



**INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
W WARSZAWIE**

**SPECYFIKA PROPAGACJI FAL RADIOWYCH
W SYSTEMIE DOSTĘPOWYM
W WARUNKACH MIEJSKICH**

Andrzej Kiedrowski

Rozprawa doktorska

Szachowa 1, 04-894 Warszawa, Polska



INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI W WARSZAWIE

SPECYFIKA PROPAGACJI FAŁ RADIOWYCH W SYSTEMIE DOSTĘPOWYM W WARUNKACH MIEJSKICH

mgr inż. Andrzej Kiedrowski

**Praca doktorska przedstawiona
Radzie Naukowej
Instytutu Łączności w Warszawie**

Promotor: dr hab. inż. Ryszard J. Katulski

Warszawa 2004

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
BIBLIOTEKA NAUCZNA

Nr 5-10288

SPIS TREŚCI

SPIS OZNACZEŃ	9
---------------------	---

ROZDZIAŁ 1.

WPROWADZENIE	13
1.1. Charakterystyka eksploatacyjna radiowych systemów dostępowych - uwarunkowania środowiska propagacyjnego.....	14
1.2. Zagadnienie projektowania łącza dostępowego.....	18
1.3. Problem wyznaczania tłumienia propagacyjnego w warunkach miejskich	22
1.4. Tezy i zawartość rozprawy	28

ROZDZIAŁ 2.

METODOLOGIA STATYSTYCZNYCH BADAŃ PROPAGACYJNYCH.....	31
2.1. Technika pomiaru tłumienia propagacyjnego.....	31
2.2. Badanie rozrzutu wyników eksperymentalnych – sposób oceny wyników badań	33
2.3. Analiza regresji materiału pomiarowego	35
2.4. Uwzględnianie specyfiki środowiska propagacyjnego w mieście.....	37

ROZDZIAŁ 3.

WYZNACZANIE TŁUMIENIA PROPAGACYJNEGO W WARUNKACH MIEJSKICH	39
3.1. Charakterystyka propagacyjna wolnej przestrzeni.....	39
3.2. Modelowanie tłumienia propagacyjnego w warunkach LOS	40
3.2.1. Model COST 231 Walfisha-Ikegami (LOS).....	40
3.2.2. Modele ITU-R P.1411	40
3.3. Modelowanie tłumienia propagacyjnego w warunkach NLOS.....	42

3.3.1. Model Okumury-Haty	42
3.3.2. Model COST 231 Haty.....	44
3.3.3. Model Egli	45
3.3.4. Model COST 231 Walfisha-Ikegamięgo (NLOS).....	46
3.4. Analiza przydatnoŹci projektowej modeli propagacyjnych	51
3.4.1. Wolna przestrzeń.....	51
3.4.2. Warunki LOS.....	55
3.4.2.1. Model COST 231 Walfisha-Ikegamięgo (LOS).....	56
3.4.2.2. Modele ITU-R P.1411	59
3.4.3. Warunki NLOS.....	64
3.4.3.1. Model Okumury-Haty	65
3.4.3.2. Model COST 231 Haty.....	67
3.4.3.3. Model Egli	70
3.4.3.4. Model COST 231 Walfisha-Ikegamięgo (NLOS).....	72

ROZDZIAŁ 4.

SZACOWANIE TŁUMIENIA PROPAGACYJNEGO W WARUNKACH

PRACY RADIOWEGO SYSTEMU DOSTĘPOWEGO W MIEŹCIE

4.1. Opis w warunkach wolnej przestrzeni	77
4.2. Opis w warunkach LOS.....	82
4.2.1. Zmodyfikowany model COST 231 Walfisha-Ikegamięgo (LOS)	82
4.2.2. Zmodyfikowany model ITU-R P.1411.....	87
4.3. Opis w warunkach NLOS	91
4.3.1. Zmodyfikowany model Okumury–Haty	91
4.3.2. Zmodyfikowany model COST 231 Haty	96
4.3.3. Zmodyfikowany model Egli.....	100
4.3.4. Zmodyfikowany model COST 231 Walfisha – Ikegamięgo (NLOS).....	103
4.4. Porównawcza analiza przydatnoŹci z uwzględnieniem zabudowy	109

ROZDZIAŁ 5.

NOWY, WIELOWARIANTOWY MODEL EMPIRYCZNY TŁUMIENIA

PROPAGACYJNEGO W SYSTEMIE DOSTĘPOWYM

5.1. Geneza i sposób tworzenia modelu	111
5.1.1. Sytuacja LOS1	115

5.1.2. Sytuacja LOS2.....	116
5.1.3. Sytuacja NLOS1	119
5.1.4. Sytuacja NLOS2.....	120
5.2. Formuła analityczna.....	123
5.2.1. Warunki LOS.....	123
5.2.2. Warunki NLOS.....	127
5.3. Analiza porównawcza z uwzględnieniem wpływu zabudowy	133
5.3.1. Warunki LOS.....	133
5.3.2. Warunki NLOS.....	137
5.4. Ocena przydatności modelu empirycznego.....	145
PODSUMOWANIE.....	147
LITERATURA	151
ZAŁĄCZNIK 1	157
ZAŁĄCZNIK 2.....	161

SPIS OZNACZEŃ

$a(h_a)$	Zysk uwzględniający wysokość anteny stacji abonenckiej.
b	Odstęp pomiędzy budynkami.
b_d	Liczba budynków, nad którymi przebiega trajektoria fali.
CP_d	Stopień pokrycia terenu przez budynki.
d	Długość trasy propagacji; odległość pomiędzy stacją bazową a stacją abonencką.
d_a	Odległość pomiędzy przeszkodą a stacją abonencką.
d_b	Odległość pomiędzy stacją bazową a przeszkodą.
F	Statystyka testowa F Snecodera-Fishera.
f	Częstotliwość.
G	Zysk energetyczny anteny (ogólnie).
G_N	Zysk energetyczny anteny nadawczej.
G_o	Zysk energetyczny anteny odbiorczej.
h_a	Wysokość zawieszenia anteny stacji abonenckiej.
h_b	Wysokość zawieszenia anteny stacji bazowej.
h_f	Wysokość przeszkody na trasie propagacji fali radiowej.
h_k	Stopień zaburzenia I strefy Fresnela w sytuacjach: LOS1, NLOS1 i NLOS2.
h_{LOS}	Położenie linii widzialności anten łącza radiowego.
$h_{LOS,(1/2d)}$	Położenie linii widzialności anten łącza radiowego, w połowie trasy propagacji.
h_p	Stopień zaburzenia I strefy Fresnela w sytuacji LOS2.
K	Współczynnik korekcyjny tzw. „clutter factor”.
l	Długość drogi propagacji fali radiowej nad budynkami.
L	Tłumienie propagacyjne, model dwudrogowy.
$L_{b,wp}$	Tłumienie wolnej przestrzeni.
L_{bp}	Wartość tłumienia propagacyjnego w tzw. punkcie „breakpoint”.
L_{C231H}	Tłumienie propagacyjne - model COST 231 Haty.
$L_{C-H,zm}$	Tłumienie propagacyjne - zmodyfikowany model COST 231 Haty.
$L_{COSTW-I,LOS}$	Tłumienie propagacyjne - model COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (LOS).

