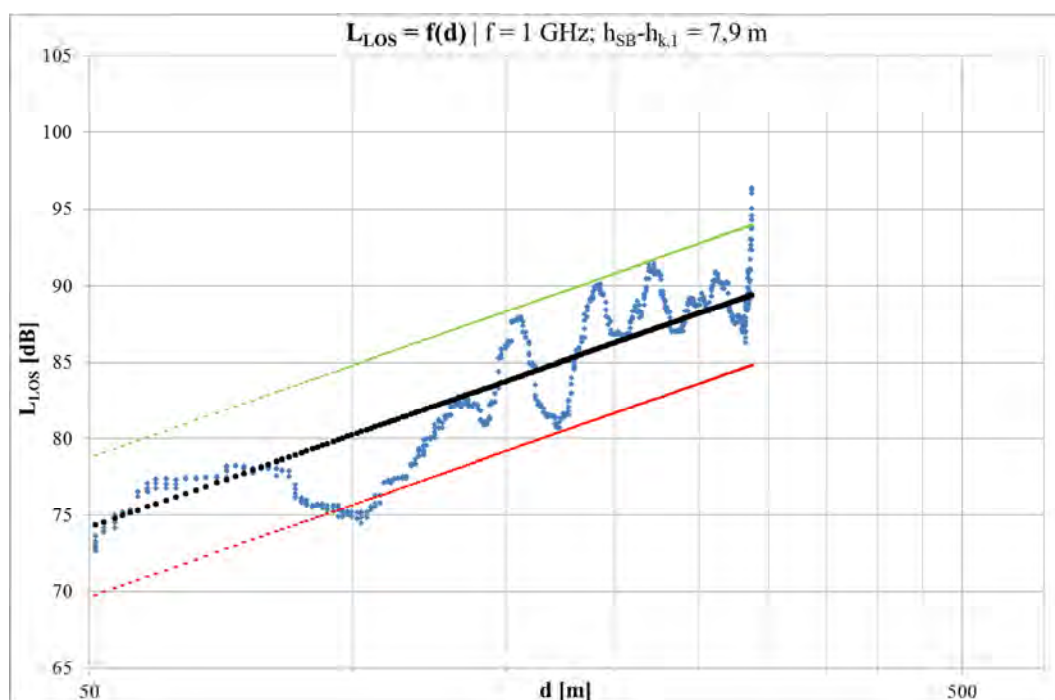
Rys. 5.6. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS –  $f=0,5\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=12\text{m}$  ( $L_{p,LOS}$  – niebieski,  $L_{LOS}$  – czarny,  $L_{LOS}+SEE$  – zielony,  $L_{LOS}-SEE$  – czerwony)



Rys. 5.7. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS –  $f=0,5\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=24\text{m}$  ( $L_{p,LOS}$  – niebieski,  $L_{LOS}$  – czarny,  $L_{LOS}+SEE$  – zielony,  $L_{LOS}-SEE$  – czerwony)



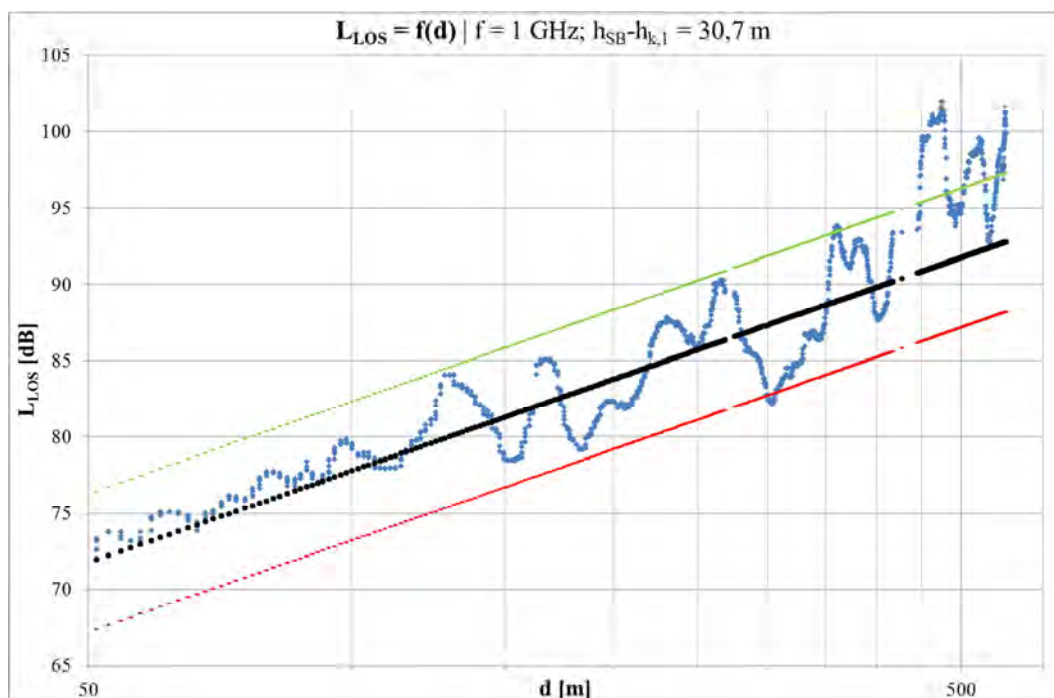
Rys. 5.8. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS –  $f=0,5$ GHz,  $h_{SB}=36$ m ( $L_{p,LOS}$  – niebieski,  $L_{LOS}$  – czarny,  $L_{LOS}+SEE$  – zielony,  $L_{LOS}-SEE$  – czerwony)



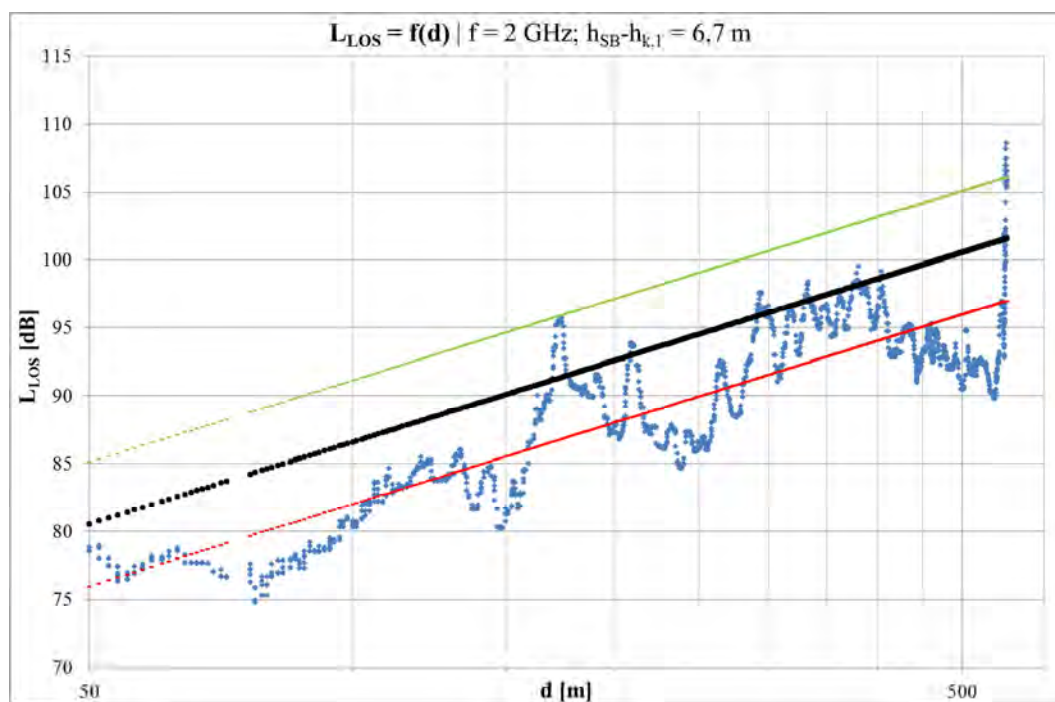
Rys. 5.9. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS –  $f=1$ GHz,  $h_{SB}=12$ m ( $L_{p,LOS}$  – niebieski,  $L_{LOS}$  – czarny,  $L_{LOS}+SEE$  – zielony,  $L_{LOS}-SEE$  – czerwony)



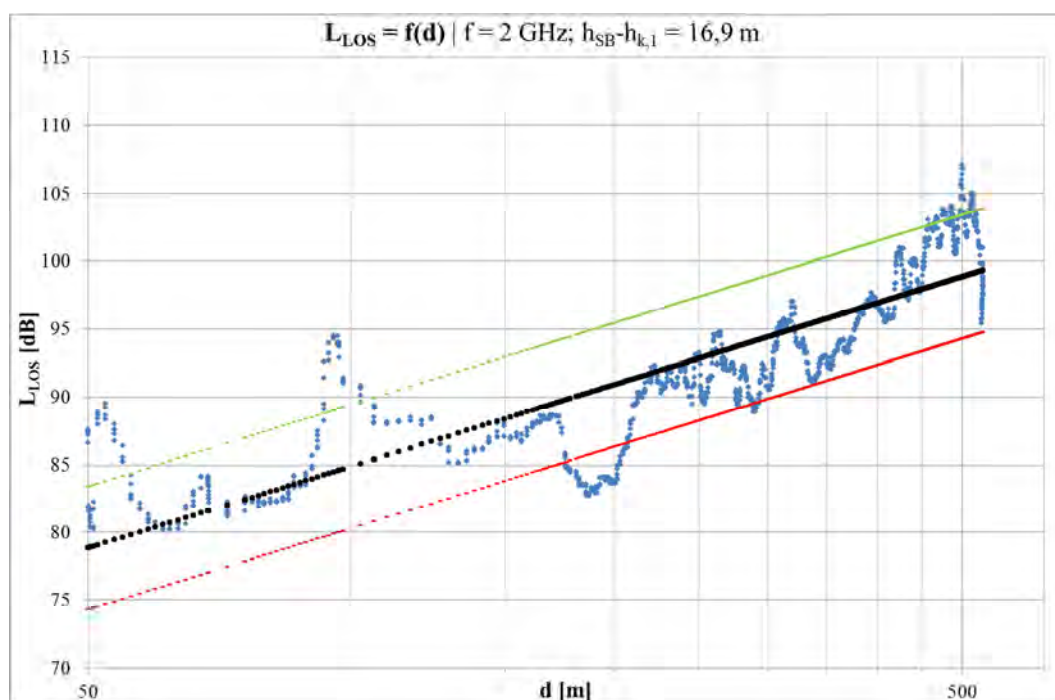
Rys. 5.10. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS –  $f=1\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=24\text{m}$  ( $L_{p,LOS}$  – niebieski,  $L_{LOS}$  – czarny,  $L_{LOS}+SEE$  – zielony,  $L_{LOS}-SEE$  – czerwony)



Rys. 5.11. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS –  $f=1\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=36\text{m}$  ( $L_{p,LOS}$  – niebieski,  $L_{LOS}$  – czarny,  $L_{LOS}+SEE$  – zielony,  $L_{LOS}-SEE$  – czerwony)

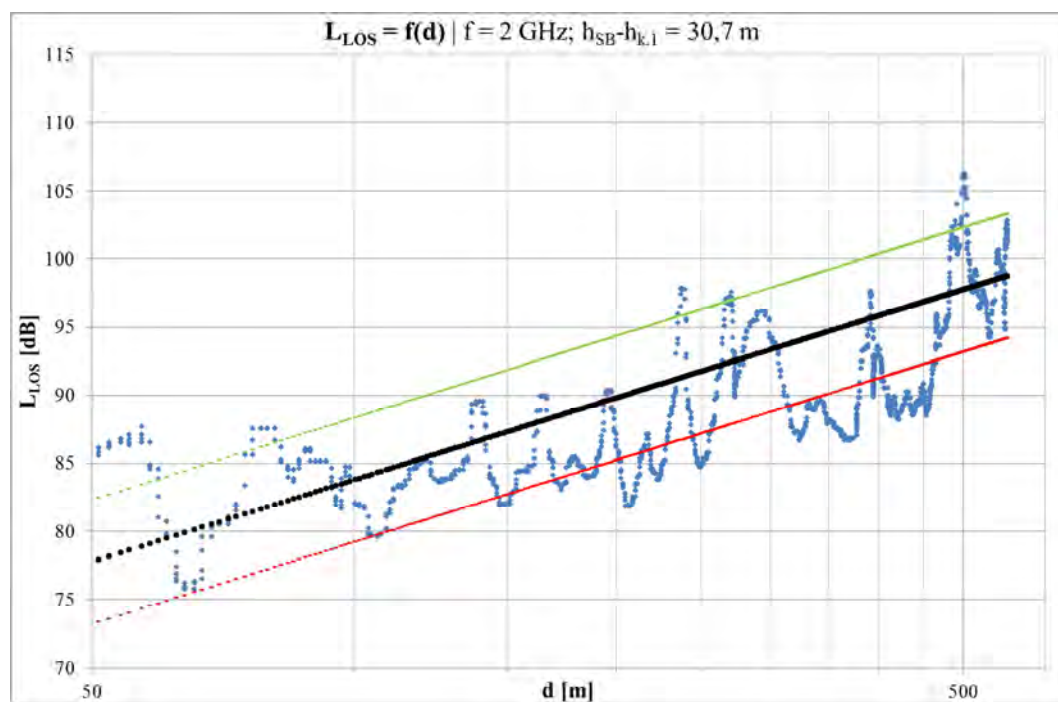


Rys. 5.12. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS –  $f=2$ GHz,  $h_{SB}=12$ m ( $L_{p,LOS}$  – niebieski,  $L_{LOS}$  – czarny,  $L_{LOS}+SEE$  – zielony,  $L_{LOS}-SEE$  – czerwony)

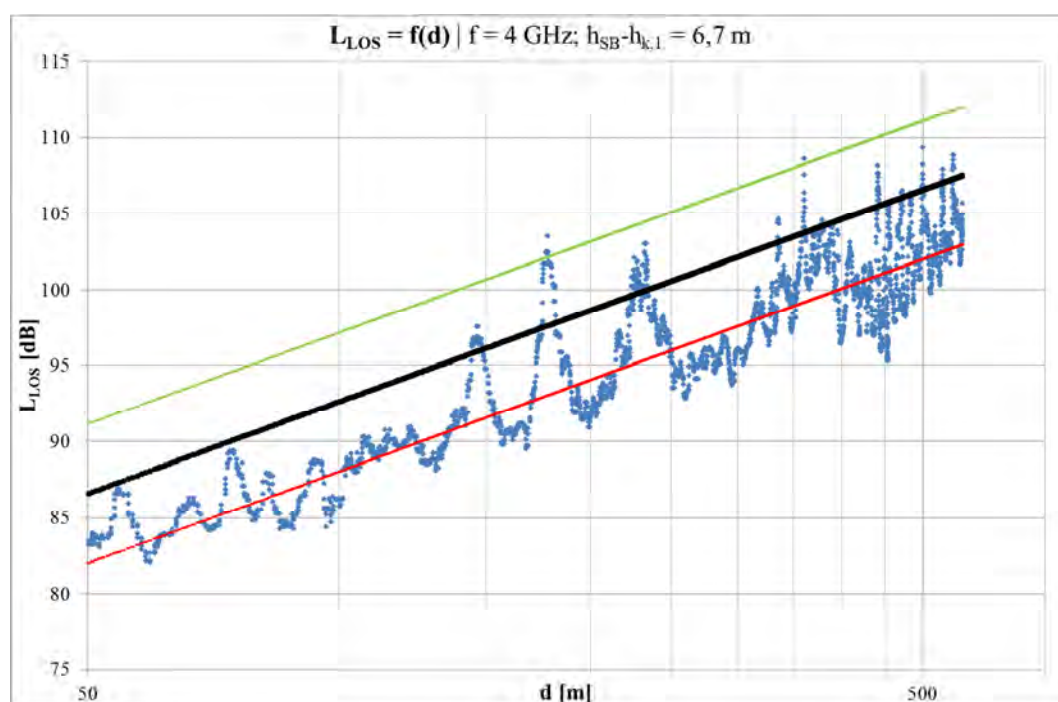


Rys. 5.13. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS –  $f=2$ GHz,  $h_{SB}=24$ m ( $L_{p,LOS}$  – niebieski,  $L_{LOS}$  – czarny,  $L_{LOS}+SEE$  – zielony,  $L_{LOS}-SEE$  – czerwony)