L_{dod}	Tłumienie propagacyjne, dodatkowe wnoszone przez środowisko propagacyjne (ogólnie).
L_e	Tłumienie propagacyjne - model Egli.
$L_{e,zm}$	Tłumienie propagacyjne - zmodyfikowany model Egli.
L_{emp}	Tłumienie propagacyjne - wielowariantowy model empiryczny; (ogólnie).
L_{fN}	Straty w fiderze antenowym nadajnika.
L_{fO}	Straty w fiderze antenowym odbiornika.
$L_{LOS,L}$	Dolna graniczna wartość tłumienia propagacyjnego - Model ITU-R P.1411 $L_{LOS,L}$.
$L_{LOS,SD}$	Tłumienie propagacyjne - zmodyfikowany model COST 231 Walfisha-Ikegami (LOS).
$L_{LOS,U}$	Górna graniczna wartość tłumienia propagacyjnego - model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$;
$L_{LOS,U,zm}$	Tłumienie propagacyjne - zmodyfikowany model ITU-R P.1411.
$L_{LOS,wp}$	Tłumienie propagacyjne - zmodyfikowany model wolnej przestrzeni w warunkach LOS.
L_{LOS1}	Tłumienie propagacyjne w sytuacjach LOS1 - wielowariantowy model empiryczny.
L_{LOS2}	Tłumienie propagacyjne w sytuacjach LOS2 - wielowariantowy model empiryczny.
L_m	Poprawka tłumienia propagacyjnego związana z wysokością zawieszenia anteny stacji abonenckiej w modelu Egli.
L_{msd}	Tłumienie propagacyjne związane z ugięciem fali radiowej przy przejściu fali nad rzędem wielu budynków.
$L_{NLOS,wp}$	Tłumienie propagacyjne - zmodyfikowany model wolnej przestrzeni w warunkach NLOS.
L_{NLOS1}	Tłumienie propagacyjne w sytuacjach NLOS1 - wielowariantowy model empiryczny.
L_{NLOS2}	Tłumienie propagacyjne w sytuacjach NLOS2 - wielowariantowy model empiryczny.
L_{OH}	Tłumienie propagacyjne - model Okumury-Haty.
$L_{O-H,zm}$	Tłumienie propagacyjne - zmodyfikowany model Okumury-Haty.
L_{pom}	Pomierzone wartości tłumienia propagacyjnego.
$L_{pom,śr}$	Średnia wartość pomierzonego tłumienia propagacyjnego.
L_{prop}	Tłumienie propagacyjne (ogólnie).
$L_{prop,cz}$	Dopuszczalne tłumienie propagacyjne przy zasięgu czułościowym.
$L_{prop,int}$	Tłumienie propagacyjne przy zasięgu zakłóceńowym.
L_{rts}	Tłumienie propagacyjne występujące w trakcie dyfrakcji fali na krawędzi budynku.

L_s	Obliczone wartości tłumienia propagacyjnego (ogólnie).
$L_{WI,NLOS}$	Tłumienie propagacyjne w warunkach NLOS - model COST 231 Walfisha-Ikegami (NLOS).
$L_{WI,NLOS1,zm}$	Tłumienie propagacyjne dla $h_s \leq h_a$ - zmodyfikowany model COST 231 Walfisha-Ikegami (NLOS).
$L_{WI,NLOS2,zm}$	Tłumienie propagacyjne dla $h_s > h_a$ - zmodyfikowany model COST 231 Walfisha-Ikegami (NLOS).
ME	Błąd średni.
MS_E	Wariancja błędów modelu regresji.
MS_M	Wariancja modelu regresji.
N	Liczba pomiarów tłumienia propagacyjnego – liczebność próby.
p	Liczba zmiennych niezależnych w modelu regresji.
P_{LOS}	Prawdopodobieństwo spełnienia warunków LOS.
P_N	Moc dysponowana nadajnika.
P_o	Moc sygnału radiowego na wejściu odbiornika.
$P_{o,min}$	Moc sygnału na wejściu odbiornika, minimalna.
R	Promień pierwszej strefy Fresnela.
R	Współczynnik korelacji.
R^2	Współczynnik determinacji.
$\overline{R^2}$	Skorygowany współczynnik determinacji.
R_{bp}	Odległość tzw. punktu „breakpoint” od stacji bazowej.
SEE	Błąd standardowy estymacji.
S_p^2	Wariancja w próbie.
SS_E	Suma kwadratów błędów.
t	Statystyka testowa t.
W	Szerokość ulicy.
Z	Statystyka testowa Z.
ΔL	Funkcja błędów tłumienia propagacyjnego.
ϕ	Kąt nadejścia fali radiowej od stacji bazowej do stacji abonenckiej.
ϕ^2	Współczynnik indeterminacji.
λ	Długość fali radiowej.

ROZDZIAŁ 1

WPROWADZENIE

Zniesienie monopolu tzw. operatorów narodowych przyczyniło się w poważnym stopniu do rozwoju konkurencji w sektorze telekomunikacyjnym. Głównym elementem tej rywalizacji jest dążenie poszczególnych operatorów do dostarczenia abonentowi w jak najkrótszym czasie szerokiego wachlarza usług telekomunikacyjnych. Nowi operatorzy chcąc zapewnić swoim abonentom połączenie ze stacjonarną siecią telekomunikacyjną wykorzystują radiowe systemy dostępowe (ang. *wireless acces systems*) jako najprostszy sposób dostarczania tych usług. Stosowanie techniki dostępu radiowego nie ponosi za sobą konieczności posiadania linii przewodowych, koncentrycznych lub światłowodowych, do realizacji połączeń z abonentami. Dodatkowym atutem tej techniki jest krótki czas realizacji systemu dostępowego. Wszystko to sprawia, że zarówno dotychczasowi jak i również nowi operatorzy chętnie decydują się na instalowanie i eksploatację łączy radiowych, szczególnie w początkowej fazie budowy sieci telekomunikacyjnych. Elementem decydującym jest tutaj czynnik ekonomiczny i wspomniany krótki czas realizacji inwestycji, liczony od momentu określenia zapotrzebowania na usługi do chwili zapewnienia świadczenia tych usług.

Koncepcja radiowych systemów dostępowych polega na zastosowaniu specjalnych stacji radiokomunikacyjnych nadawczo-odbiorczych, nazywanych stacjami bazowymi lub głównymi, do realizacji dwukierunkowej łączności z użytkownikami tego systemu, czyli abonentami. Przy czym użytkownicy także muszą być wyposażeni w radiowe stacje nadawczo-odbiorcze, wspólne lub indywidualne, nazywane stacjami abonenckimi lub końcowymi. Pożądane właściwości realizowanych w ten sposób łączy radiowych zależą od rodzaju usług, na które występuje zapotrzebowanie, przy czym najczęściej są to usługi transmisji sygnałów mowy lub danych [73, 76, 83].

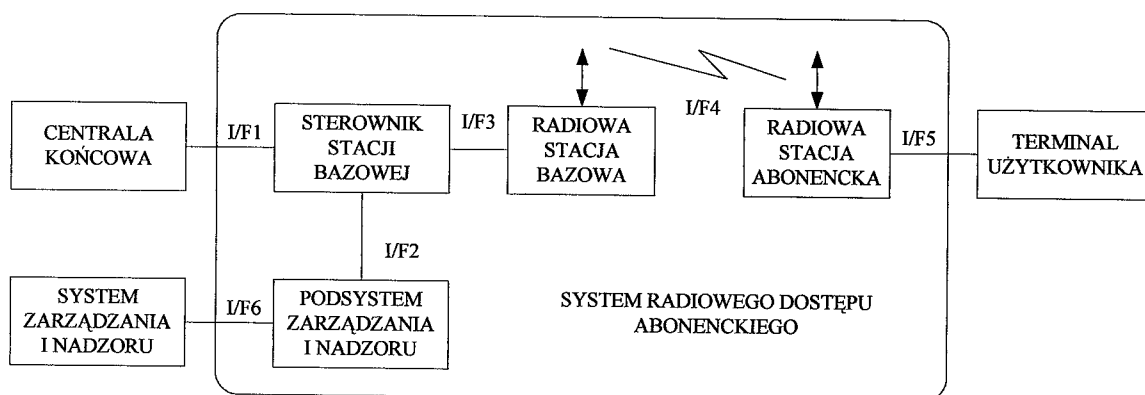
Zadanie projektanta radiowego systemu dostępowego polega na takim doborze parametrów technicznych tego systemu, aby zapewnić na obszarze jego działania poziom

sygnału radiowego gwarantujący wymaganą jakość transmisji [7, 35, 54, 55]. Istotnym elementem takiej analizy projektowej jest znajomość warunków propagacji fal radiowych na tym obszarze, szczególnie zaś ważne jest oszacowanie wartości tłumienia propagacyjnego, określanego również mianem strat propagacyjnych [29, 79]. Istnieje wiele modeli przeznaczonych do wyznaczania tłumienia propagacyjnego, które zostały opisane w literaturze przedmiotu, np. [28, 34, 47, 53, 59, 63, 64, 65, 68, 70, 75, 79, 80, 82]. Jednakże modele te zostały opracowane dla potrzeb projektowania systemów radiokomunikacji ruchomej lądowej i z tego powodu nie uwzględniają one specyfiki propagacyjnej występującej w stałym radiowym łączu dostępowym, a wyniki uzyskiwane za ich pomocą są obarczone dużymi błędami [37, 39, 42].

Istotnym, nierozwiązanym jednoznacznie problem naukowym jest wyznaczenie tłumienia propagacyjnego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego, szczególnie na terenach miejskich, które charakteryzują się znacznym urozmaiceniem infrastruktury i zabudowy. **Celem pracy jest opracowanie wielowariantowego modelu empirycznego do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w rzeczywistym środowisku miejskim, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego.**

1.1. Charakterystyka eksploatacyjna radiowych systemów dostępowych - uwarunkowania środowiska propagacyjnego

Koncepcja radiowej sieci dostępowej, zgodnie z modelem odniesienia zalecanym przez Europejski Instytut Standaryzacyjny ETSI (ang. *European Telecommunications Standards Institute*), polega na zastosowaniu jednej lub kilku stacji bazowych do dwukierunkowej łączności z abonentami (rys. 1.1) [88, 90, 93].



Rys. 1.1. Model odniesienia radiowego systemu dostępu abonenckiego wg ETSI.

Przedstawiony model ma charakter uniwersalny i nie zależy od zastosowanej technologii rozwiązania użytkowego. W modelu tym wyróżnia się następujące elementy składowe systemu dostępowego:

- sterownik stacji bazowej (SSB),
- radiową stację bazową (RSB),
- podsystem zarządzania i nadzoru (PZN), oraz
- radiową stację abonencką (RSA).

Sterownik stacji bazowej (SSB) łączy radiowy system dostępowy z centralą końcową (CK)-telefoniczną, która stanowi element sieci stacjonarnej. Obok tego SSB steruje także pracą stacji bazowych i współpracuje z podsystemem zarządzania i nadzoru (PZN). Podsystem PZN jest z kolei odpowiedzialny za realizację procedur zarządzających siecią, m.in. przechowuje dane konfiguracyjne użytkowników i nimi zarządza. Natomiast radiowe stacje bazowe (RSB) odpowiedzialne są za poprawną transmisję w kanale radiowym i z tego powodu często posiadają możliwość pomiaru i zarządzania parametrami łącza radiowego.

W modelu odniesienia wyróżnia się następujących sześć interfejsów [90, 91, 93]:

- interfejs o nazwie I/F1, pomiędzy sterownikiem stacji bazowej (SSB) a centralą końcową (CK) sieci publicznej, służy do przenoszenia informacji związanych z usługami dostępnymi dla użytkowników, korzystających z radiowego systemu dostępowego - interfejs ten łączy sterownik stacji bazowej SSB z sieciami pracującymi w trybie komutacji zarówno kanałów jak i pakietów,
- interfejs wewnętrzny I/F2 sieci dostępowej, który jest odpowiedzialny za wymianę informacji pomiędzy sterownikiem stacji bazowej (SSB) a podsystemem zarządzania i nadzoru (PZN),
- interfejs I/F3, który jest odpowiedzialny za zarządzanie zasobami radiowymi oraz obsługę zgłoszeń abonentów sieci dostępowej,
- **interfejs bezprzewodowy I/F4** umożliwiający przesyłanie informacji w kanale radiowym - decyduje on o właściwościach radiowego systemu dostępowego, determinuje zasięg systemu oraz ogranicza jego pojemność,
- interfejs IF/5, który jest wykorzystywany do przenoszenia informacji związanych z usługami, do których ma dostęp użytkownik sieci dostępowej,
- interfejs zewnętrzny IF/6, pomiędzy podsystemem zarządzania i nadzoru (PZN) a systemem zarządzania i nadzoru siecią (SZN), za pomocą którego przesyła się wszystkie informacje związane z konfiguracją, zarządzaniem i obsługą błędów w systemie dostępowym.

Przedstawiony powyżej model odniesienia określa funkcję radiowego systemu dostępowego w stacjonarnej sieci telekomunikacyjnej, jako elementu pośredniczącego w wymianie informacji pomiędzy centralą miejscową tej sieci i terminalem użytkownika. Najprostszym rozwiązaniem, zapewniającym połączenie radiowe pomiędzy stacją bazową i stacją abonencką, jest zastosowanie jednokanałowego łącza radiowego pracującego w wydzielonym kanale radiowym. Jednakże jest to sposób, z którym związane jest istotne ograniczenie, odnoszące się do możliwości obsłużenia ruchu telekomunikacyjnego o niewielkim natężeniu. W sytuacji, gdy występuje duże natężenie ruchu należy zastosować łącze radiowe wielokanałowe, co pociąga za sobą konieczność wyboru sposobu dostępu do kanału radiowego [38, 78, 89]. Spośród różnych stosowanych w praktyce sposobów dostępu, na szczególne podkreślenie zasługuje dostęp z podziałem kodowym, który charakteryzuje się wysoką jakością transmisji. Zastosowanie w takim przypadku techniki rozpraszania widma sygnałów zapewnia wysoką odporność na zakłócenia oraz dużą pojemność systemu, co ma szczególne znaczenie w środowisku silnie zurbanizowanym [85].

Przedmiot niniejszej rozprawy dotyczy interfejsu radiowego IF/4, który decyduje o właściwościach systemu dostępowego. Jest on odpowiedzialny za jego zasięg, szczególnie ważny z punktu widzenia operatora takiego systemu. Istotnym czynnikiem określającym ten zasięg, obok parametrów sprzętu użytego do budowy systemu dostępowego, jest tłumienie wnoszone przez środowisko propagacyjne [43, 44, 86].

W radiowym systemie dostępowym jednocześnie może być realizowana określona liczba połączeń pomiędzy stacją bazową i wieloma stałymi stacjami abonenckimi, zlokalizowanymi na pewnym obszarze, objętym zasięgiem działania tego systemu. Radiowy system dostępowy jest więc systemem typu „*point - to - multipoint*” [66]. Systemy takie realizowane są w zakresie mikrofal, począwszy od pasma 800 MHz, poprzez zakres częstotliwości 2 – 4 GHz (pasma 1,7; 1,9; 2,4 i 3,6 GHz), do zakresu 5GHz (pasma 5,2; 5,7 GHz) i 10,5GHz. Ponadto dla radiowych systemów dostępowych przewidziane są także pasma z zakresu 20 – 50 GHz. Systemy te, dla odróżnienia od uprzednio omówionych, są nazywane niekiedy systemami MPMP (ang. *Microwave Point-to-MultiPoint*).

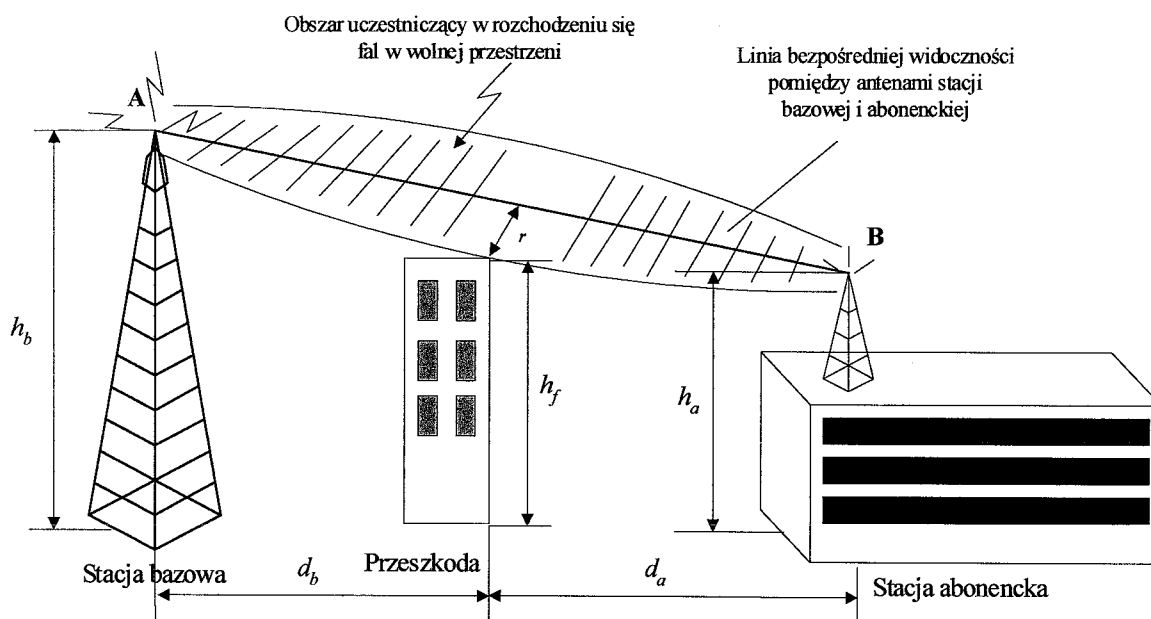
Warto również zwrócić uwagę na to, że lokalizacje stacji abonenckich mogą się zmieniać w czasie eksploatacji systemu. Pod tym względem radiowy system dostępowy wykazuje cechy systemów typu *point-to-area* (od punktu do obszaru) – podobnie jak ma to miejsce w systemach radiodifuzyjnych oraz w radiokomunikacji ruchomej lądowej. Dlatego też systemy dostępowe projektowane są przy wykorzystaniu technik przeznaczonych dla sieci komórkowych. Zadanie projektanta polega zatem na takim doborze parametrów technicznych

radiowego systemu dostępowego, aby zapewnić na określonym obszarze – stosownie do wymagań systemu – poziom sygnału radiowego gwarantujący wymaganą jakość transmisji.