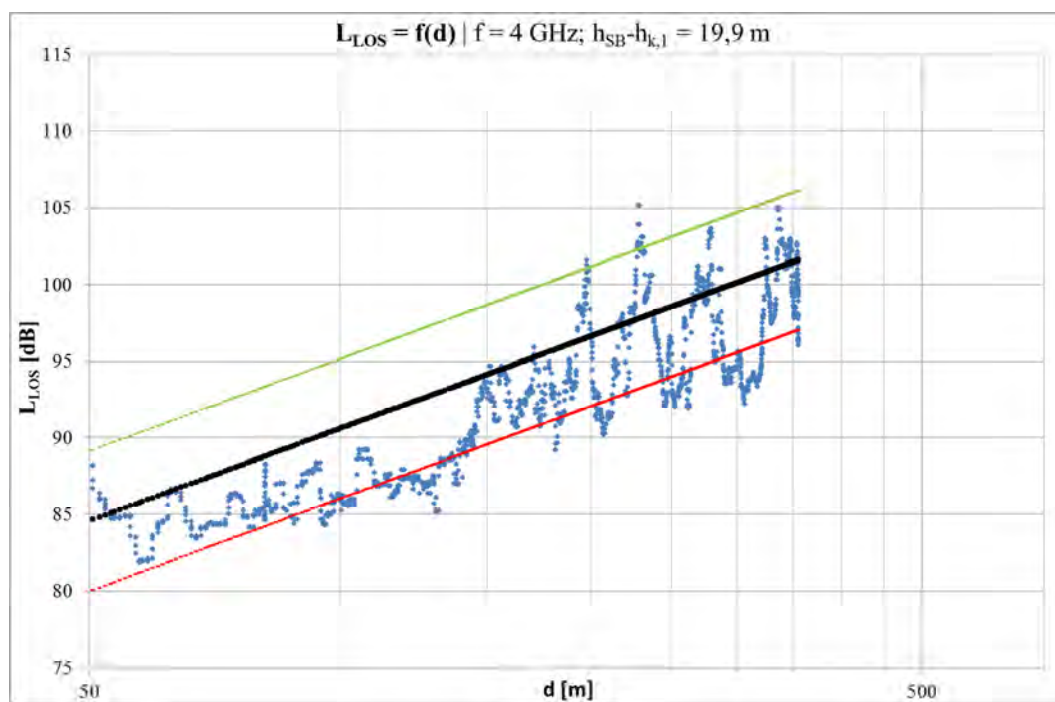


Rys. 5.14. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS –  $f=2\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=36\text{m}$  ( $L_{p,LOS}$  – niebieski,  $L_{LOS}$  – czarny,  $L_{LOS+SEE}$  – zielony,  $L_{LOS-SEE}$  – czerwony)

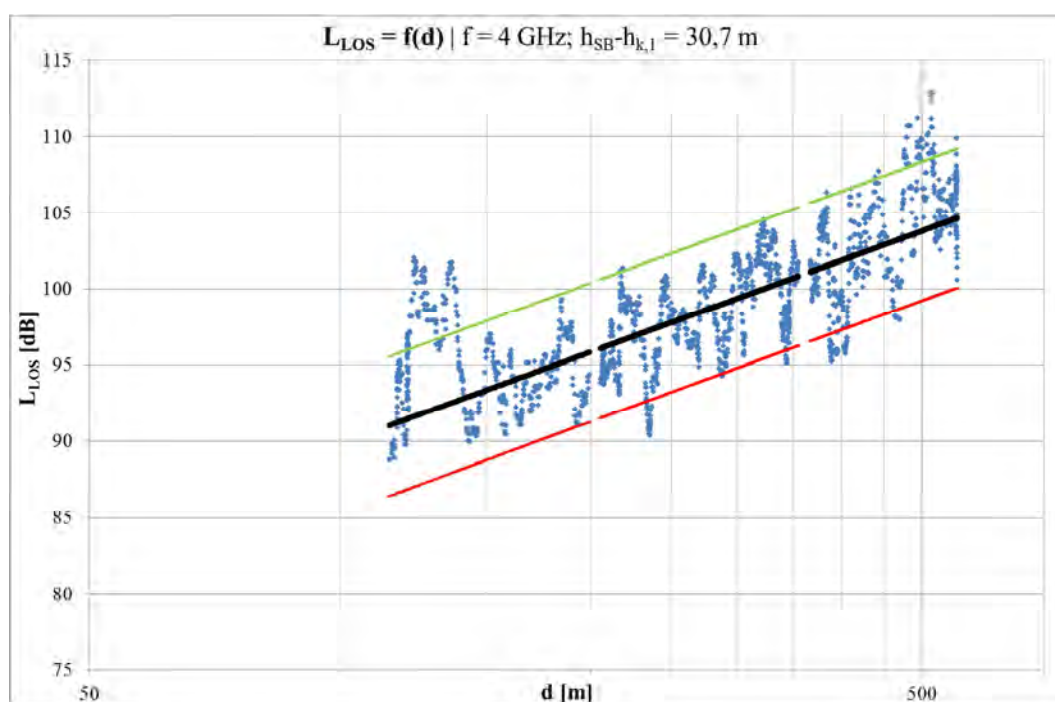


Rys. 5.15. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS –  $f=4\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=12\text{m}$  ( $L_{p,LOS}$  – niebieski,  $L_{LOS}$  – czarny,  $L_{LOS+SEE}$  – zielony,  $L_{LOS-SEE}$  – czerwony)





Rys. 5.16. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS –  $f=4$ GHz,  $h_{SB}=24$ m ( $L_{p,LOS}$  – niebieski,  $L_{LOS}$  – czarny,  $L_{LOS}+SEE$  – zielony,  $L_{LOS}-SEE$  – czerwony)



Rys. 5.17. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru LOS –  $f=4$ GHz,  $h_{SB}=36$ m ( $L_{p,LOS}$  – niebieski,  $L_{LOS}$  – czarny,  $L_{LOS}+SEE$  – zielony,  $L_{LOS}-SEE$  – czerwony)

Z wykresów widać, że pomierzone wartości są bardzo dobrze dopasowane do prostych regresji, które trafnie przewidują tendencję wzrostu tłumienia przy zwiększaniu długości trasy propagacji. Wartości empiryczne są w przeważającej liczbie skupione wokół wartości pomierzonych w przedziale  $\pm SEE$ .

### 5.3.2. Analiza modelu RTK dla obszaru kontenerowego

W obszarze kontenerowym tłumienie sygnału radiowego szacowane jest przy pomocy wyrażenia (5.9), które uzależnia jego wartość od częstotliwości  $f$  sygnału oraz długości  $d$  trasy propagacji, przy czym – w odróżnieniu od warunków LOS – tłumienie propagacyjne zwiększa się o 25 dB na każdą dekadę odległości stacji ruchomej od stacji bazowej łącza radiowego. Ponadto tłumienie propagacyjne maleje wraz ze wzrostem różnicy wysokości  $h_{SB}$  zawieszeni anteny stacji bazowej i średniej wysokości  $h_{k,d}$  stosów kontenerów na trasie propagacji sygnału. Wynika to z faktu, że im większa jest ta różnica, tym mniejsze są straty jej energii wskutek dyfrakcji. Z kolei wzrost różnicy między wysokością  $h_{SB}$  zawieszenia anteny stacji bazowej a średnią wysokością  $h_{k,r+1}$  stosu kontenerów w rzędzie kolejnym za stacją ruchomą powoduje wzrost tłumienia wskutek zmniejszania się ilości energii fal radiowych odbijanych od tych kontenerów i docierających do anteny stacji ruchomej. Ostatnim parametrem mającym wpływ na straty propagacyjne w obszarze kontenerowym jest kąt  $\varphi$  nadejścia fali radiowej do stacji ruchomej, którego dziesięciokrotny wzrost powoduje wzrost tłumienia o 4 dB. W tym miejscu warto wspomnieć, że wpływ tego kąta jest analogiczny do zaobserwowanego w środowiskach miejskich spadku tłumienia, kiedy kierunek propagacji fali radiowej jest bliższy równoległemu do osi ulicy, co zostało opisane w [41].

W tab. 5.8 przedstawione zostały wyniki analizy statystycznej modelu RTK dla obszaru kontenerowego, dla którego uzyskano błąd średni i standardowy błąd estymacji wynoszące odpowiednio 0 dB i 4,8 dB, co świadczy o dobrym dopasowaniu prostej regresji do danych empirycznych wartości, przy czym zerowy błąd średni wynika z zastosowanej metody wyznaczania współczynników modelu. Wartość współczynnika determinacji, jako miary zdeterminowanej zmienności tłumienia propagacyjnego poprzez zmienne modelu, wynosi 0,781, zatem zaledwie 21,9% zmienności tego tłumienia ma swoje źródło w działaniu przyczyn innych, niż opisane przez model.

Tab. 5.8. Zestawienie wyników analizy statystycznej modelu RTK dla obszaru kontenerowego

	<b>Obszar kontenerowy</b>
$N$	196239
$\varphi^2$	0,219
$R^2$	0,781
$R^2_{popr}$	0,781
$ME [dB]$	0,0
$SEE [dB]$	4,8

Zestawienie błędów średnich i standardowych błędów estymacji uzyskanych dla poszczególnych częstotliwości przedstawione zostało w tab. 5.9.

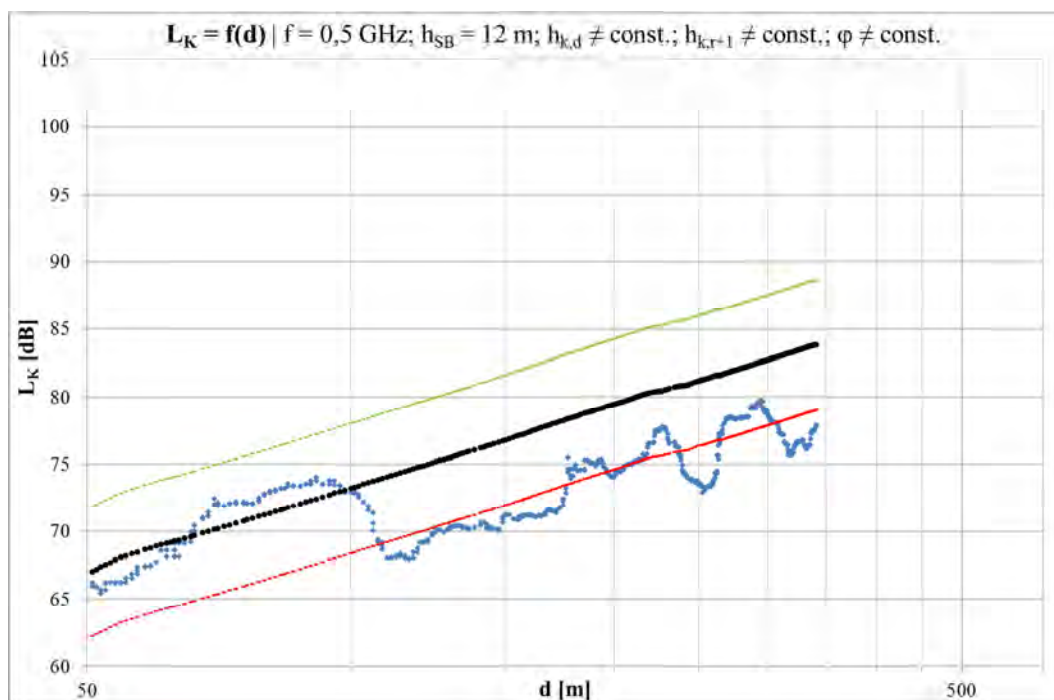
Tab. 5.9. Zestawienie błędów  $ME$  i  $SEE$  dla modelu RTK dla obszaru kontenerowego dla różnych częstotliwości sygnału radiowego

	<b>Obszar kontenerowy</b>		
	<b>ME [dB]</b>	<b>SEE [dB]</b>	<b>N</b>
<b>0,5 GHz</b>	-1,1	4,6	23005
<b>1 GHz</b>	1,0	5,0	41510
<b>2 GHz</b>	0,2	5,0	47394
<b>4 GHz</b>	-0,1	4,7	84330

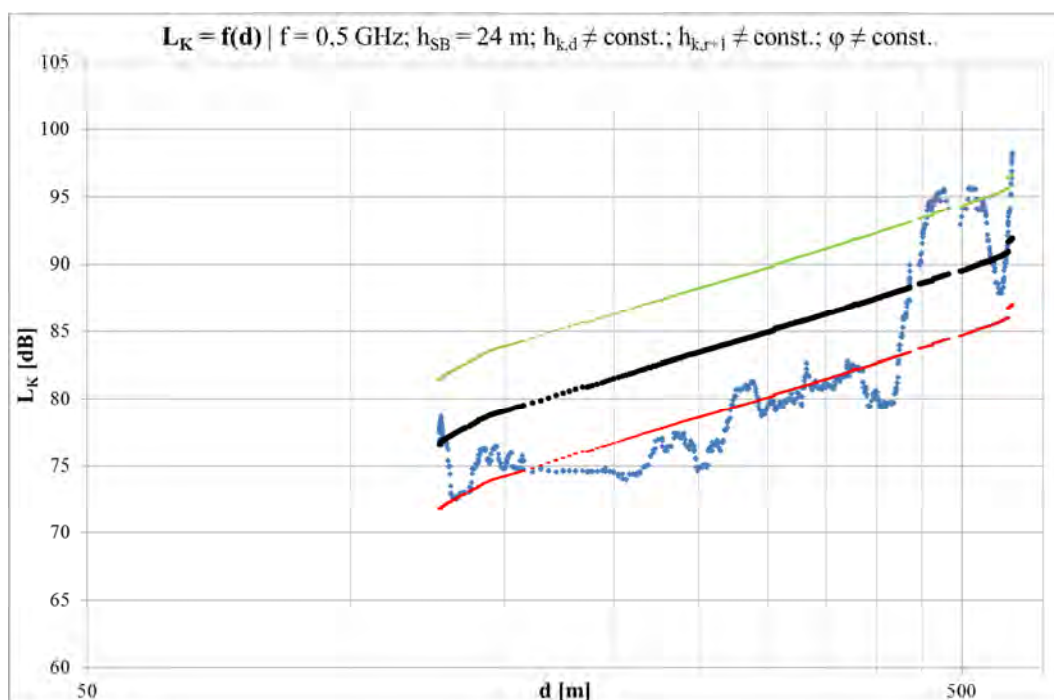
Jak można zauważyć, model najlepiej przystaje do danych pomiarowych dla częstotliwości 500 MHz i 4 GHz, dla których błąd  $SEE$  wynosi odpowiednio 4,6 dB i 4,7 dB, a błąd  $ME$  w obu przypadkach jest ujemny – co świadczy o niedużym przeszacowaniu tłumienia – i wynosi odpowiednio -1,1 dB i -0,1 dB. Gorsze wyniki uzyskano dla częstotliwości 1 GHz i 2 GHz, dla których błąd  $SEE$  wynosi 5 dB, a błąd  $ME$  wskazuje na małe niedoszacowanie strat propagacyjnych i wynosi odpowiednio 1 dB i 0,2 dB.