Zatem ważnym elementem takiej analizy projektowej jest znajomość uwarunkowań rozchodzenia się fal radiowych na obszarze pracy radiowego systemu dostępowego.

Na terenach miejskich i podmiejskich istotny wpływ na wartość poziomu sygnału radiowego ma zachowanie warunków LOS (ang. *Line-Of-Sight*), czyli nie przysłonięcia linii bezpośredniej widzialności anten, znajdujących się na krańcach łącza radiowego. Tłumienie propagacyjne zależy od warunków propagacji występujących na przewidywanym obszarze działania systemu dostępowego. Ze względu na stosunkowo krótkie trasy propagacji, występujące w realnych systemach dostępowych, na warunki propagacji wpływa głównie ukształtowanie terenu i stopień jego zurbanizowania. Przede wszystkim tłumienie to zależy od przebiegu linii widzialności obu anten łącza radiowego, tj. położenia prostej łączącej te anteny w stosunku do istniejącej zabudowy obszaru miejskiego. Szczególnie ważne są takie czynniki jak: ukształtowanie terenu, jego stopień zurbanizowania i zadrzewienia, czyli tzw. profil trasy propagacji. Oczywiście tłumienie propagacyjne jest względnie małe, gdy zachowana jest linia widzialności. W praktyce projektowej przypadek ten określany jest mianem wspomnianego powyżej warunku LOS. Zaś najlepiej pod tym względem jest wówczas, gdy ponadto wolna jest pierwsza strefa Fresnela [3, 17, 52]. Spełnienie tych warunków zależy od wysokości zawieszenia anten obu stacji radiowego łącza dostępowego, czyli wysokości zawieszenia anteny stacji bazowej h_b i wysokości h_a położenia anteny stacji końcowej. Oznacza to, że wartości tłumienia propagacyjnego kształtują się najkorzystniej przy odpowiedniej, dostatecznie dużej wysokości zawieszenia obu anten. Dodatkowo, na spełnienie wyżej wspomnianych warunków mają wpływ przeszkody terenowe występujące na trasie propagacji fali radiowej pomiędzy stacją bazową i stacją końcową, np. budynki, drzewa itp. określone poprzez ich wysokości h_f oraz ich położenie względem anteny stacji bazowej i anteny stacji końcowej, określone poprzez odległości d_b oraz d_a . Obok tego istotna jest także wartość r promienia pierwszej strefy Fresnela. Problem ten zilustrowano na rys. 1.2.

Obok tego co napisano powyżej, należy mieć także na uwadze, że wpływ wysokości zawieszenia anteny na bilans energetyczny łącza jest dwojaki, tzn. z wysokością zawieszenia anteny rosną straty w fiderze antenowym (jeżeli urządzenie nie zawiera wyodrębnionej części przyantennej), co w pewnym stopniu redukuje korzystny z punktu widzenia propagacyjnego efekt wyższego zawieszenia anteny.



Rys. 1.2. Ilustracja warunku niezajętości pierwszej strefy Fresnela przy rozchodzeniu się fal radiowych w wolnej przestrzeni.

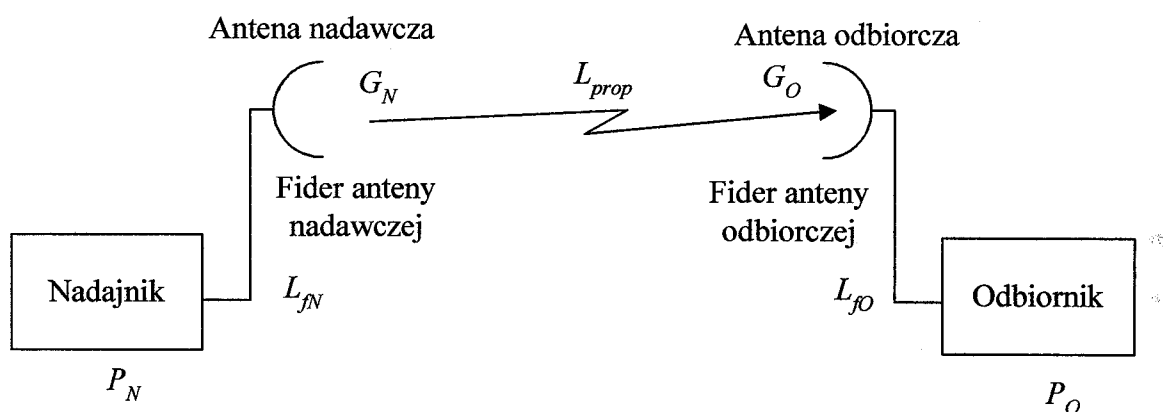
Oprócz wymienionych wyżej czynników na tłumienie propagacyjne w istotny sposób wpływa częstotliwość. Wraz ze wzrostem częstotliwości rośnie tłumienie, a więc maleją przewidywane zasięgi. Ponadto na trasie propagacji występuje wiele niekorzystnych zjawisk wpływających na dodatkowe tłumienie sygnału radiowego [15]. Są to odbicia od powierzchni ziemi i dachów; szczególnie niekorzystne gdy dachy pokryte są blachą, odbicia od ścian budynków, pojedyncza i wielokrotna dyfrakcja na krawędziach budynków, absorpcja i rozproszenie. Wpływ na przebieg tych zjawisk ma charakter środowiska, w którym zachodzi propagacja fal radiowych [22,56].

1.2. Zagadnienie projektowania łącza dostępowego

Na etapie opracowywania założeń projektowych na system dostępowy znany jest zazwyczaj jedynie obszar, który ma być objęty jego działaniem, określony na podstawie badań marketingowych i wynikającego z nich zapotrzebowanie na usługi telekomunikacyjne. Natomiast nie są znane lokalizacje stacji, w szczególności dokładne lokalizacje stacji abonenckich. Zatem, pierwszy etap projektowania radiowego systemu dostępowego polega na przeprowadzeniu analizy warunków propagacji, występujących na założonym obszarze pracy tego systemu [19, 21, 48, 92]. Następnie w dalszej kolejności, na tej podstawie należy wyznaczyć potencjalne lokalizacje stacji bazowych, korzystne pod względem zapewnienia możliwie pełnego pokrycia tego obszaru zasięgiem działania systemu. Należy zwrócić uwagę, że w praktyce tak określone lokalizacje stacji bazowych są często korygowane na skutek

konieczności uwzględnienia rzeczywistych czynników eksploatacyjnych, takich jak np. dostępność inwestycyjna na wskazanym obszarze oraz rzeczywisty rozkład terenowy stacji abonenckich, który zostaje w pełni poznany dopiero po napływie zgłoszeń abonentów, a więc jest jednoznaczny po upływie pewnego czasu, aniżeli ma to miejsce w fazie projektowania systemu.

Istotnym elementem analizy projektowej radiowego systemu dostępowego jest sporządzenie bilansu energetycznego łącza. Bilans ten służy do określenia zależności pomiędzy mocą dysponowaną nadajnika na wejściu łącza, a mocą odebraną przez odbiornik na drugim końcu łącza (rys. 1.3).



Rys. 1.3. Ilustracja bilansu energetycznego łącza radiowego.

Równanie opisujące tę zależność ma postać [30, 69, 74, 77]:

$$P_O = P_N - L_{fN} - L_{fO} + G_N + G_O - L_{prop}, \quad (1.1)$$

P_O - moc sygnału na wejściu odbiornika [dBm],

P_N - moc dysponowana nadajnika [dBm],

L_{fN} - straty w fiderze anteny nadajnika [dB],

L_{fO} - straty w fiderze anteny odbiorczej [dB],

G_N - zysk energetyczny anteny nadawczej [dBi],

G_O - zysk energetyczny anteny odbiorczej [dBi],

L_{prop} - tłumienie propagacyjne [dB].

W równaniu bilansu energetycznego łącza radiowego (1.1) można wyróżnić dwie zasadnicze grupy czynników wpływających na zasięg, czyli na obszar działania systemu dostępowego, które są zależne od:

- a) zastosowanego sprzętu radiokomunikacyjnego, przede wszystkim $P_{O,min}$ oraz P_N , oraz
- b) warunków propagacji (L_{prop}).