Przykładowe wykresy tłumienia propagacyjnego pomierzonego ( $L_{p,K}$ ) w obszarze kontenerowym oraz obliczonego ( $L_K$ ) na podstawie nowego modelu przedstawione zostały na rys. 5.18 – 5.29, gdzie zaznaczono też przedział wokół wartości pomierzonych o szerokości  $\pm SEE$ . Skokowe zmiany obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego widoczne na wykresach z rys. 5.20, 5.21, 5.23, 5.24 i 5.27 są wynikiem skokowych zmian średnich wysokości  $h_{k,d}$  oraz  $h_{k,r+1}$ , które mają miejsce podczas przemieszczania się stacji ruchomej między kolejnymi rzędami pól skladowych. Z kolei przerwy w wykresach (np. rys. 5.26) spowodowane są faktem, że ze względu na nieustanną pracę terminalu kontene-

rowego wykonywanie pomiarów na niektórych odcinkach było niemożliwe. Zazwyczaj było to związane z trwającym przeładunkiem kontenerów, bądź przemieszczaniem się suwnicy placowej.



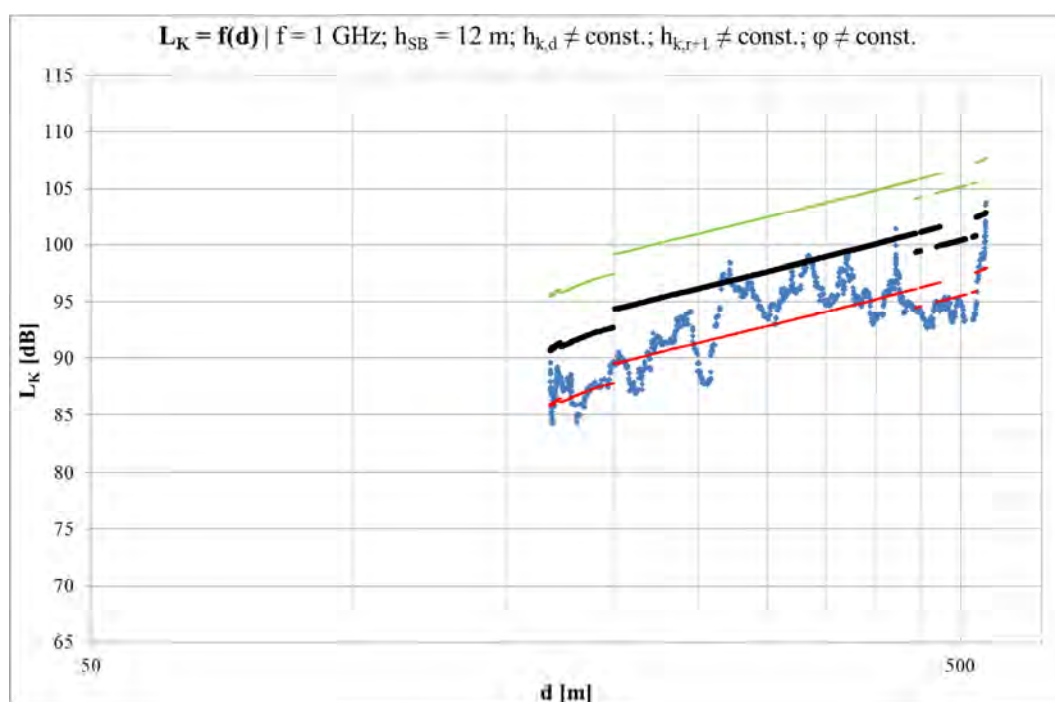
Rys. 5.18. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru kontenerowego –  $f=0,5$ GHz,  $h_{SB}=12$ m ( $L_{p,K}$  – niebieski,  $L_K$  – czarny,  $L_K+SEE$  – zielony,  $L_K-SEE$  – czerwony)



Rys. 5.19. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru kontenerowego –  $f=0,5$ GHz,  $h_{SB}=24$ m ( $L_{p,K}$  – niebieski,  $L_K$  – czarny,  $L_K+SEE$  – zielony,  $L_K-SEE$  – czerwony)



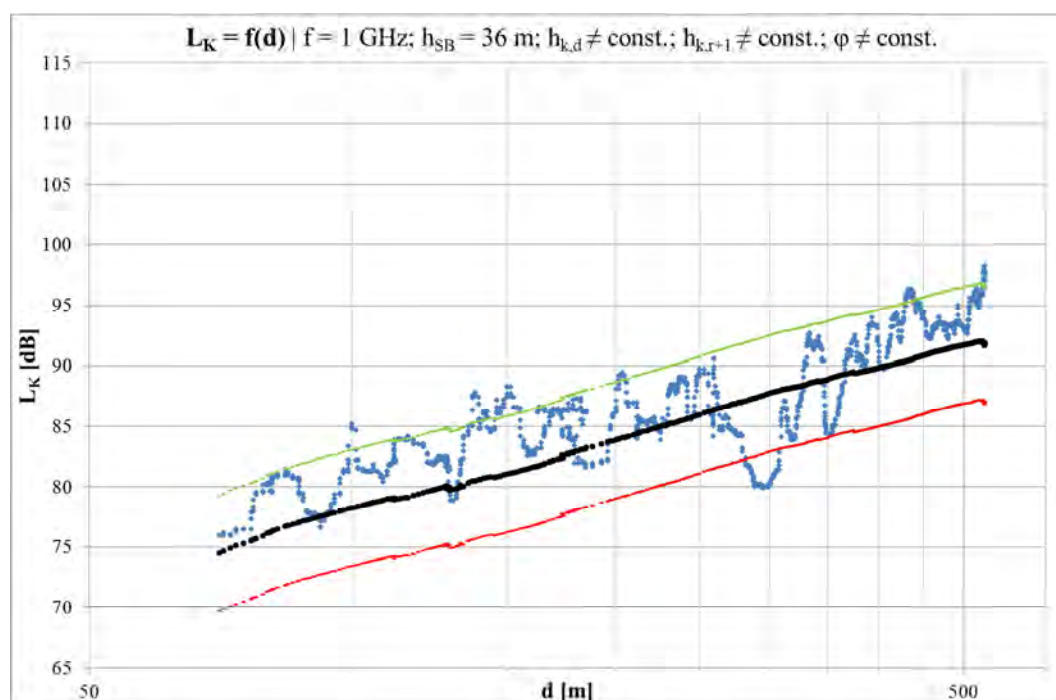
Rys. 5.20. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru kontenerowego –  $f=0,5\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=36\text{m}$  ( $L_{p,K}$  – niebieski,  $L_K$  – czarny,  $L_K+SEE$  – zielony,  $L_K-SEE$  – czerwony)



Rys. 5.21. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru kontenerowego –  $f=1\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=12\text{m}$  ( $L_{p,K}$  – niebieski,  $L_K$  – czarny,  $L_K+SEE$  – zielony,  $L_K-SEE$  – czerwony)

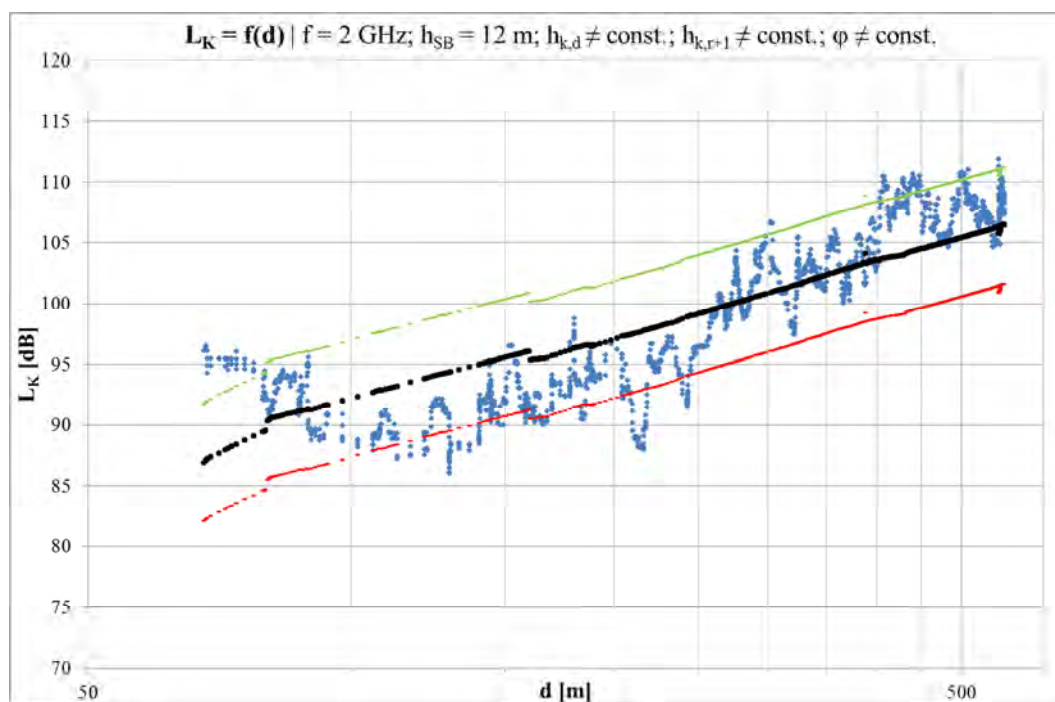


Rys. 5.22. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru kontenerowego –  $f=1\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=24\text{m}$  ( $L_{p,K}$  – niebieski,  $L_K$  – czarny,  $L_K+SEE$  – zielony,  $L_K-SEE$  – czerwony)



Rys. 5.23. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru kontenerowego –  $f=1\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=36\text{m}$  ( $L_{p,K}$  – niebieski,  $L_K$  – czarny,  $L_K+SEE$  – zielony,  $L_K-SEE$  – czerwony)

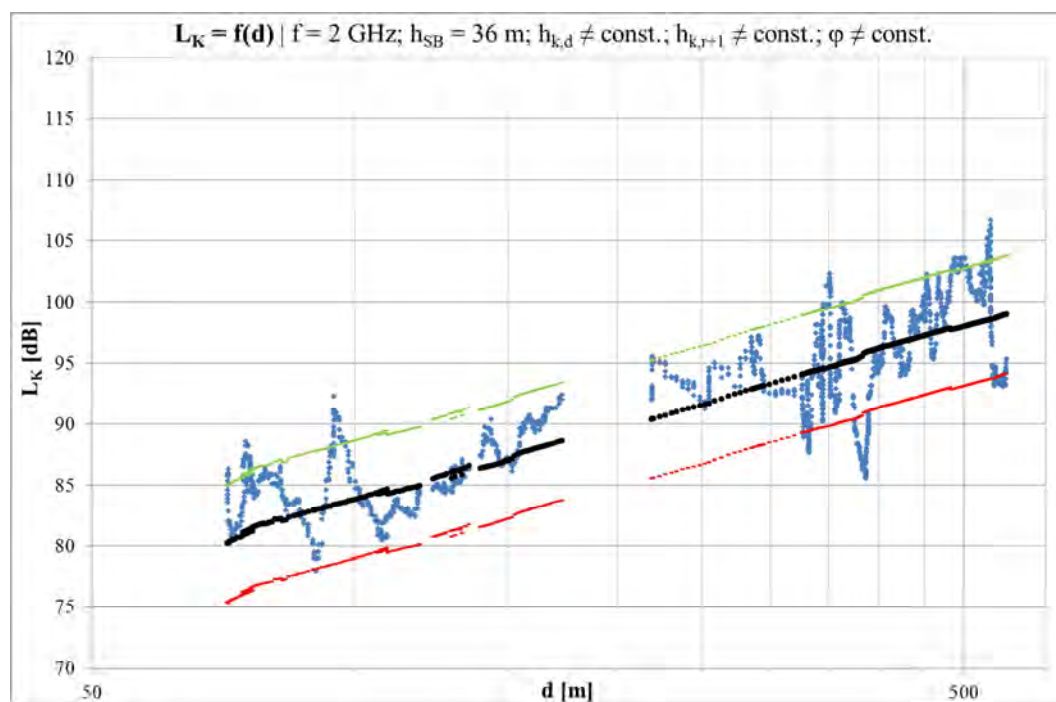




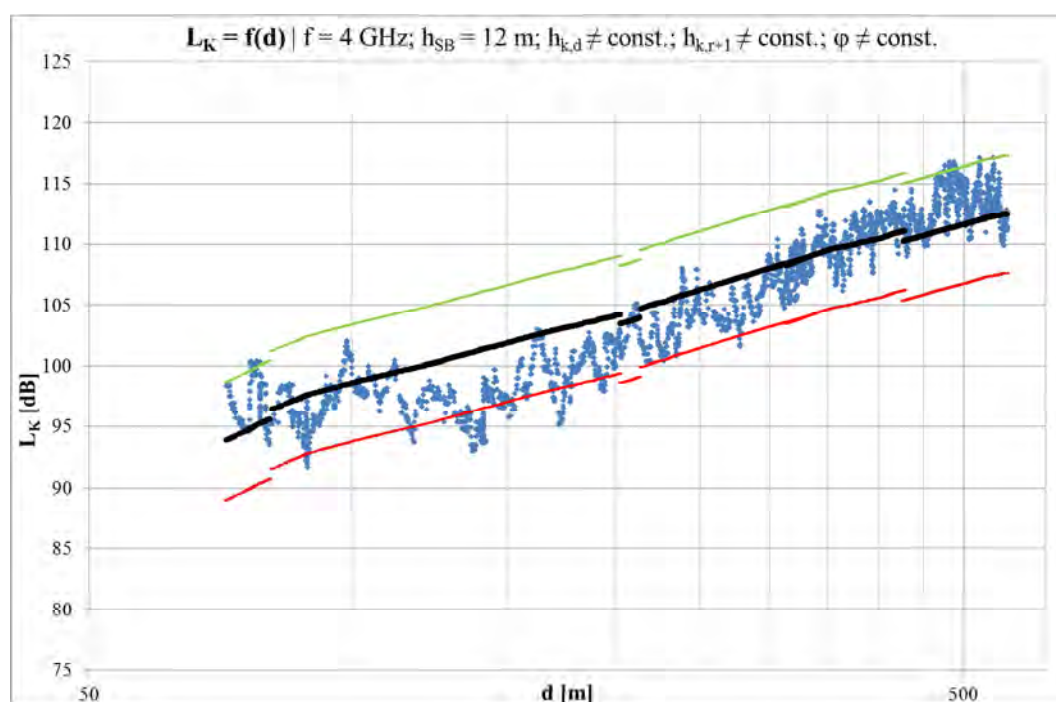
Rys. 5.24. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru kontenerowego –  $f=2\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=12\text{m}$  ( $L_{p,K}$  – niebieski,  $L_K$  – czarny,  $L_K+SEE$  – zielony,  $L_K-SEE$  – czerwony)



Rys. 5.25. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru kontenerowego –  $f=2\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=24\text{m}$  ( $L_{p,K}$  – niebieski,  $L_K$  – czarny,  $L_K+SEE$  – zielony,  $L_K-SEE$  – czerwony)