Zatem, do pierwszej grupy tych czynników należą: moc P_N wypromieniowanego sygnału radiowego oraz konieczna moc $P_{O,min}$ sygnału radiowego odebranego, przy której uzyskuje się wymaganą jakość transmisji. P_N określa moc promieniowania po stronie nadawczej, która zależy także od:

- zysku anteny nadawczej G_N , oraz
- strat L_{fN} , zachodzących w fiderze antenowym po stronie nadawczej.

Z kolei czynnik $P_{O,min}$ jest minimalną mocą sygnału na wejściu odbiornika, konieczną do prawidłowego odbioru. Wraz z wartością mocy $P_{O,min}$ należy także wziąć pod uwagę:

- zysk anteny odbiorczej G_O , oraz
- straty L_{fO} , zachodzące w fiderze odbiorczym.

W praktyce projektowej dla potrzeb bilansowania energetycznego łącza radiowego, miarą mocy promieniowanej i minimalnej mocy odbieranej jest jednostka [dBm], czyli [dB] odniesiony do 1mW. Z kolei zysk anteny w [dB], najczęściej odniesiony jest do anteny izotropowej [79].

Jednakże, w wielu katalogach podaje się wartość zysku względem dipola półfalowego. Przy czym pomiędzy zyskiem energetycznym podawanym względem anteny izotropowej (wyrażonym w [dBi]) a zyskiem podawanym względem dipola półfalowego (wyrażonym w [dBd]) zachodzi następująca ogólnie znana relacja:

$$G[dBi] = G[dBd] + 2,15[dB]. \quad (1.2)$$

W przypadku analizowania propagacji wielodrogowej należy uwzględnić nie tylko zysk energetyczny anten, ale także polaryzacje fal promieniowanych przez antenę pod różnymi kątami.

Tłumienie w fiderach antenowych (anten nadajnika i odbiornika) określa straty mocy sygnału pomiędzy nadajnikiem (odbiornikiem) i anteną, tj. w kablu łączącym urządzenie stacyjne z anteną. Tłumienie to można obliczyć mnożąc tłumienie jednostkowe zastosowanego kabla przez jego długość, przy czym tłumienie kabli podawane jest zazwyczaj w [dB/100m]. W celu zminimalizowania strat mocy sygnału w fiderze antenowym, stosuje się takie rozmieszczenie nadajnika (odbiornika) i anteny, aby odległość między nimi była jak najmniejsza, a więc i długość kabla była minimalna. Najczęściej, jeśli tylko jest to możliwe technicznie, urządzenia nadawcze umieszcza się obok masztu antenowego.

Występujące w zależności (1.1) tłumienie propagacyjne L_{prop} stanowi szczególnie złożony czynnik warunkujący zasięg działania każdego systemu radiowego, w tym również systemu dostępowego.

Zatem przy znanych parametrach urządzeń radiowego systemu dostępowego, określenie wartości tłumienia propagacyjnego ma kluczowe znaczenie dla potrzeb analizy łącza radiowego tego systemu. Należy przy tym uwzględnić warunki odbioru, czyli to czy zasięg ograniczony jest szumami – tzw. zasięg czułościowy, czy też sygnałami innych stacji radiowych – tzw. zasięg interferencyjny.

Analizując zasięg czułościowy, dopuszczalną dla określonych parametrów technicznych łącza wartość tłumienia propagacyjnego otrzymuje się przekształcając równanie (1.1), co przy uwzględnieniu poziomu szumów można wyrazić następująco [26, 30]:

$$L_{prop,cz} = P_N - P_{O,min} - L_{fN} - L_{fO} + G_N + G_O - N, \quad (1.3)$$

gdzie: N wyraża poziom szumów termicznych na wejściu odbiornika [dBm].

W przypadku zakłóceń interferencyjnych, analizując bilans energetyczny łącza należy oprócz szumów termicznych na wejściu odbiornika wziąć także pod uwagę dopuszczalny poziom sygnałów zakłócających [69, 92]. Na ogół jest on odniesiony do poziomu szumów termicznych. W rezultacie wyrażenie na dopuszczalne tłumienie propagacyjne w tym przypadku przybiera postać:

$$L_{prop,int} = P_N - P_{O,min} - L_{fN} - L_{fO} + G_N + G_O - N - (I/N), \quad (1.4)$$

przy czym: I/N wyraża stosunek poziomów mocy sygnałów zakłócających do szumów termicznych.

Następnym istotnym elementem analizy projektowej łącza radiowego systemu dostępowego jest wyznaczenie odległości, przy której wystąpi obliczona, czyli dopuszczalna wartość tłumienia propagacyjnego. Odległość ta z jednej strony określa maksymalną długość trasy propagacyjnej między stacją bazową i stacją abonencką, oraz z drugiej strony minimalną odległość lokalizacji stacji zakłócającej.

1.3. Problem wyznaczania tłumienia propagacyjnego w warunkach miejskich

Wyznaczanie tłumienia propagacyjnego jest zagadnieniem bardzo trudnym, szczególnie w terenie miejskim, gdzie mamy do czynienia z dużym zróżnicowaniem infrastruktury i zabudowy terenu.

Tłumienie propagacyjne L_{prop} przedstawia się więc na ogół w postaci sumy tłumień powstających przy założeniu propagacji w wolnej przestrzeni i tzw. tłumienia dodatkowego, będącego rezultatem działania innych czynników [6, 70, 71]. Zatem:

$$L_{prop} = L_{b,wp} + L_{dod}, \quad (1.5)$$

gdzie:

$L_{b,wp}$ - podstawowe tłumienie w wolnej przestrzeni,

L_{dod} - tłumienie dodatkowe.

Przy czym tłumienie propagacyjne w wolnej przestrzeni w przypadku łącza typu *point-to-point* (system *point-to-multipoint* składa się z określonej liczby takich łączy), podane jest wyrażeniem [31]:

$$L_{b,wp} = 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right), \quad (1.6)$$

przy czym:

$L_{b,wp}$ - tłumienie w wolnej przestrzeni [dB],

d - długość trasy propagacji,

λ - długość fali, przy czym d i λ dane są w tych samych jednostkach.

Jak już wspomniano, dla terenów miejskich szczególne znaczenie na wielkość tłumienia propagacyjnego ma wpływ spełnienia warunków LOS. Aby zapewnić warunki LOS konieczny jest staranny wybór lokalizacji stacji bazowej z uwzględnieniem obszaru, który ta stacja ma obsługiwać, a także odpowiednio wysokie umieszczenie anteny tej stacji tak, aby linia widzialności anten przebiegała dostatecznie wysoko ponad zabudową.

Jeżeli dodatkowo, przy tym zostanie spełniony warunek niezajętości 1-szej strefy Fresnela, wówczas warunki propagacji będą w przybliżeniu odpowiadały warunkom propagacji w wolnej przestrzeni i co za tym idzie tłumienie propagacyjne na wybranej trasie może być określone na podstawie wyrażenia (1.6). Jak to wynika z rys. 1.2, warunek

niezajętości 1-szej strefy Fresnela powiązany jest bezpośrednio z jej promieniem, który można wyznaczyć z zależności (1.7):

$$r = \sqrt{\frac{\lambda d_b d_a}{d_b + d_a}}, \quad (1.7)$$

przy czym:

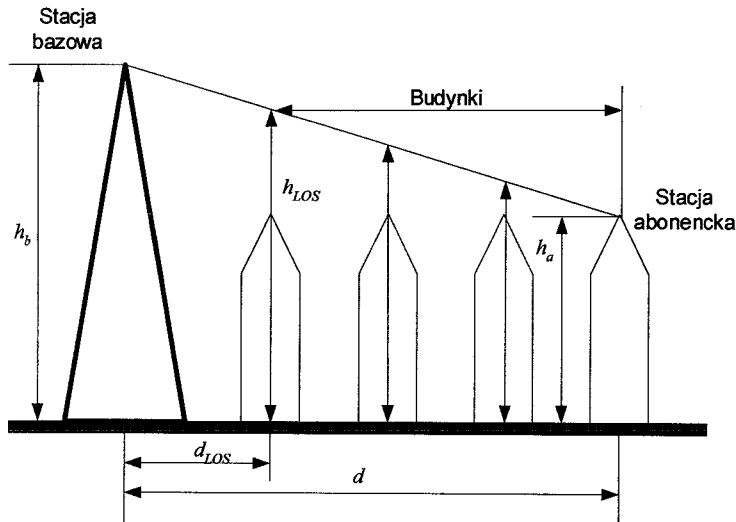
λ - długość fali,

d_b, d_a - odległości przeszkody od odpowiednio stacji : bazowej i abonenckiej.

Mając powyższe na uwadze, linia widzialności anten powinna przewyższać przeszkody występujące na trasie propagacji o wartość promienia r , po to aby nie powstały straty dodatkowe, (patrz rys. 1.2). W przeciwnym przypadku, w wyniku przysłonięcia 1-jej strefy Fresnela powstaną straty dodatkowe, które w przypadku przysłonięcia tej strefy tylko w połowie wynoszą 6 dB, zaś powyżej tego bardzo szybko rosną [66]. Mamy wówczas do czynienia z tzw. sytuacją NLOS (ang. *Non-Line Of Sight*), czyli braku bezpośredniej widoczności pomiędzy antenami łącza radiowego. W mieście występują liczne sytuacje, w których bardzo trudne lub wręcz niemożliwe jest spełnienie warunku niezajętości 1-szej strefy Fresnela. W takich sytuacjach należy uwzględnić dodatkowe straty wynikające z częściowego przysłonięcia tej strefy szacując je na wspomniane powyżej co najmniej 6dB.

Niekiedy rygorystyczna analiza spełnienia warunków LOS jest niewykonalna ze względów technicznych, między innymi z powodu braku koniecznych do tego danych o środowisku miejskim. W takiej sytuacji przydatna jest statystyczna ocena spełnienia warunków LOS w określonym środowisku miejskim. Prosty model statystyczny służący do przewidywania prawdopodobieństwa spełnienia warunków LOS, biorący pod uwagę rozkład i wysokość budynków, a także lokalizację i wysokość umieszczenia anteny stacji bazowej, został przedstawiony w dokumentach ITU-R [32].

Zgodnie z powyższym modelem prawdopodobieństwo P_{LOS} tego, że istnieje linia widoczności pomiędzy stacją bazową a abonencką, określane jest poprzez iloczyn prawdopodobieństw, że każdy budynek leżący na trasie propagacji znajduje się poniżej linii prostej łączącej obie anteny. Dotyczy to punktów, w których prosta ta przebiega nad budynkami, jak to pokazano na rys. 1.4.



Rys. 1.4. Przekrój trasy propagacji w terenie zabudowanym.

Zatem P_{LOS} możemy opisać zależnością:

$$P_{LOS} = \prod_{i=b_1}^{i=b_d} P(h_{bud,i} < h_{LOS,i}), \quad (1.8)$$

gdzie:

b_d - liczba budynków, nad którymi przebiega trajektoria fali,

$h_{bud,i}$ - wysokość i-tego budynku,

$h_{LOS,i}$ - położenie linii widoczności nad i-tym budynkiem.

Wielkość $h_{LOS,i}$ jest obliczana dla i-tego budynku według poniższej zależności:

$$h_{LOS,i} = h_b - \frac{d_{LOS,i}(h_b - h_a)}{d}, \quad (1.9)$$

przy czym:

$d_{LOS,i}$ - odległość i-tego budynku od anteny stacji bazowej,

d - długość trasy propagacji.

W rozpatrywanym powyżej modelu przyjmuje się równomierny charakter zabudowy, jak to na ogół ma miejsce we współczesnych osiedlach mieszkaniowych. Zatem odległości kolejnych budynków od stacji bazowej określone są zależnością:

$$d_i = (i + 0,5)\delta_r, \quad i \in \{0, 1, \dots, (b_d - 1)\}, \quad (1.10)$$

gdzie:

$\delta_r = d/b_d$ - odstęp między budynkami.

Ponadto w modelu tym uwzględnia się następujące współczynniki:

α - stosunek powierzchni zabudowanej do całkowitej powierzchni rozpatrywanej,

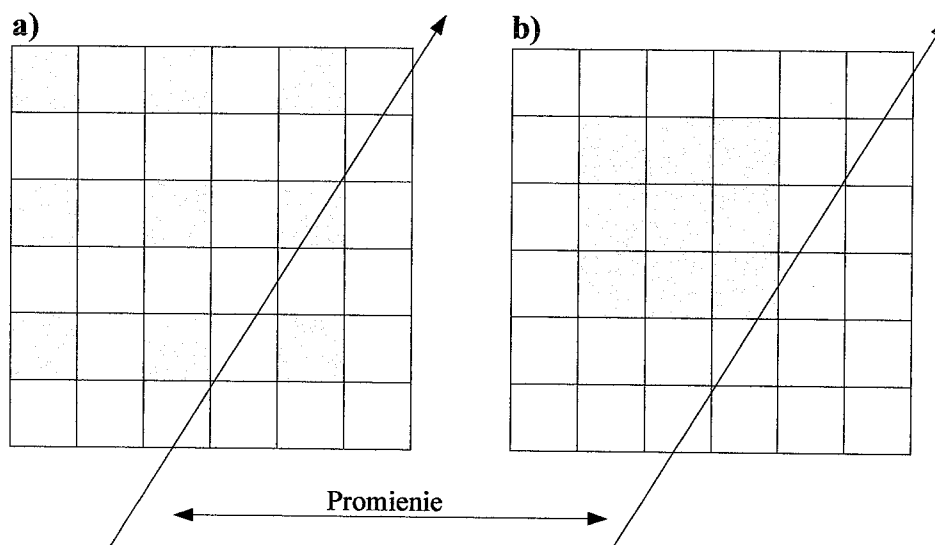
β - średnia liczba budynków przypadających na jednostkę powierzchni (np. na km²),

γ - parametr charakteryzujący rozkład wysokości budynków.

Parametr γ określa, inaczej mówiąc, najbardziej prawdopodobną wysokość budynków znajdujących się na danym terenie. Do opisu rozkładu wysokości budynków wykorzystuje się rozkład Rayleigh'a o postaci:

$$P(h) = \frac{e^{-\frac{h^2}{2\gamma^2}}}{\gamma^2} h. \quad (1.11)$$

Natomiast dzięki parametrom α i β możliwe jest rozróżnienie sytuacji pokazanej na rys. 1.5. W tym przypadku stosunek powierzchni zabudowanej do całkowitej jest taki sam, chociaż rysunki 1.5 a) i 1.5 b) różnią się liczbą budynków. Jeśli budynki mają podobną wysokość, to prawdopodobieństwo tego, że $h_{bud} < h_{LOS}$ będzie mniej istotne w przypadku wielu budynków niż tego jednego o dużej powierzchni.



Rys. 1.5. Dwa przykłady terenu o tym samym α i różnym β .

Dla terenów silnie zurbanizowanych współczynnik α ma zakres od 0,1 do 0,8 natomiast β może wynosić od 100 do 750.

Trajektorie fal radiowych, przy wyżej podanych założeniach, będą przebiegać wzdłuż wybranej trasy propagacyjnej średnio nad $b = \sqrt{\alpha\beta}$ budynkami, licząc na jednostkę długości (1 km). Na całej trasie o długości d [km], będzie to liczba budynków określona wzorem:

$$b_d = \text{floor}(d \cdot b), \quad (1.12)$$

gdzie funkcja $\text{floor}(\cdot)$ wyznacza część całkowitą z argumentu, co oznacza zaokrąglenie do najmniejszej wartości całkowitej.

Prawdopodobieństwo, że wysokość i -tego budynku jest mniejsza od wybranej wysokości h_i , można wyznaczyć na podstawie poniższego wyrażenia

$$P_i = \int_0^{h_i} P(h) dh = 1 - e^{-h_i^2 / 2\gamma^2}. \quad (1.13)$$

Wówczas prawdopodobieństwo zachowania warunków LOS do odległości d_i od stacji bazowej wynosi

$$P_{LOS,i} = \prod_{j=0}^{j=i} P_j \quad j \in \{0, \dots, i\}. \quad (1.14)$$

Chcąc określić stopień pokrycia terenu, należy uwzględnić każdą wartość $P_{LOS,i}$ w sposób wagowy, gdzie każda waga zależy od odległości od stacji bazowej, czyli:

$$W_i = 2i + 1, \quad (1.15)$$

przy czym i oznacza numer budynku, nad którym przebiega trajektoria fali radiowej.