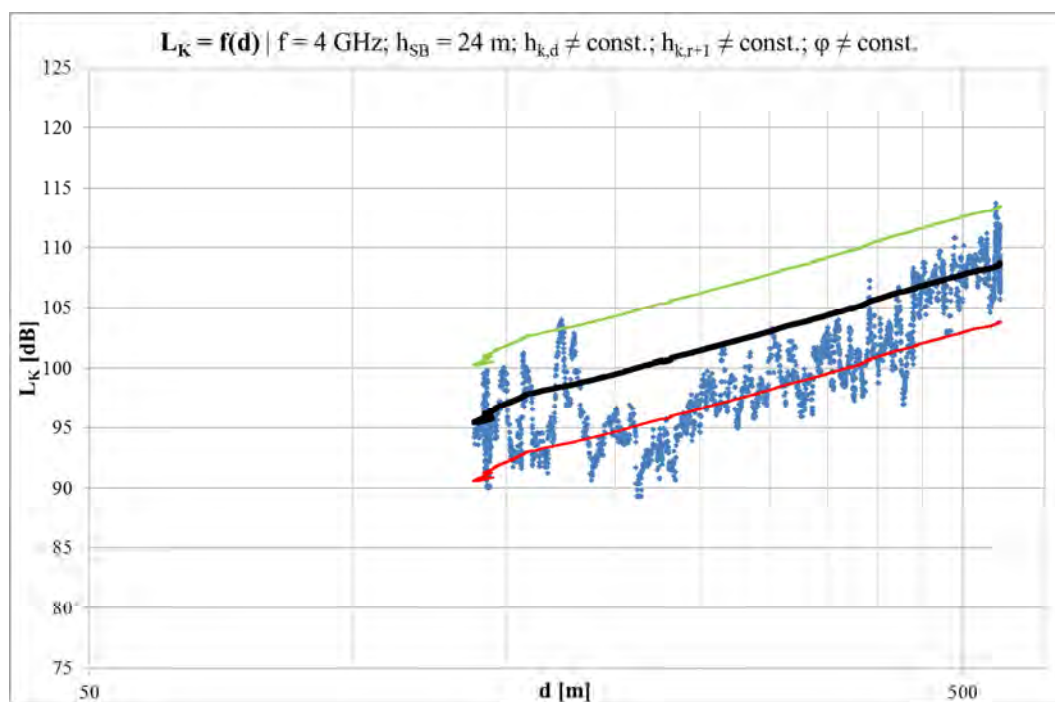


Rys. 5.26. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru kontenerowego –  $f=2\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=36\text{m}$  ( $L_{p,K}$  – niebieski,  $L_K$  – czarny,  $L_K+SEE$  – zielony,  $L_K-SEE$  – czerwony)

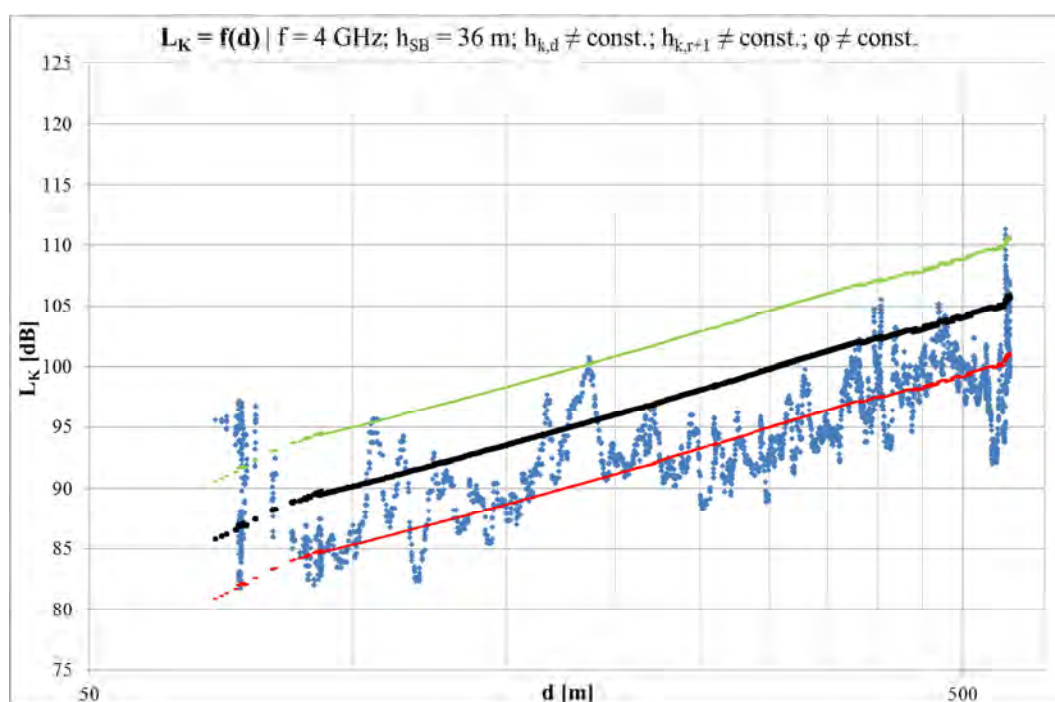


Rys. 5.27. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru kontenerowego –  $f=4\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=12\text{m}$  ( $L_{p,K}$  – niebieski,  $L_K$  – czarny,  $L_K+SEE$  – zielony,  $L_K-SEE$  – czerwony)





Rys. 5.28. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru kontenerowego –  $f=4$ GHz,  $h_{SB}=24$ m ( $L_{p,K}$  – niebieski,  $L_K$  – czarny,  $L_K+SEE$  – zielony,  $L_K-SEE$  – czerwony)



Rys. 5.29. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru kontenerowego –  $f=4$ GHz,  $h_{SB}=36$ m ( $L_{p,K}$  – niebieski,  $L_K$  – czarny,  $L_K+SEE$  – zielony,  $L_K-SEE$  – czerwony)

Na przykładowych wykresach – podobnie jak miało to miejsce dla przypadku obszaru LOS – widać, że model poprawnie przewiduje tendencję wzrostową tłumienia fal radiowych przy wzroście długości trasy propagacji oraz że zdecydowana większość danych pomiarowych mieści się w przedziale wokół prostej regresji, wyznaczonym przez standardowy błąd estymacji. Jednakże warto odnotować sytuacje, w których tłumienie pomierzone wyraźnie maleje na dłuższych, bądź krótszych odcinkach trasy propagacyjnej, co ma miejsce np. dla częstotliwości 500 MHz i wysokości zawieszenia anteny stacji bazowej wynoszącej 24 m, dla wartości  $d$  od około 150 m do ok 400 m (rys. 5.19) oraz w mniejszej skali, np. dla częstotliwości 1 GHz, dla wartości  $d$  około 300 m (rys. 5.23). Są to przypadki szczególne, w których tłumienie maleje nawet o 8 dB, co spowodowane może być brakiem kontenerów na jednym z pól składowych w którymś z rzędów, bądź sytuacją, w której stacja ruchoma i stacja bazowa są w jednej linii wzdłuż ciągu komunikacyjnego prostopadłego do ciągów głównych. Należy jednak zaznaczyć, że są to przypadki specyficzne i nie wpływają znacząco na dokładność modelu jako całości.

### 5.3.3. Analiza modelu RTK dla obszaru pozakontenerowego

W obszarze pozakontenerowym model RTK uzależnia tłumienie propagacyjne zgodnie ze wzorem (5.10). Wpływ częstotliwości  $f$  sygnału radiowego jest taki sam jak w dwóch poprzednich przypadkach, natomiast każda zmiana długości  $d$  trasy propagacji o dekadę skutkuje wzrostem strat o 30 dB. Im większa różnica między wysokością  $h_{SB}$  instalacji anteny stacji bazowej a średnią wysokością  $h_{k,t}$  stosów kontenerów na terenie całego terminalu, tym mniejsze jest tłumienie, co jest wynikiem mniejszego wpływu zjawiska dyfrakcji na krawędziach kontenerów na trasie rozchodzenia się sygnału radiowego. Z kolei im większy jest powierzchniowy współczynnik  $S_t$  zajętości terminalu, tym większe jest tłumienie, co ma związek z większą liczbą przeszkód terenowych mających duży wpływ na energię sygnału docierającego do anteny stacji ruchomej. Wpływ kąta  $\varphi$  nadejścia fali radiowej jest taki sam, jak w przypadku dla obszaru kontenerowego.

W tab. 5.10 zestawiono wyniki analizy statystycznej modelu RTK dla obszaru pozakontenerowego. Uzyskane wyniki są najlepsze spośród analizowanych obszarów badanego środowiska propagacyjnego. Standardowy błąd estymacji na poziomie 4,3 dB pozwala na stwierdzenie, że model bardzo dobrze przystaje do danych uzyskanych na drodze pomiarowej i pozwala na szacowanie tłumienia sygnału radiowego z zadowalającą dokładnością. Wartości współczynnika determinacji oraz indeterminacji wskazują, że aż

83,6% zmienności tego parametru jest wyjaśniana zmiennością parametrów modelu, a inne nieuwzględnione przez model przyczyny mają wpływ zaledwie na 16,4% zmienności tłumienia. Jest to wynik bardzo dobry, biorąc pod uwagę, że do pozytywnego zwerifikowania modelu regresji, poprawiony współczynnik determinacji musi być większy od 0,6 [36].

Tab. 5.10. Zestawienie wyników analizy statystycznej modelu RTK dla obszaru pozakontenerowego

	<b>Obszar pozakontenerowy</b>
$N$	29195
$\varphi^2$	0,164
$R^2$	0,836
$R^2_{popr}$	0,836
$ME [dB]$	0,0
$SEE [dB]$	4,3

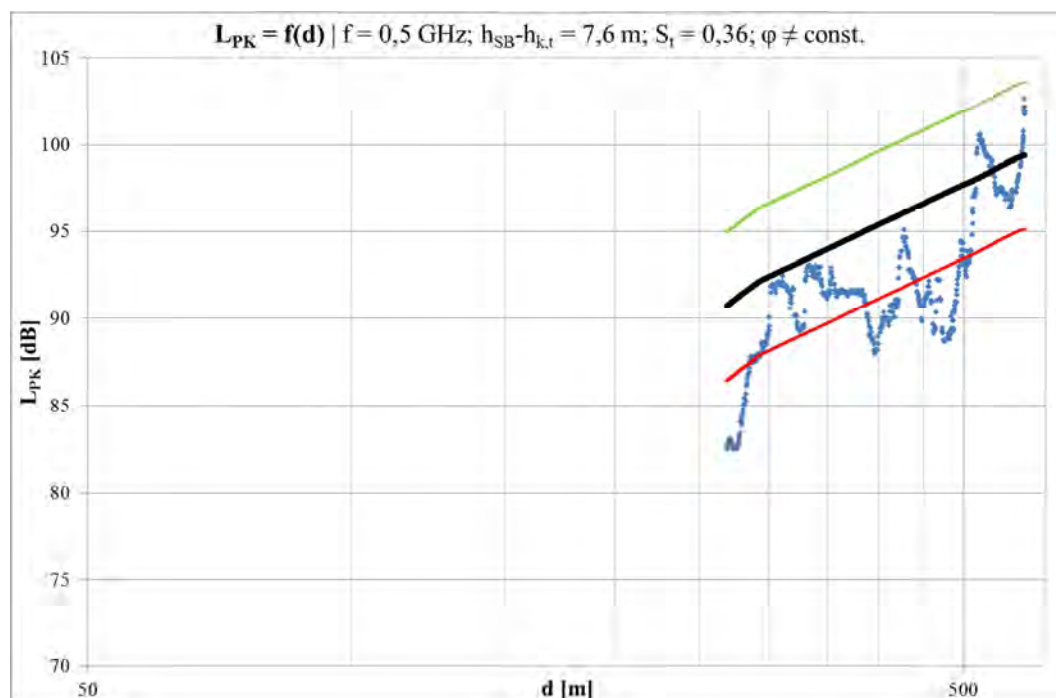
Zestawienie wartości błędów średnich i standardowych błędów estymacji dla modelu RTK dla obszaru pozakontenerowego oraz dla różnych częstotliwości sygnału radiowego przedstawione zostało w tab. 5.11.

Tab. 5.11. Zestawienie błędów ME i SEE dla modelu RTK dla obszaru pozakontenerowego dla różnych częstotliwości sygnału radiowego

	<b>Obszar pozakontenerowy</b>		
	<b>ME [dB]</b>	<b>SEE [dB]</b>	<b>N</b>
<b>0,5 GHz</b>	-2,9	4,6	3082
<b>1 GHz</b>	1,5	5,2	6218
<b>2 GHz</b>	-0,1	4,0	8763
<b>4 GHz</b>	0,1	3,7	11132

Model jest najgorzej dopasowany do danych pomiarowych dla częstotliwości 1 GHz, gdzie standardowy błąd estymacji wynosi 5,2 dB, natomiast błąd średni wynosi 1,5 dB. Duże przeszacowanie tłumienia propagacyjnego ma miejsce dla częstotliwości 500 MHz, dla której błąd średni wynosi -2,9 dB, a standardowy błąd estymacji jest na poziomie 4,6 dB. Najlepsze wyniki uzyskano dla częstotliwości 2 GHz i 4 GHz, gdzie błędy średnie są prawie równe zero, a standardowe błędy estymacji wynoszą odpowiednio 4 dB i 3,7 dB.

Przykładowe wykresy tłumienia propagacyjnego pomierzonego ( $L_{p,PK}$ ) w obszarze pozakontenerowym oraz obliczonego ( $L_{PK}$ ) przy pomocy modelu dla tegoż obszaru przedstawione zostały na rys. 5.30 – 5.41.



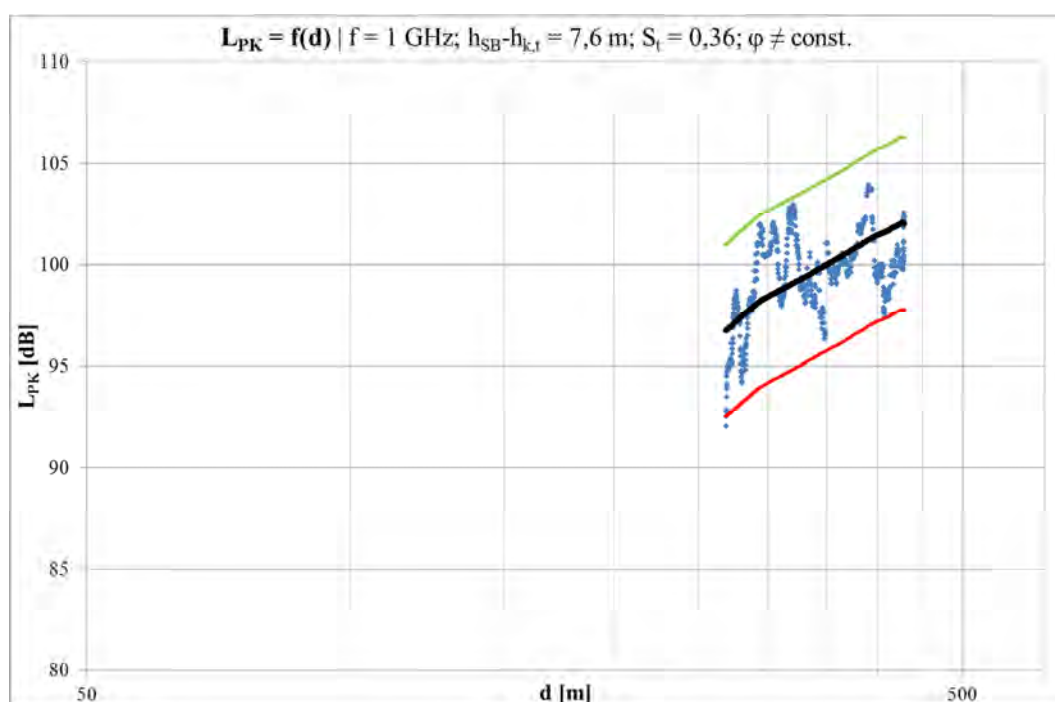
Rys. 5.30. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru pozakontenerowego –  $f=0,5\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=12\text{m}$  ( $L_{p,PK}$  – niebieski,  $L_{PK}$  – czarny,  $L_{PK}+\text{SEE}$  – zielony,  $L_{PK}-\text{SEE}$  – czerwony)



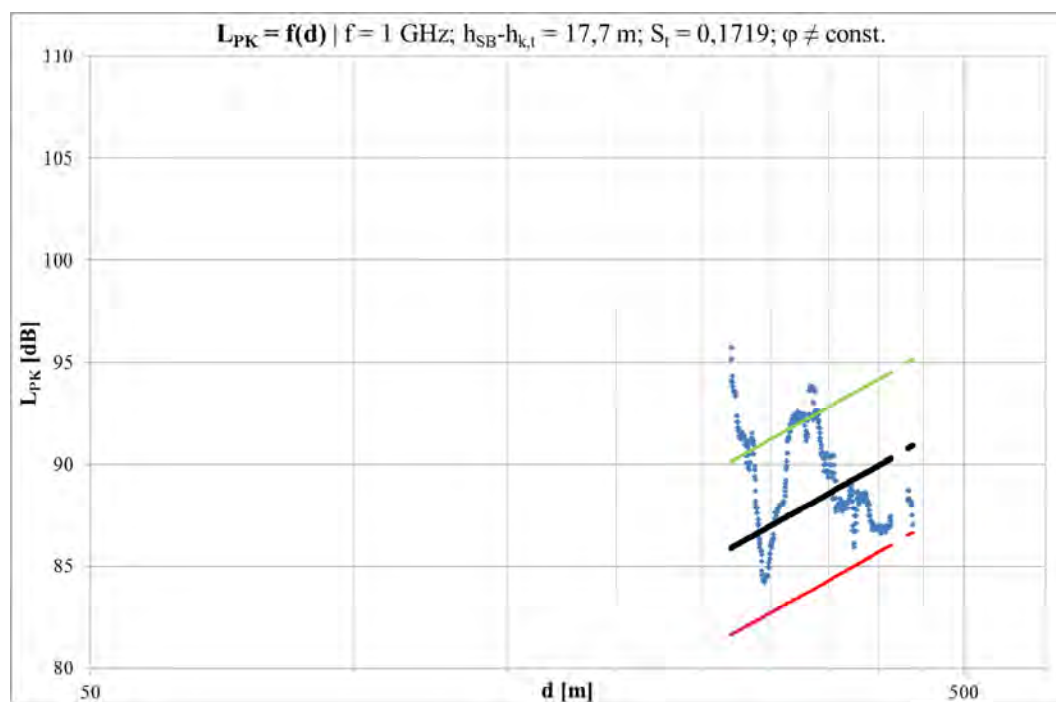
Rys. 5.31. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru pozakontenerowego –  $f=0,5\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=24\text{m}$  ( $L_{p,PK}$  – niebieski,  $L_{PK}$  – czarny,  $L_{PK}+\text{SEE}$  – zielony,  $L_{PK}-\text{SEE}$  – czerwony)



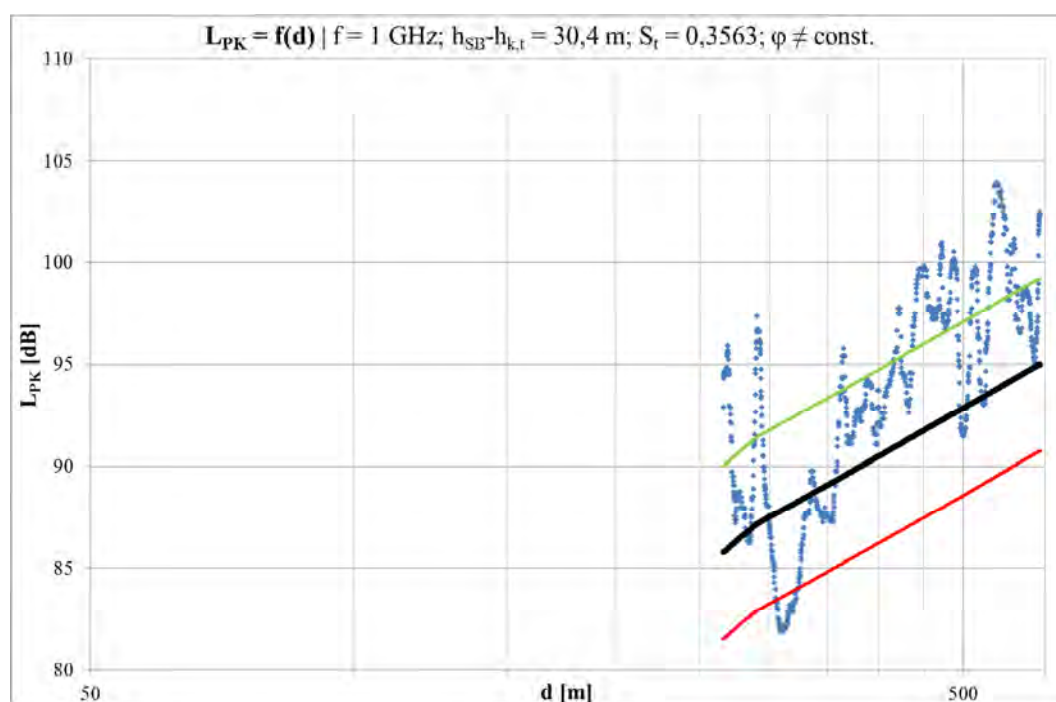
Rys. 5.32. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru pozakontenerowego –  $f=0,5\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=36\text{m}$  ( $L_{p,PK}$  – niebieski,  $L_{PK}$  – czarny,  $L_{PK}+SEE$  – zielony,  $L_{PK}-SEE$  – czerwony)



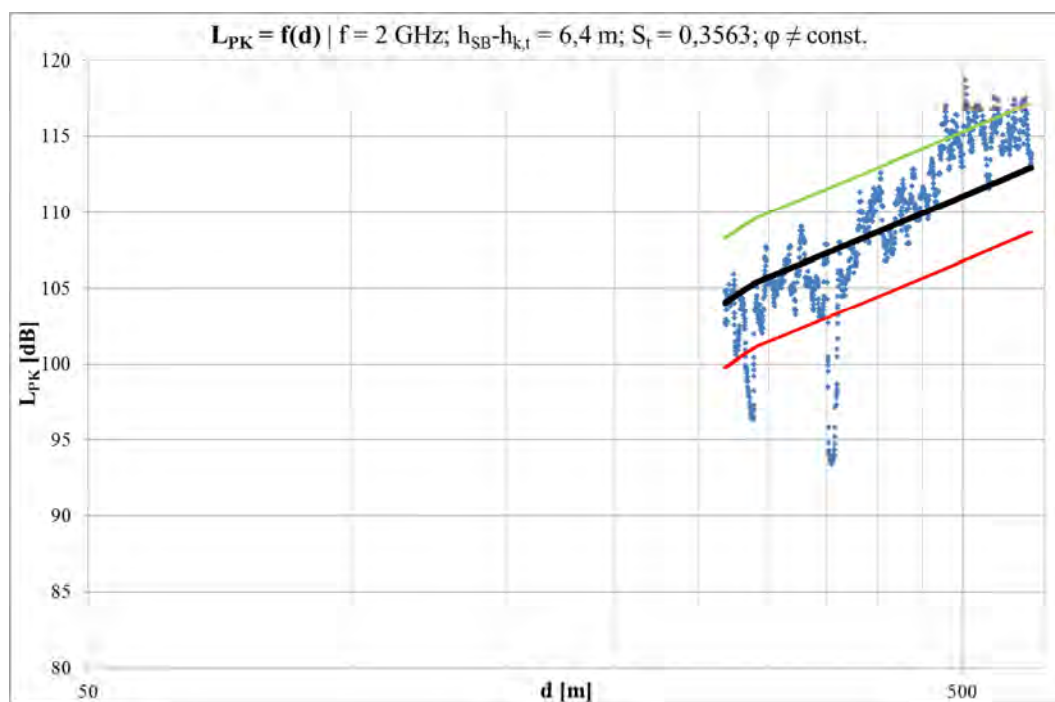
Rys. 5.33. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru pozakontenerowego –  $f=1\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=12\text{m}$  ( $L_{p,PK}$  – niebieski,  $L_{PK}$  – czarny,  $L_{PK}+SEE$  – zielony,  $L_{PK}-SEE$  – czerwony)



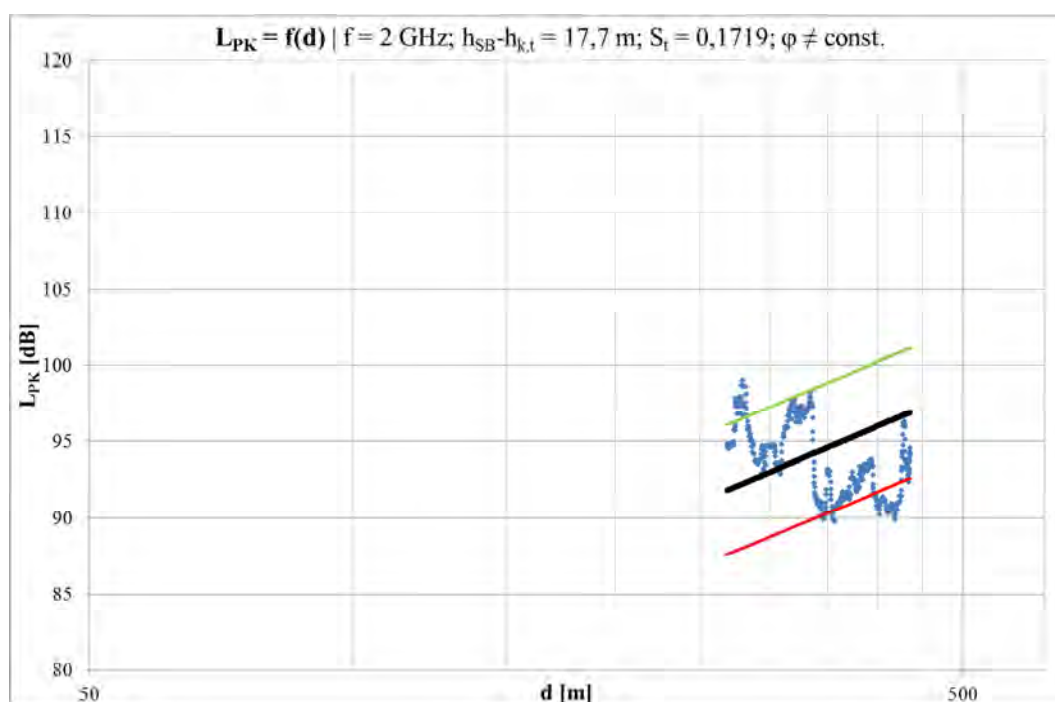
Rys. 5.34. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru pozakontenerowego –  $f=1\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=24\text{m}$  ( $L_{p,PK}$  – niebieski,  $L_{PK}$  – czarny,  $L_{PK}+SEE$  – zielony,  $L_{PK}-SEE$  – czerwony)



Rys. 5.35. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru pozakontenerowego –  $f=1\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=36\text{m}$  ( $L_{p,PK}$  – niebieski,  $L_{PK}$  – czarny,  $L_{PK}+SEE$  – zielony,  $L_{PK}-SEE$  – czerwony)

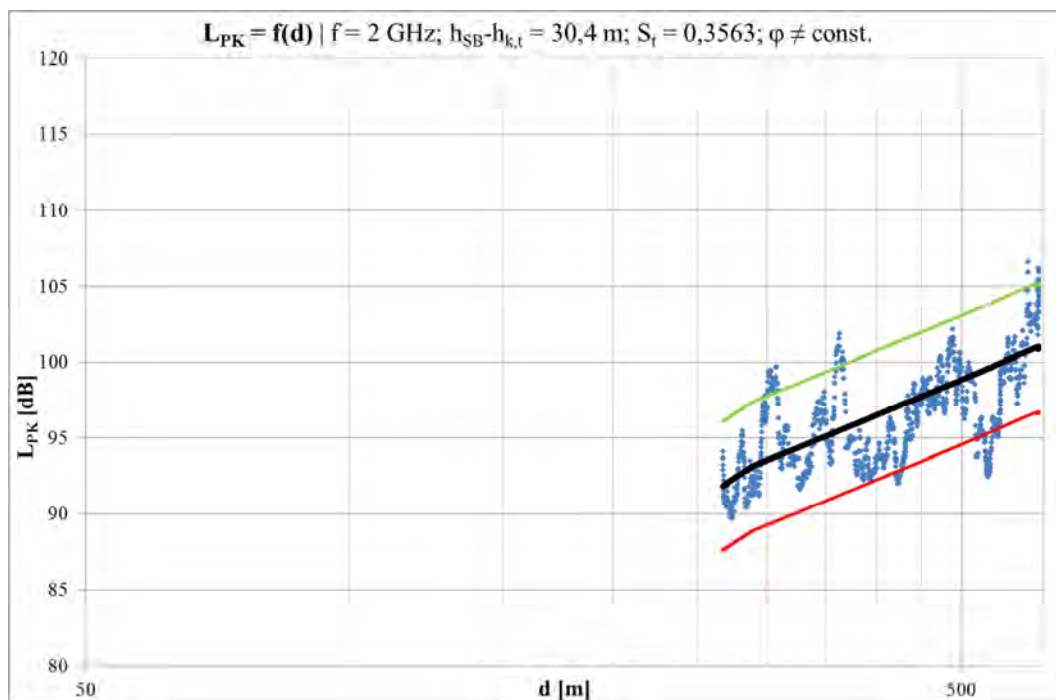


Rys. 5.36. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru pozakontenerowego –  $f=2\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=12\text{m}$  ( $L_{p,PK}$  – niebieski,  $L_{PK}$  – czarny,  $L_{PK}+SEE$  – zielony,  $L_{PK}-SEE$  – czerwony)