Sumując wagowe prawdopodobieństwa zachowania warunków LOS i normalizując je względem gęstości zabudowy rozpatrywanej komórki, otrzymamy wzór na stopień pokrycia terenu CP_d dla komórki o promieniu d :

$$CP_d = \frac{\sum_{i=0}^{b_d-1} P_{LOS,i} W_i}{b_d^2} \quad (1.16)$$

Ograniczenia powyższego modelu wynikają z podanych już wcześniej założeń, że fala rozchodzi się nad terenem płaskim oraz, że budynki rozmieszczone są regularnie. Oczywiście założenia te nie zawsze są spełnione. Ograniczenia te można uzupełnić, biorąc pod uwagę powyższe fakty:

- w modelu nie uwzględnia się pofałdowania terenu, tzn. zakłada się, że jest on płaski. Natomiast różnica nawet kilku metrów we względnej wysokości położenia budynków, może mieć znaczenie w przewidywaniu prawdopodobieństwa warunków LOS. W tym przypadku należy dodatkowo uwzględnić, dla każdego punktu analizowanego obszaru, jego położenie względem określonej wysokości terenu.
- Gęstość i wysokość budynków może być różna w obszarze działania systemu dostępowego. Dlatego też analiza warunków LOS powinna być przeprowadzona oddzielnie dla każdego fragmentu takiego obszaru.
- W większości przypadków odbiorniki stacji końcowych są umieszczane na dachach budynków, więc wysokości zawieszenia anten stacji końcowych podlegają takiemu samemu rozkładowi jak wysokość budynków. Natomiast w modelu założono, że anteny stacji końcowych znajdują się na stałej wysokości względem położenia trasy propagacji. Należy w takim przypadku założyć, że wysokości zawieszenia anten można także opisać rozkładem Rayleigh'a.

Praktycznym, coraz częściej wykorzystywanym przez projektantów sposobem określenia warunków LOS w obszarze pracy radiowego systemu dostępowego, jest przeprowadzenie symulacji komputerowych przy użyciu map cyfrowych terenu [84]. Dostępne obecnie mapy cyfrowe umożliwiają dokładną ocenę spełnienia warunków LOS, opierając się na danych dotyczących ukształtowania terenu i występującej zabudowy.

Do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w terenach miejskich powstało wiele modeli opisujących analitycznie to zjawisko. W dalszej części pracy zostaną opisane i przeanalizowane najbardziej reprezentatywne, z punktu widzenia przedmiotu niniejszej rozprawy, modele propagacyjne, tzn.:

- modele służące do szacowania tłumienia propagacyjnego w warunkach LOS, czyli model przedstawiony w zaleceniu ITU-R P.1411 [29] oraz model przedstawiony w raporcie końcowym prac Grupy COST 231 [14] nazywany modelem COST 231 Walfisha- Ikegamiego dla warunków LOS,
- empiryczne szeroko stosowane modele służące do szacowania tłumienia propagacyjnego zarówno w warunkach LOS jak i przy braku widoczności pomiędzy antenami łącza radiowego – czyli w warunkach NLOS, tzn. model COST 231 Haty [14], model Okumury – Haty [20] oraz model Egli [79].

1.4. Tezy i zawartość rozprawy

Jak już wspomniano, projektanci radiowych sieci dostępowych coraz częściej korzystają z cyfrowych map terenu, które wspomagają procesy planowania lokalizacji stacji bazowych. Możliwie wierne odzwierciedlenie rzeczywistych warunków propagacyjnych na danym terenie jest nadal mankamentem wielu programowych narzędzi planistycznych, współpracujących ze wspomnianymi mapami cyfrowymi. Problem ten nie jest związany bezpośrednio z dokładnością map cyfrowych stosowanych w procesie projektowania radiowych sieci dostępowych, ale z brakiem odpowiednich modeli matematycznych, służących do szacowania tłumienia propagacyjnego w tych systemach. Modele stosowane obecnie do szacowania tłumienia propagacyjnego w radiowych sieciach dostępowych odnoszą się przede wszystkim do systemów komórkowych. Jak wynika z przeprowadzonych prac badawczych, których wyniki zostały zaprezentowane w dalszej części niniejszej rozprawy, modele te nie nadają się do praktycznych zastosowań podczas projektowania sieci dostępu radiowego, ze względu na stosunkowo duży błąd estymacji tłumienia propagacyjnego. Największe błędy szacowania tłumienia propagacyjnego za pomocą tych modeli obserwuje się na terenie miast, gdzie obecnie najczęściej stosowane są systemy dostępowe.

W świetle powyższego, główna teza rozprawy dotyczy wykazania, że *poprzez opracowanie nowego, wielowariantowego modelu empirycznego do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w radiowych systemach dostępowych w warunkach miejskich, można uzyskać znaczącą poprawę dokładności wyznaczania tego tłumienia.*

Dodatkowo sformułowano następującą tezę pomocniczą: *dla wybranych modeli propagacyjnych przeznaczonych do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w systemach radiokomunikacji ruchomej lądowej można poprzez ich modyfikację uzyskać poprawę szacowania tego tłumienia dla potrzeb projektowania radiowych systemów dostępowych w warunkach miejskich.*

Niniejsza rozprawa doktorska składa się z pięciu rozdziałów, podsumowania, spisu literatury oraz dwóch załączników.

Po krótkim wprowadzeniu, w którym przedstawiono charakterystykę eksploatacyjną radiowych systemów dostępowych oraz podstawowe zagadnienia dotyczące projektowania

sieci dostępowych, w rozdziale II szczegółowo opisano zastosowaną technikę pomiarów tłumienia propagacyjnego oraz zdefiniowano użyte do oceny wyników badań miary.

W rozdziale III opisano i przeprowadzono szczegółową analizę przydatności modeli propagacyjnych stosowanych do tej pory do projektowania radiowych systemów dostępowych.

W rozdziale IV przedstawiono sposób i uzyskane wyniki modyfikacji istniejących modeli do szacowania tłumienia propagacyjnego w radiowych systemach dostępowych.

W rozdziale V opisano sposób tworzenia oraz zaprezentowano uzyskane wyniki wyznaczania tłumienia propagacyjnego w systemach radiowego dostępu abonenckiego w warunkach miejskich za pomocą nowego, wielowariantowego modelu empirycznego.

Podsumowanie do niniejszej rozprawy zawiera wnioski i spostrzeżenia dotyczące uzyskanych wyników.

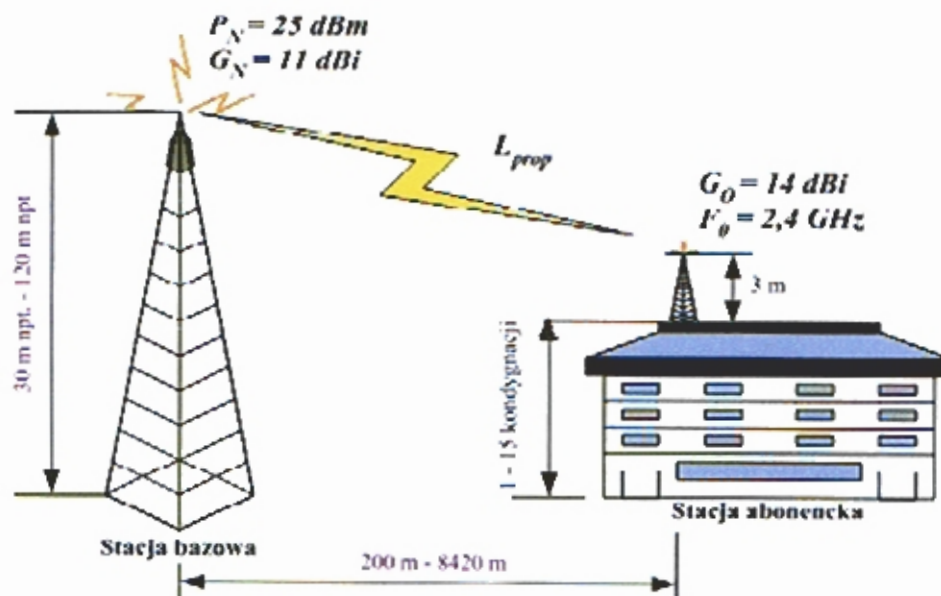
Po spisie literatury, zawierającym 93 pozycje, umieszczono dwa załączniki. Załącznik nr 1 zawiera zestawienie błędów średnich i standardowych estymacji wyznaczania tłumienia propagacyjnego oraz współczynników determinacji i indeterminacji dla wybranych modeli. Natomiast Załącznik nr 2 zawiera przykład analizy zasięgowej wykonanej za pomocą opracowanego wielowariantowego modelu empirycznego z wykorzystaniem mapy cyfrowej terenu.