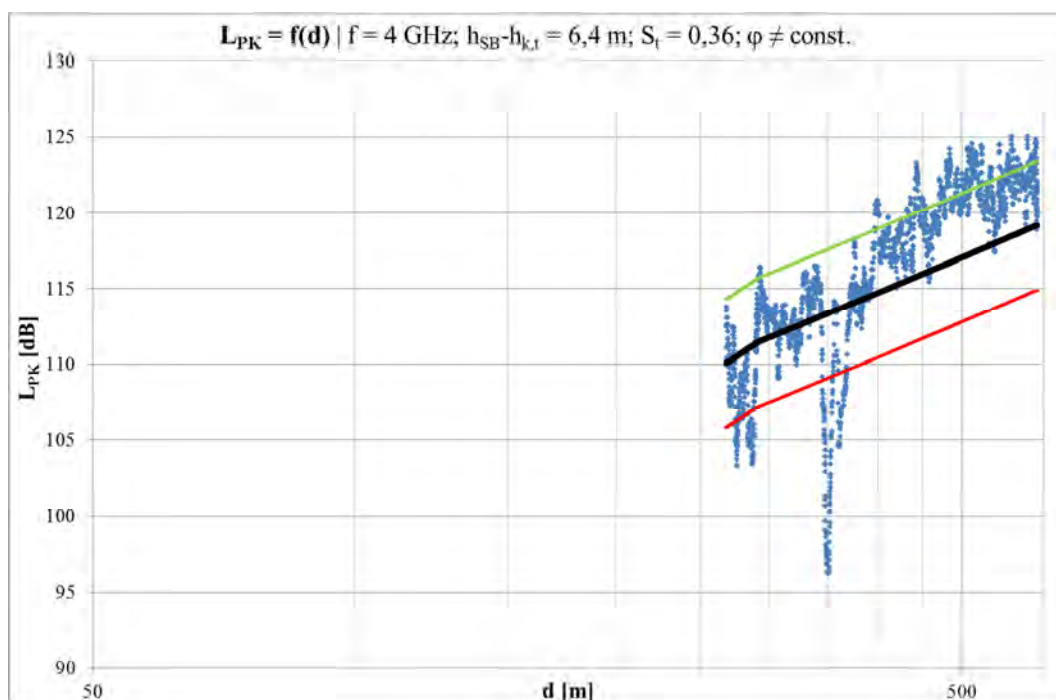


Rys. 5.37. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru pozakontenerowego –  $f=2\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=24\text{m}$  ( $L_{p,PK}$  – niebieski,  $L_{PK}$  – czarny,  $L_{PK}+SEE$  – zielony,  $L_{PK}-SEE$  – czerwony)



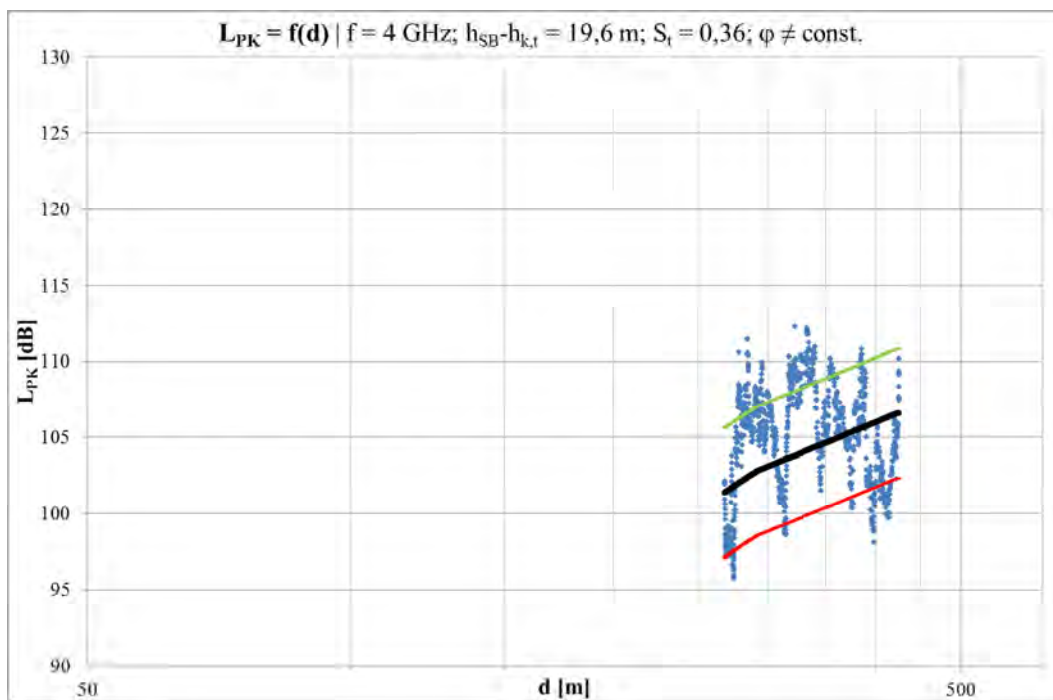


Rys. 5.38. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru pozakontenerowego –  $f=2\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=36\text{m}$  ( $L_{p,PK}$  – niebieski,  $L_{PK}$  – czarny,  $L_{PK+SEE}$  – zielony,  $L_{PK-SEE}$  – czerwony)

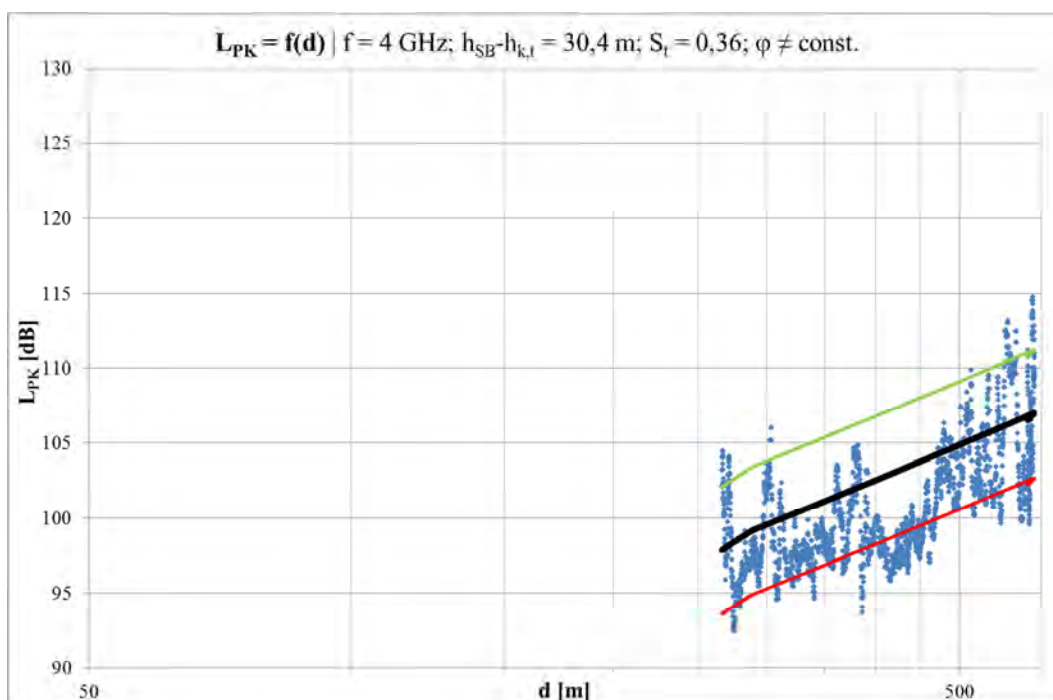


Rys. 5.39. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru pozakontenerowego –  $f=4\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=12\text{m}$  ( $L_{p,PK}$  – niebieski,  $L_{PK}$  – czarny,  $L_{PK+SEE}$  – zielony,  $L_{PK-SEE}$  – czerwony)





Rys. 5.40. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru pozakontenerowego –  $f=4\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=24\text{m}$  ( $L_{p,pPK}$  – niebieski,  $L_{pPK}$  – czarny,  $L_{pPK}+SEE$  – zielony,  $L_{pPK}-SEE$  – czerwony)



Rys. 5.41. Przykładowy wykres tłumienia propagacyjnego dla obszaru pozakontenerowego –  $f=4\text{GHz}$ ,  $h_{SB}=36\text{m}$  ( $L_{p,pPK}$  – niebieski,  $L_{pPK}$  – czarny,  $L_{pPK}+SEE$  – zielony,  $L_{pPK}-SEE$  – czerwony)

Model dla obszaru pozakontenerowego bardzo dobrze przewiduje zmiany tłumienia fali radiowej wraz ze wzrostem długości trasy propagacji, co jest szczególnie dobrze widoczne na przykładowych wykresach dla częstotliwości 1 GHz i  $h_{SB}=12$  m (rys. 5.33) oraz 2 GHz i  $h_{SB}=36$  m (rys. 5.38). W analizowanym obszarze mają też miejsce sytuacje szczególne, jak np. dla częstotliwości 500 MHz i  $h_{SB}=36$  m (rys. 5.32), dla długości  $d$  od około 400 m do około 500 m, która to sytuacja została opisana w przypadku poprzedniego obszaru, dla której układ kontenerów na wybranych polach składowych powoduje, że zachodzi wzajemna widoczność obu anten łącza radiowego. Jest to sytuacja całkowicie przypadkowa, mająca znikomy wpływ na dokładność szacowania tłumienia propagacyjnego, które dla opisywanego przypadku maleje nawet o 10 dB. Niezwykle ciekawy jest przypadek dla częstotliwości 4 GHz i  $h_{SB}=12$  m (rys. 5.39), dla długości trasy propagacyjnej 350 m, kiedy to występuje gwałtowny spadek tłumienia propagacyjnego o około 17 dB. Może to być wynikiem sytuacji w której anteny stacji bazowej i stacji ruchomej znajdują się w jednej linii wzdłuż prostopadłego ciągu komunikacyjnego. Może to także mieć związek z bardzo rzadką sytuacją, kiedy stacja ruchoma znajduje się między kontenerami ustawionymi w ostatnim rzędzie pól składowych a ciągnikiem kontenerowym oczekującym załadunku lub rozładunku kontenera lub samojezdną suwnicą placową. W takiej sytuacji do stacji ruchomej dociera dodatkowo fala odbita od tego ciągnika lub suwnicy, co w sprzyjających warunkach może zwiększać poziom odbieranej mocy sygnału. Podobne zjawisko zachodzi w przypadku dla częstotliwości 2 GHz i wysokości zawieszenia anteny stacji bazowej wynoszącej 12 m, gdzie również dla odległości  $d$  równej 350 m występuje spadek tłumienia o ok. 17 dB. Należy jeszcze raz podkreślić, że są to sytuacje specyficzne, bez większego wpływu na dokładność szacowania strat propagacyjnych w badanym środowisku.

#### **5.3.4. Analiza modelu RTK dla wszystkich obszarów**

Po przeanalizowaniu wariantów modelu RTK dla poszczególnych obszarów, w tab. 5.12 zestawiono wyniki tych analiz i porównano je z wynikami analizy modelu RTK jako całości. Jak można zauważyć model RTK charakteryzuje się standardowym błędem estymacji na poziomie 4,7 dB. Ponadto zaproponowany model wyjaśnia 79,5% zmienności tłumienia propagacyjnego w badanym środowisku poprzez zmienność parametrów modelu, o czym informuje wartość współczynnika determinacji. Natomiast zmienność tłumienia, mająca źródło w działaniu innych przyczyn, nieuwzględnionych w modelu wynosi zaledwie 20,5%.

Tab. 5.12. Zestawienie wyników analizy statystycznej modelu RTK

	<b>Obszar LOS</b>	<b>Obszar kontenerowy</b>	<b>Obszar pozakontenerowy</b>	<b>Wszystkie obszary</b>
$N$	54283	196239	29195	279717
$\phi^2$	0,235	0,219	0,164	0,205
$R^2$	0,765	0,781	0,836	0,795
$R^2_{popr}$	0,765	0,781	0,836	0,795
$ME [dB]$	0,0	0,0	0,0	0,0
$SEE [dB]$	4,6	4,8	4,3	4,7

W tab. 5.13 zestawiono wyniki obliczeń błędów średnich i standardowych błędów estymacji dla poszczególnych podobszarów z podziałem na różne częstotliwości. Wyniki te dla omówione zostały szczegółowo w poprzednich podrozdziałach.

Tab. 5.13. Zestawienie błędów ME i SEE dla modelu RTK dla różnych częstotliwości sygnału radiowego

	<b>Obszar LOS</b>			<b>Obszar kontenerowy</b>			<b>Obszar pozakontenerowy</b>		
	<b>ME [dB]</b>	<b>SEE [dB]</b>	<b>N</b>	<b>ME [dB]</b>	<b>SEE [dB]</b>	<b>N</b>	<b>ME [dB]</b>	<b>SEE [dB]</b>	<b>N</b>
<b>0,5 GHz</b>	-0,4	4,2	5138	-1,1	4,6	23005	-2,9	4,6	3082
<b>1 GHz</b>	1,3	3,8	9367	1,0	5,0	41510	1,5	5,2	6218
<b>2 GHz</b>	0,3	5,1	14466	0,2	5,0	47394	-0,1	4,0	8763
<b>4 GHz</b>	-0,6	4,6	25312	-0,1	4,7	84330	0,1	3,7	11132

Wartości standardowych błędów estymacji dla każdego z obszarów oraz dla każdej częstotliwości są akceptowalne, a największa jego wartość wynosi 5,2 dB i ma miejsce dla częstotliwości 1 GHz dla obszaru pozakontenerowego. Największa wartość błędu średniego wystąpiła w tym samym obszarze dla częstotliwości 500 MHz, jednakże jest to wartość ujemna i świadczy o przeszacowaniu wartości tłumienia. Jak wiadomo sytuacja taka z punktu widzenia projektanta systemu jest mniej kłopotliwa niż sytuacja, w której tłumienie jest niedoszacowane. Pozostałe wartości błędów są mniejsze, co jest kolejnym argumentem potwierdzającym fakt, że model RTK pozwala szacować straty propagacyjne z zadowalającą dokładnością.

Dotychczas prezentowane rezultaty analizy statystycznej modelu (tab. 5.12) uzyskane zostały na bazie próby tłumienia propagacyjnego o liczebności 279717, która stanowiła jednocześnie podstawę do wyznaczenia współczynników modelu. W związku z powyższym wykonano weryfikację modelu poprzez wykonanie jego analizy statystycznej dla innej próby danych empirycznych (o liczebności 39808) zebranych w tym samym terminalu kontenerowym. Wyniki tej weryfikacji zestawiono w tab. 5.14.

Tab. 5.14. Zestawienie wyników weryfikacji modelu RTK

	<b>Obszar LOS</b>	<b>Obszar kontenerowy</b>	<b>Obszar pozakontenerowy</b>	<b>Wszystkie obszary</b>
$N$	8201	23295	8312	39808
$\varphi^2$	0,187	0,201	0,228	0,184
$R^2$	0,813	0,799	0,772	0,816
$R^2_{popr}$	0,813	0,799	0,772	0,816
$ME[dB]$	0,9	1,0	-0,3	0,7
$SEE[dB]$	4,4	4,5	4,3	4,5

Zarówno dla poszczególnych obszarów, jak i dla całego modelu RTK błąd średni nie przekracza 1 dB, natomiast standardowy błąd estymacji jest nie większy niż 4,5 dB. Ponadto współczynnik determinacji zmienia się w zakresie od 0,772 do 0,813 dla wydzielonych obszarów i wynosi 0,816 dla całego modelu. Współczynnik indeterminacji dla obszarów jest nie większy niż 0,228 i nie mniejszy niż 0,187, natomiast dla całości modelu wynosi on 0,184. Powyższe potwierdza dokładność szacowania tłumienia propagacyjnego przez model oraz fakt, że zmienne modelu w bardzo wysokim stopniu wyjaśniają zmienność tłumienia w badanym środowisku.

#### **5.4. Analiza porównawcza modelu RTK z wybranymi modelami i ocena jego przydatności – wykazanie tezy**

Niniejszy podrozdział podsumowuje dotychczasowe wyniki badań i analiz poprzez porównanie dokładności szacowania tłumienia propagacyjnego w badanym środowisku przy pomocy wybranych istniejących modeli oraz ich modyfikacji dopasowanych do danych empirycznych z dokładnością szacowania przy użyciu nowego modelu, przeznaczonego do estymowania wartości tłumienia w ruchomych systemach radiowych, pracujących na terenie terminalu kontenerowego. Zestawienie wartości błędu średniego i standardowego błędu estymacji przedstawione zostało w tab. 5.15.

Tab. 5.15. Zestawienie błędów ME i SEE dla modelu RTK oraz dla wybranych modeli przed i po dopasowaniu

<b>Model</b>	<b>Wariant modelu</b>	<b>ME [dB]</b>	<b>SEE [dB]</b>
<b>Model RTK</b>	Obszar LOS	0,0	<b>4,6</b>
	Ob. kontenerowy	0,0	<b>4,8</b>
	Ob. pozakontenerowy	0,0	<b>4,3</b>
	Wszystkie obszary	0,0	<b>4,7</b>
<b>Model dla systemów dostępowych w TK (oryginalny)</b>	LOS1	3,8	8,3
	NLOS1	3,0	7,6
<b>Model dla systemów dostępowych w TK (dopasowany)</b>	LOS1	0,0	5,3
	NLOS1	0,0	5,3
<b>COST 231 Walfisch-Ikegami (oryginalny)</b>	Tereny podmiejskie	-5,3	10,6
	Centra dużych miast	-10,1	16,0
<b>COST 231 Walfisch-Ikegami (dopasowany)</b>	Tereny podmiejskie	0,0	5,2
	Centra dużych miast	0,0	5,7
<b>ITU-R P.1411 NLOS1 (śr. miejskie) (oryginalny)</b>	Średnie miasta	-8,4	13,4
	Centra dużych miast	-8,8	13,9
<b>ITU-R P.1411 NLOS1 (śr. miejskie) (dopasowany)</b>	Średnie miasta	0,0	7,6
	Centra dużych miast	0,0	7,8
<b>ITU-R P.1411 NLOS1 (śr. podmiejskie) (oryginalny)</b>	Tereny podmiejskie	-4,5	10,0
<b>ITU-R P.1411 NLOS1 (śr. podmiejskie) (dopasowany)</b>	Tereny podmiejskie	0,0	5,0

W przypadku oryginalnego modelu dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym uzyskany błąd średni wynosi 3,8 dB i 3 dB odpowiednio dla wariantu LOS1 i NLOS1. Błąd SEE dla tych wariantów jest na poziomie 8,3 dB i 7,6 dB.

Dopasowanie tego modelu pozwoliło na redukcję błędów *SEE* które dla obu wariantów osiągnęły 5,3 dB.

Zastosowanie oryginalnego modelu COST 231 Walfischa-Ikegamiego w wariancie dla terenów podmiejskich nie daje satysfakcjonującej dokładności estymowania tłumienia sygnału radiowego w terminalu kontenerowym, mimo że model ten jak dotychczas był stosowany do tego celu [86]. Wartość błędu średniego dla tego wariantu wynosi -5,3 dB, natomiast standardowy błąd estymacji osiąga wartość 10,6 dB. Po modyfikacji model ten daje lepsze rezultaty, a błąd *SEE* osiąga 5,2 dB. W przypadku wariantu dla centrów dużych miast dokładność oryginalnego modelu jest jeszcze mniejsza, błąd średni wynosi -10,1 dB, a błąd standardowy aż 16 dB. Po dopasowaniu tej wersji modelu błąd *SEE* zostaje zredukowany do 5,7 dB.

Oryginalny model z zalecenia ITU-R P.1411 także nie zapewnia satysfakcjonującej dokładności szacowania tłumienia propagacyjnego w badanym środowisku. Dla wariantu dla średnich miast błąd średni wnosi -8,4 dB, natomiast błąd standardowy osiąga 13,4 dB. Dla wariantu dla centrów dużych miast błędy te są porównywalne i wynoszą odpowiednio -8,8 dB i 13,9 dB. Po dopasowaniu modelu wartości błędów *SEE* są redukowane do 7,6 dB i 7,8 dB dla kolejnych jego wariantów. Mimo, że wartości te są mniejsze niż 8 dB, to pozostają największe spośród wszystkich modeli dopasowanych.

W przypadku oryginalnego modelu dla środowisk podmiejskich, opisanego w zaleceniu ITU-R P.1411, błąd średni wynosi -4,5 dB, a błąd standardowy aż 10 dB. Jednak po jego dopasowaniu do warunków panujących w terminalu kontenerowym, standardowy błąd estymacji redukuje się do 5 dB, co pozwalają stwierdzić, że ten model zapewnia największą dokładność spośród wybranych modeli, które zostały dopasowane do danych empirycznych.

Jednakże żaden z przeanalizowanych modeli nie uwzględnia charakterystyki środowiska terminalu kontenerowego oraz zróżnicowania warunków propagacji fal radiowych w różnych jego obszarach. Powyższe aspekty zostały wzięte pod uwagę w modelu RTK, dla którego błąd średni – uzyskany na podstawie danych wykorzystanych do wyznaczenia współczynników modelu – wynosi 0 dB, a standardowy błąd estymacji jest na poziomie 4,7 dB. Natomiast weryfikacja modelu RTK wykazała wartości powyższych błędów odpowiednio 0,7 dB i 4,5 dB. Są to najmniejsze wartości błędów spośród wszystkich analizowanych w rozprawie modeli. Dodatkowo, podczas szacowania tłumienia

w różnych obszarach terminalu kontenerowego osiągnięto różne wartości błędów *SEE*. Dla obszaru LOS błąd ten wynosi 4,6 dB, a dla obszaru kontenerowego 4,8 dB. Natomiast dla obszaru pozakontenerowego błąd ten jest najmniejszy i wynosi 4,3 dB, co nabiera szczególnego znaczenia, jeśli wziąć pod uwagę fakt, że z punktu widzenia projektanta ruchomej sieci bezprzewodowej na terenie terminalu, obszar ten jest najistotniejszy dla zapewnienia pełnego pokrycia radiowego. Dodatkowo dla obszaru pozakontenerowego uzyskano najwyższy współczynnik determinacji, wynoszący 0,836 (patrz tab. 5.12). Dla całego modelu RTK współczynnik ten także jest bardzo duży i osiąga wartość 0,795.

W świetle powyższego należy stwierdzić, że główna teza niniejszej rozprawy, utrzymująca że opracowanie nowego empirycznego modelu propagacyjnego umożliwi ze znacznie większą niż dotychczas dokładnością analizować tłumienie sygnału radiowego w ruchomych systemach radiokomunikacyjnych pracujących w środowisku uprzemysłowionym, zwłaszcza na terenach terminali kontenerowych, została dowiedziona.





## *Podsumowanie*

Modelowanie tłumienia propagacyjnego w ruchomych systemach łączności bezprzewodowej pracujących na otwartych terenach uprzemysłowionych jest zagadnieniem niezwykle złożonym i skomplikowanym. Terminal kontenerowy jest bardzo dobrym przykładem takiego środowiska ze względu na obecność dużej liczby metalowych przeszkód terenowych, w większości kontenerów układanych w stosy o zmiennej w czasie geometrii, ale także ciągników kontenerowych, suwnic nabrzeżowych i samobieżnych suwnic placowych, które podczas normalnej pracy terminalu znajdują się w ciągłym ruchu.

Jak dotąd brak jest modeli propagacyjnych przeznaczonych do estymowania wartości tłumienia w ruchomych systemach radiokomunikacyjnych pracujących w badanym środowisku. W rozprawie przeanalizowano pod kątem przydatności do opisywanych zastosowań cztery wybrane modele:

- model dla systemów dostępowych pracujących w terminalu kontenerowym, nieuwzględniający parametrów charakterystycznych środowiska oraz zmienności warunków propagacyjnych w różnych jego obszarach,
- model COST 231 Walfischa-Ikegamiego, który ze względu na podobieństwo regularnego układu architektonicznego miast i terminalu kontenerowego jest jak dotychczas stosowany w procesie projektowania sieci bezprzewodowych w analizowanym środowisku,
- model dla środowisk miejskich, opisany w zaleceniu ITU-R P.1411, stanowiący rozszerzenie modelu Walfischa-Ikegamiego, oraz
- model z zalecenia ITU-R P.1411, przeznaczony dla środowisk podmiejskich, w którym to modelu zastosowano podział środowiska na trzy obszary, w których różne zjawiska mają dominujący wpływ na wartość tłumienia propagacyjnego.

Przeprowadzona w rozprawie analiza, oparta na blisko 290 tysiącach wyników przeprowadzonych badań pomiarowych w rzeczywistym środowisku wykazała, że powyższe modele nie zapewniają dostatecznej dokładności szacowania strat, jakim ulega sygnał w ruchomym łączu radiowym.

W takim stanie rzeczy wybrane modele zostały dopasowane statystycznie do uzyskanych podczas pomiarów danych empirycznych, co pozwoliło na zwiększenie dokładności estymowania tłumienia propagacyjnego w badanym środowisku i tym samym na dowiedzenie pomocniczej tezy rozprawy. Spośród dopasowanych modeli, ten który pozwala na obliczanie tłumienia z największą dokładnością, to zmodyfikowany model z zalecenia ITU-R P.1411 dla środowisk podmiejskich. Poza standardowym błędem estymacji na poziomie 5 dB, charakteryzuje się on dużym współczynnikiem determinacji, wynoszącym 0,785, co świadczy o tym, że zmienność tłumienia propagacyjnego jest wyjaśniana przez model w 78,5%.

Głównym celem rozprawy było opracowanie nowego modelu propagacyjnego przeznaczonego dla ruchomych systemów łączności bezprzewodowej pracujących w środowisku uprzemysłowionym, którego przykładem jest terminal kontenerowy. Opracowany model RTK jest modelem empirycznym, który powstał na podstawie próby rzeczywistych wartości tłumienia propagacyjnego o bardzo dużej liczebności. Na wstępie podzielono obszar badanego terminalu kontenerowego na trzy obszary: LOS, kontenerowy i pozakontenerowy, w których warunki rozchodzenia się fal elektromagnetycznych różnią się w sposób istotny, co zostało dowiedzione przy pomocy odpowiedniego testu statystycznego. Następnie dla każdego obszaru zaproponowano funkcję do obliczania wartości tłumienia, przy czym współczynniki tych funkcji wyznaczono na drodze wielowymiarowej regresji liniowej przy użyciu metody najmniejszych kwadratów. Czynniki, które mają wpływ na wartość tłumienia sygnału radiowego w środowisku terminalu kontenerowego i od których to tłumienie zostało uzależnione w modelu, są następujące:

- częstotliwość fali radiowej,
- długość trasy propagacji fali radiowej,
- wysokość zawieszenia anteny stacji bazowej na poziomie powierzchni terminalu kontenerowego,
- kąt nadejścia fali radiowej do anteny stacji ruchomej,
- powierzchniowy współczynnik zajętości terminalu,
- średnia wysokość stosu kontenerów na obszarze całego terminalu,
- średnia wysokość stosu kontenerów na drodze propagacji sygnału radiowego,
- średnia wysokość stosu kontenerów w pierwszym rzędzie pól składowych,

- średnia wysokość stosu kontenerów w rzędzie pól składowych znajdującym się za stacją ruchomą.

Model RTK można stosować dla częstotliwości sygnału radiowego z zakresu od 500 MHz do 4 GHz, dla tras propagacyjnych o długościach od 50 do 620 m oraz dla wysokości zawieszenia anteny stacji bazowej z zakresu od 12 do 36 m i wysokości zawieszenia anteny stacji ruchomej wynoszącej 2 m. Nowy model został opracowany przy założeniu, że antena stacji bazowej jest zawieszona powyżej średniej wysokości stosu kontenerów w pierwszym rzędzie pól składowych, w rzędzie kolejnym za stacją ruchomą oraz na trasie propagacji sygnału radiowego i całym obszarze terminalu. Ponadto model zakłada, że kąt nadejścia fali radiowej jest większy od zera i nie większy niż  $90^\circ$ , natomiast powierzchniowy współczynnik zajętości terminalu z przyczyn oczywistych nie może przekraczać wartości 1 i także musi być różny od zera.

Analiza statystyczna modelu RTK oparta na danych wykorzystanych do wyznaczenia jego współczynników wykazała, że przy jego pomocy można szacować tłumienie propagacyjne w badanym środowisku ze standardowym błędem estymacji na poziomie 4,7 dB, a zmienność tego tłumienia jest wyjaśniana przez zmienność parametrów modelu w 79,5% o czym świadczy współczynnik determinacji wynoszący 0,795. Niewyjaśniona przez model część zmienności tłumienia, która ma swoje źródło w działaniu innych przyczyn, to zaledwie 20,5%, czego dowodzi wartość współczynnika indeterminacji wynosząca 0,205.

Analiza porównawcza modelu RTK z innymi modelami, a także z modelami dopasowanymi wykazała, że nowy model zapewnia największą dokładność szacowania tłumienia propagacyjnego w ruchomych systemach radiowych, pracujących w środowisku terminalu kontenerowego, co ostatecznie dowodzi postawionej w rozprawie tezy.

Do głównych, oryginalnych osiągnięć rozprawy należą:

- wykonanie nowatorskich badań tłumienia sygnału radiowego na terenie Głębokowodnego Terminalu Kontenerowego DCT Gdańsk i zebranie obszernego materiału pomiarowego, liczącego blisko 290 tysięcy przypadków propagacyjnych,
- przeprowadzenie statystycznych badań przydatności wybranych znanych modeli propagacyjnych do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w takich warunkach oraz ich modyfikacja do tego celu,

- przeprowadzenie analizy uwarunkowań propagacyjnych występujących w środowisku uprzemysłowionym, na terenie terminalu kontenerowego i na tej podstawie wyznaczenie głównych czynników mających wpływ na rozchodzenie się fali radiowej w takich warunkach,
- wykazanie istotnego zróżnicowania warunków propagacyjnych w trzech wyróżnionych obszarach terminalu kontenerowego, tj. w obszarze LOS, obszarze kontenerowym i obszarze pozakontenerowym,
- opracowanie z wykorzystaniem wielowymiarowej analizy regresji nowego modelu propagacyjnego (modelu RTK) przeznaczonego do analizowania tłumienia fali radiowej w ruchomych systemach łączności bezprzewodowej w warunkach terminalu kontenerowego,
- wykonanie analiz porównawczych modelu RTK i modeli zmodyfikowanych pod względem przydatności do projektowania ruchomych systemów radiokomunikacyjnych przeznaczonych do pracy w warunkach terminalu kontenerowego,
- zaprojektowanie i realizacja układowa zautomatyzowanego stanowiska pomiarowego do badań uwarunkowań propagacyjnych, z uwzględnieniem wymagań normatywnych zalecanych przez ITU-R.

## *Literatura*

- [1] Akhoondzadeh-Asl L. i Noori N.: *Modificaton and Tuning of the Universal Okumura-Hata Model for Radio Wave Propagation Predictions*, Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Bangkok, Tajlandia, 2007
- [2] Ambawade D., Karia D., Potdar T., Lande B., Daruwala R. i Shah A.: *Statistical Tuning of Walfisch-Ikegami Model in Urban and Suburban Environments*, Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation (AMS), Kota Kinabalu, Malezja, 2010
- [3] **Ambroziak S. J.** i Katulski R. J.: *Analiza przydatności wybranych modeli propagacyjnych do projektowania ruchomych systemów radiowych w środowisku terminalu kontenerowego*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 6/2011, s. 584-587
- [4] **Ambroziak S. J.** i Katulski R. J.: *Experimental verification of selected propagation models in terms of designing mobile radio networks in container terminal environment*, 12th URSI Commission-F Triennial Open Symposium on Radio Wave Propagation and Remote Sensing, Garmisch-Partenkirchen, Niemcy, 2011
- [5] **Ambroziak S. J.** i Katulski R. J.: *On the usefulness of selected radio waves propagation models for designing mobile wireless systems in container terminal environment*, XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science (URSI GASS), Sztambuł, Turcja, 2011
- [6] **Ambroziak S. J.** i Katulski R. J.: *Statistical Adjustment of Selected Propagation Models for Applications in Container Terminal*, The 6th European conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Praga, Czechy, 2012
- [7] **Ambroziak S. J.** i Sadowski J.: *Automatyzacja badań propagacyjno-zasięgowych*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, nr 185A, 2011, s.19-30
- [8] **Ambroziak S. J.** i Sadowski J.: *Mobilne stanowisko do badań propagacyjno-zasięgowych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 2-3/2011, s. 58-62
- [9] **Ambroziak S. J.**, Katulski R. J., Sadowski J. i Stefański J.: *Propagation Path Loss Modelling in Container Terminal Environment*, W: *Vehicular Technologies: Increasing Connectivity*, InTech, Rijeka, Chorwacja, 2011, s. 415-432

- [10] **Ambroziak S. J.:** *Empirical Adjustment of the Selected Propagation Models for Application in the Peculiar Environment of the Container Terminal*, The 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting, Chicago, USA, 2012
- [11] **Ambroziak S. J.:** *Path Loss Modelling in Container Terminal Environment*, Wykład wygłoszony w Instituto de Telecomunicacoes w Lizbonie (Technical University of Lisbon) na zaproszenie profesora Luisa M. Correia, Portugalia, 2012
- [12] **Ambroziak S. J.:** *Pomiarowe badania propagacyjno-zasięgowe – charakterystyka wymagań normatywnych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 2-3/2010, s. 84-89
- [13] Balicki A. i Makać W.: *Metody wnioskowania statystycznego*, Gdańsk: Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego 2004
- [14] Barclay L.: *Propagation of Radiowaves - 2nd Edition*, The Institution of Engineering and Technology 2003
- [15] Baumgarten J., Chee K. L., Hecker A. i Kürner T.: *Performance of Prediction Models in Suburban/Rural Residential Areas at 860, 2300 and 3500 MHz*, 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Praga, 2012
- [16] Bem D. J.: *Anteny i rozchodzenie się fal radiowych*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1973
- [17] Bem D. J.: *Nawigacja satelitarna*, Wrocław: Sorc 2001
- [18] Bendat J. S. i Piersol A. G.: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1976
- [19] Bensky A.: *Short-range Wireless Communication; Fundamentals of RF System Design and Application*, Newnes 2004
- [20] Białas S., Ćmiel A. i Fitzke A.: *Matematyka dla studiów inżynierskich*, Kraków: Wydawnictwa AGH 2000
- [21] Bieda B., Brodiuk A. i Zieliński R.: *Propagacja fali elektromagnetycznej w środowisku wyrobiska kopalnianego*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 4, 2008, s. 505-508
- [22] Chang K.: *RF and Microwave Wireless Systems*, Wiley 2000
- [23] Chrysikos T. i Kotsopoulos S.: *Characterization of Propagation Mechanisms for the 2.4 GHz Channel at Athens International Airport*, 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Praga, 2012

- [24] Coll J. F., de Ojeda D. M., Stenumgaard P., Romeu S. M. i Chilio J.: *Industrial indoor environment characterization - Propagation models*, Proc. of the 10th Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2011), York, 2011
- [25] Correia L. M. i Frances P. O.: *A Propagation Model for the Estimation of the Average Received Power in an Outdoor Environment in the Millimetre Waveband*, IEEE 44th Vehicular Technology Conference, Sztokholm, 1994
- [26] Correia L. M.: *A View of the COST 231-Bertoni-Ikegami Model*, 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Berlin, 2009
- [27] Correia L. M.: *Addressing Challenges in Propagation and Channels in the Networks of the Future*, Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Rzym, 2011
- [28] Cramér H.: *Metody matematyczne w statystyce*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1958
- [29] DeCoursey W. J.: *Statistics and Probability for Engineering Applications*, Newnes 2003
- [30] *Digital cellular telecommunications system; Radio network planning aspects; (GSM 03.30 version 5.0.0)*, European Telecommunications Standards Institute, Sophia-Antipolis, Francja, 1996
- [31] *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems*, COST 231 Final Report, COST Telecom Secretariat, Bruksela, 1999
- [32] Dobosz M.: *Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań - wydanie drugie uaktualnione*, EXIT 2004
- [33] Dołuchanow M. P.: *Propagacja fal radiowych*, Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1975
- [34] Dudziewicz J.: *Pomiary teletransmisyjne*, Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1984
- [35] Ferguson G. A. i Takane Y.: *Analiza statystyczna w psychologii i pedagogice*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe 2009
- [36] Górecki T.: *Podstawy statystyki z przykładami w R*, Legionowo: Wydawnictwo BTC 2011
- [37] Greenberg E. i Greenberg S.: *Simulations and measurements of the radio channel propagation parameters in urban and industrial environments for emergency localization*, IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS), Tel Aviv, Izrael, 2011

- [38] Hecker A. i Kürner T.: *Analysis of Propagation Models for UMTS Ultra High Sites in Urban Areas*, IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Berlin, 2005
- [39] *High Performance 9 kHz to 7.1 GHz Handheld Spectrum Analyzer, MS2721B Spectrum Master*, Technical Data Sheet, Anritsu
- [40] Huand Y. i Boyle K.: *Antennas: from Theory to Practice*, Wiley 2008
- [41] Ikegami F., Yoshida S., Takeuchi T. i Umehira M.: *Propagation Factors Controlling Mean Field Strength on Urban Streets*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, tom 32, nr 8, 1984, s. 822-829
- [42] ITU-R P.1406-1, *Propagation effects relating to terrestrial land mobile and broadcasting services in the VHF and UHF bands*, 2007
- [43] ITU-R P.1407-3, *Multipath propagation and parametrization of its characteristic*, 2007
- [44] ITU-R P.1411-4, *Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz*, 2007
- [45] ITU-R P.341-5, *The Concept of Transmission Loss for Radio Links*, 1999
- [46] ITU-R P.525-2, *Calculation of Free-Space Attenuation*, 1994
- [47] ITU-R P.676-7, *Attenuation by atmospheric gases*, 2007
- [48] ITU-R P.840-3, *Attenuation Due to Clouds and Fog*, 1999
- [49] ITU-R SM.1708, *Field-Strength Measurements Along a Route with Geographical Coordinate*, 2005
- [50] ITU-R SM.378-7, *Field-Strength Measurements at Monitoring Stations*, 2007
- [51] ITU-R V.431-7, *Nomenclature of the Frequency and Wavelength Bands Used in Telecommunications*, 2000
- [52] ITU-R V.573-5, *Radiocommunication vocabulary*, 2007
- [53] ITU-R V.574-4, *Use of the Decibel and the Neper in Telecommunications*, 2000
- [54] Januszkiewicz Ł., Hausman S. i Kacprzak T.: *Systemy łączności bezprzewodowej do ochrony osób pracujących w warunkach niebezpiecznych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 8-9/2011, s. 723-728
- [55] Józwiak J. i Podgórski J.: *Statystyka od podstaw*, Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne 2009



- [56] Jurdziński M.: *Podstawy nawigacji morskiej*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni 2003
- [57] Kattenbach R.: *Statistical and empirical modelling, W: Wireless Flexible Personalised Communications*, Red. L. M. Correia, Wiley 2001, s. 79-111
- [58] Katulski R. J. i Kiedrowski A.: *Analiza przydatności wybranych modeli propagacyjnych do projektowania radiowych systemów dostępowych*, Gdańsk: Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej, tom 6, nr 3, 2005, s. 285-294
- [59] Katulski R. J. i Kiedrowski A.: *Calculation of the Propagation Loss in Urban Radio-Access Systems*, IEEE Antennas and Propagation Magazine, tom 50, nr 6, 2008, s. 65-70
- [60] Katulski R. J. i Kiedrowski A.: *Empirical Formulas for Determination of the Propagation Loss in the Urban Radio Access Links*, IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Dallas, 2005
- [61] Katulski R. J. i Kiedrowski A.: *Zmodyfikowany model COST231 Haty do projektowania systemów dostępowych*, Gdańsk: Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej, tom 4, nr 2, 2004, s. 355-362
- [62] Katulski R. J., **Ambroziak S. J.** i inni: *Opracowanie systemu monitorowania ładunków kontenerowych w morskim porcie handlowym*, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, raport badawczy 5/2009
- [63] Katulski R. J., **Ambroziak S. J.**, Miszewska B., Sadowski J. i Stefański J.: *Self-Organizing Wireless Monitoring System for Cargo Containers*, Polish Maritime Research, tom 16, nr 3(61), 2009, s. 45-50
- [64] Katulski R. J., **Ambroziak S. J.**, Stefański J. i J. Sadowski J.: *Sposób ciągłej lokalizacji kontenerów i ciągłego monitorowania parametrów stanu wnętrza kontenerów*, Zgłoszenie patentowe nr P.390071 z 29.12.2009
- [65] Katulski R. J., Namieśnik J., Stefański J., Sadowski J., Wardencki W. i **Ambroziak S. J.**: *Wireless Systems of Threats Monitoring*, IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security - HST, Boston, USA, 2010
- [66] Katulski R. J., Sadowski J. i Stefański J.: *Modelowanie tłumienia propagacyjnego w porcie kontenerowym*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 4/2008, s. 601-604
- [67] Katulski R. J., Sadowski J. i Stefański J.: *Propagation Path Loss Modeling in Container Terminal Environment*, IEEE 68th Vehicular Technology Conference, Calgary, Kanada, 2008

- [68] Katulski R. J., Stefański J., Sadowski J., **Ambroziak S. J.** i Miszewska B.: *Self-Organizing Wireless Nodes Monitoring Network*, Polish Journal of Environmental Studies, tom 18, nr 4B, 2009, s. 84-88
- [69] Katulski R. J.: *Analiza i badania anten do satelitarnej telekomunikacji morskiej*, Rozprawa habilitacyjna, Warszawa: WAT, 1998
- [70] Katulski R. J.: *Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej*, Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 2009
- [71] Kiedrowski A.: *Analiza regresji wielowymiarowej - algorytmiczny opis wyznaczenia współczynników regresji dla potrzeb badań propagacji fal radiowych*, Raport naukowo-badawczy Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2004
- [72] Kiedrowski A.: *Specyfika propagacji fal radiowych w systemie dostępowym w warunkach miejskich*, Rozprawa doktorska, Instytut Łączności, promotor dr hab. inż. Ryszard Katulski, Warszawa 2004
- [73] Kjesbu S. i Brunsvik T.: *Radiowave propagation in industrial environments*, 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Nagoya, 2000
- [74] Kornacki J. i Mielniczuk J.: *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2001
- [75] Krzysztofiak M. i Urbanek D.: *Metody statystyczne*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1979
- [76] Kürner T. i Neuland M.: *Application of Bertoni's Work to Propagation Models used for the Planning of real 2G and 3G Cellular Networks*, 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Berlin, 2009
- [77] *Le Système international d'unités (SI)*, Bureau international des poids et mesures, STEDI Media, Paris, 2006
- [78] Lee W. C. Y.: *Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal*, IEEE Transactions of Vehicular Technology, tom 34, nr 1, 1985, s. 22-27
- [79] Lee W. C. Y.: *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, McGraw-Hill 1989
- [80] Lee W. C. Y.: *Mobile Communications Design Fundamentals - Second Edition*, Wiley 1993
- [81] Levis C. A., Johnson J. T. i Teixeira F. L.: *Radiowave Propagation*, Wiley 2010
- [82] Löw K.: *Comparison of urban propagation models with CW-measurements*, Proceedings of Vehicular Technologies Conference - VTC'92, Denver, USA, 1992

- [83] Luszniwicz A.: *Statystyka ogólna*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, 1987
- [84] Modelski J.: *Radiokomunikacja - drugie stulecie...*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 12/2011, s. 1617-1619
- [85] Morrison D. F.: *Wielowymiarowa analiza statystyczna*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1990
- [86] Myśliwiec J.: *Założenia techniczno-eksploatacyjne systemu łączności trunkingowej dla Gdynia Container Terminal S.A.*, Sopot 2005
- [87] Ndoh M. i Delisle G. Y.: *Modelling of wave propagation in rough mine tunnels*, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Columbus, USA, 2003
- [88] Parsons J. D.: *The Mobile Radio Propagation Channel*, Pentech Press, 1992
- [89] Pätzold M.: *Mobile Fading Channels*, Wiley, 2002
- [90] Pawłowski W.: *Analiza zaleceń ITU-R w odniesieniu do naziemnych systemów radiokomunikacyjnych*, Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej, tom 6, nr 3, 2005, s. 303-310
- [91] Pawłowski W.: *Krajowe badania propagacji fal radiowych w systemach radiokomunikacyjnych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 7, 2009, s. 243-245
- [92] Pawłowski W.: *Propagacja fal radiowych w warunkach łączności satelitarnej*, W: *Systemy radiokomunikacji satelitarnej*, Red. L. Knoch, Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1980
- [93] Pawłowski Z.: *Ekonometria*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1969
- [94] Phaiboon S.: *Propagation Path Loss Models for Parking Buildings*, 5th International Conference on Information Communications Signal Processing, Bangkok, 2005
- [95] Rappaport T. S. i McGillem C. D.: *UHF Fading in Factories*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, tom 7, nr 1, 1989, s. 130-139
- [96] Rappaport T. S.: *Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition)*, Prentice Hall, 2001
- [97] Rozal E. O. i Palaes E. G.: *Statistical Adjustment of Walfisch-Ikegami Model based in Urban Propagation Measurements*, Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Salvador, Brazylia, 2007

- [98] Saunders S. i Aragón-Zavala A.: *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems: 2nd Edition*, Wiley, 2007
- [99] Staniec K.: *Rozchodzenie się fal radiowych w rzeczywistym środowisku kopalnianym*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 6/2009, s. 482-485
- [100] Stefański J.: *Badanie metod i projektowanie usług lokalizacyjnych w sieciach radiokomunikacyjnych*, Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2012
- [101] Szymczyk T., Rabiej S., Pielesz A. i Desselberger J.: *Tablice matematyczne, fizyczne, chemiczne, astronomiczne*, Bielsko Biała: PARK, 2001
- [102] Tanghe E., Joseph W., Martens L., Capoen H., Van Herwegen K. i Vantomme W.: *Large-scale fading in industrial environments at wireless communication frequencies*, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Nowy Jork, 2007
- [103] Tanghe E., Joseph W., Ruckebusch P., Martens L. i Moerman I., *Propagation Modelling in a Container Environment*, 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Praga, Czechy, 2012
- [104] Tse D. i Viswanath P.: *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005
- [105] Walfisch J. i Bertoni H. L.: *A theoretical model of UHF propagation in urban environments*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, tom 36, nr 12, 1988, s. 1788-1796
- [106] Wesołowski K.: *Systemy radiokomunikacji ruchomej*, Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 2003
- [107] [www.aaeon.com](http://www.aaeon.com), (11.01.2012)
- [108] [www.maps.google.pl](http://www.maps.google.pl), (08.09.2012)
- [109] Xiaohua C. i Hanbin X.: *Propagaton prediction model and performance analysis of RFID system under metallic container production circumstance*, Microelectronics Journal, tom 42, nr 2, 2011, s. 247-252
- [110] Yang M. i Shi W.: *A Linear Least Square Method of Propagation Model Tuning for 3G Radio Network Planning*, Fourth International Conference on Natural Computation (ICNC), Jinan, Chiny, 2008
- [111] Zhang Y. P.: *Novel Model for Propagation Loss Prediction in Tunnels*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, tom 52, nr 5, 2003, s. 1308 - 1314
- [112] Zieliński R., *Tablice statystyczne*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1972