ROZDZIAŁ 2

METODOLOGIA STATYSTYCZNYCH BADAŃ PROPAGACYJNYCH

2.1. Technika pomiaru tłumienia propagacyjnego

W okresach letnich, w latach 2000 i 2001 w wybranych miastach Polski (Gdańsk, Gdynia, Poznań, Kraków) przeprowadzono pomiary tłumienia propagacyjnego stacji bazowych radiowych systemów dostępowych. Pomiary te wykonano za pomocą sprzętu firmy InnoWave, przeznaczonego do diagnozowania systemu radiowego dostępu abonenckiego o firmowej nazwie MGW (*ang. MultiGain Wireless*) [26, 27, 62], w układzie przedstawionym na rys. 2.1 [50].



Rys. 2.1. Układ pomiarowy wykorzystywany podczas prowadzonych badań.

W badaniach tych anteny stacji bazowych zawieszono były na wysokościach z przedziału od 30 m n.p.t. do 120 m n.p.t.. Natomiast anteny stacji abonenckich były umieszczone na wysokościach od 3 m n.p.t. tzn. na powierzchni ziemi, gdy był niemożliwy wstęp na dach

budynku, do wysokości piętnastokondygnacyjnego budynku, tzn. 48m n.p.t. Bezpośrednie ustawienie anteny na obszarze dachu określonego budynku, było zdeterminowane poziomem odbieranego sygnału, tzn. antena była instalowana w takim miejscu, w którym poziom sygnału osiągał wartość maksymalną. Zawieszenie anteny w stosunku do powierzchni ziemi/dachu ustalono na ok. 3m, co odpowiada najczęściej stosowanym w praktyce warunkom instalacyjnym. Odległości pomiędzy stacjami: bazową (nadawczą) a abonencką (odbiorczą) wahały się w przedziale od 200 m do 8420 m.

Moc sygnału nadawanego wynosiła 25 dBm, przy częstotliwości 2,4 GHz. Zysk anteny nadawczej (według danych katalogowych) wynosił 11 dBi, natomiast anteny odbiorczej 14 dBi. Po stronie stacji abonenckiej wykonywane były pomiary poziomu mocy sygnału na wejściu odbiornika, z dokładnością do 1 dBm. Wszystkie pomiary zostały wykonane w tzw. łączy „w dół” (ang. *down link*), czyli w kierunku od stacji bazowej do stacji abonenckiej. Użyty do pomiarów sprzęt spełniał normy kontroli jakości. Z każdej serii pomiarów sporządzano raporty, zawierające m.in.:

- adres lokalizacji stacji bazowej,
- wysokość zawieszenia anteny stacji bazowej (pomiar geodezyjny),
- adresy lokalizacji stacji abonenckich,
- wysokości zawieszenia anten poszczególnych stacji abonenckich (z dokładnością do 0,5 kondygnacji – każda kondygnacja to 3 m),
- poziomy sygnałów odbieranych przez odbiorniki stacji abonenckich,
- informacje o spełnieniu warunku LOS, czyli widoczności anteny stacji bazowej i anteny stacji abonenckiej.

W celu stwierdzenia warunków LOS posłużono się lampą halogenową zawieszoną na maszcie stacji bazowej na wysokości zawieszenia anteny tej stacji. Jeżeli warunki pomiarów odbiegały od podanych powyżej, było to każdorazowo odnotowywane w raporcie. Wszystkie pomiary były wykonane przez jedną dwuosobową ekipę pomiarową, przy użyciu tego samego sprzętu pomiarowego dla wszystkich pomiarów.

Następnie w oparciu o równanie bilansu energetycznego łączy radiowego, zgodnie z zależnością (1.1), dla każdego pomiaru wyznaczono tłumienie propagacyjne. W ten sposób otrzymano materiał badawczy składający się z ok. 19 000 pomiarów [9].

W dalszej kolejności, na podstawie map topograficznych Polski w skali 1:10000, opierając się o atlasy miast z nazwami ulic i numeracją budynków, wyznaczono dla wszystkich pomiarów odległości pomiędzy lokalizacją anteny stacji bazowej a lokalizacją anteny stacji abonenckiej, z dokładnością do 10m. Dodatkowo na podstawie map

topograficznych określono współrzędne geograficzne lokalizacji każdej anteny stacji abonenckiej z dokładnością do jednej sekundy. Posługując się współrzędnymi geograficznymi przy użyciu mapy cyfrowej terenu wyznaczono rzędne terenu miejsc posadowienia anten stacji abonenckich oraz wysokości wzniesienia anten stacji bazowych i abonenckich.

Wszystkie dane wykorzystywane podczas prowadzonych badań, a więc adresy, wysokości wzniesienia anten stacji bazowych, wysokości wzniesienia anten stacji abonenckich, odległości pomiędzy stacjami, rzędne terenu posadowienia anten stacji, informacje o spełnieniu warunku LOS oraz wartości tłumienia propagacyjnego zestawiono w tabelach [60]. Każdemu pomiarowi odpowiadał jeden wiersz określonej tabeli.

2.2. Badanie rozrzutu wyników eksperymentalnych – sposób oceny wyników badań

Badanie rozrzutu wyników eksperymentalnych wykonano poprzez porównanie wartości zmierzonych tłumienia propagacyjnego z wartościami obliczonymi przy użyciu badanych modeli propagacyjnych. Jeżeli nie dysponowano wszystkimi danymi występującymi w opisie modelu - dotyczy to modelu COST 231 Walfisha-Ikegamię w warunkach NLOS - posłużono się wartościami parametrów zalecanych w takiej sytuacji przez autorów tego modelu, [12, 14].

Do oceny dopasowania modeli propagacyjnych do danych pomiarowych posłużono się najczęściej stosowanymi w praktyce miarami dopasowania [16, 36, 58], czyli błędem średnim ME (ang. *Mean Error*) i błędem standardowym estymacji SSE (ang. *Standard Error of Estimate*) oraz współczynnikami determinacji i indeterminacji.

Błąd średni zdefiniowany jest zależnością:

$$ME = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (L_{pom,i} - L_{s,i}), \quad (2.1)$$

przy czym:

$L_{pom,i}$ – pomierzona wartość tłumienia propagacyjnego w i -tym łączy radiowym [dB],

$L_{s,i}$ – obliczona wartość tłumienia propagacyjnego w i -tym łączy radiowym [dB],

i - kolejny pomiar,

N – ilość pomiarów (liczebność próby).

Błąd średni służy do oceny stopnia rozproszenia wyników pomiarowych wokół wartości uzyskanych przy użyciu badanego modelu z uwzględnieniem kierunku odchylenia. Jeżeli jest

równy on zero to oznacza, że średnia wartość tłumienia propagacyjnego wynikająca z pomiarów jest równa średniej wartości tłumienia propagacyjnego obliczonego.

Błąd standardowy estymacji, nazywany często błędem średniokwadratowym, zdefiniowano jako:

$$SSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (L_{pom,i} - L_{s,i})^2}{N-1}}. \quad (2.2)$$

Tak zdefiniowany błąd standardowy estymacji oznacza odchylenie standardowe (*ang. standard deviation*). Jest on miarą jakości dopasowania badanego modelu do danych pomiarowych, określając rozrzut wartości pomierzonych wokół wartości teoretycznych. Im błąd ten jest mniejszy tym model jest lepiej dopasowany do danych pomiarowych. Trzeba zwrócić tutaj uwagę, że przy takim ujęciu nie jest brana liczba zmiennych niezależnych opisujących badany model.

Współczynnik indeterminacji jest określony zależnością:

$$\varphi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (L_{pom,i} - L_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^N (L_{pom,i} - L_{pom,śr})^2}, \quad (2.3)$$

w której $L_{pom,śr}$ oznacza wartość średnią pomierzonego tłumienia propagacyjnego.

Współczynnik indeterminacji informuje, jaka część zmienności cechy zależnej nie jest wyjaśniana wpływem cechy niezależnej, natomiast jest wywołana działaniem czynników przypadkowych. Może być on wyrażony w procentach, wówczas otrzymany wynik należy pomnożyć przez 100. Ujmując to w zakresie przedmiotu niniejszej rozprawy, współczynnik indeterminacji informuje jaka część zmienności pomierzonego tłumienia propagacyjnego nie jest wyjaśniana przez model opisujący to tłumienie.

Natomiast współczynnik determinacji może być przedstawiony w poniższej postaci:

$$R^2 = 1 - \varphi^2, \quad (2.4)$$

która pokazuje jaka część zmienności cechy zależnej jest wyjaśniana kształtowaniem cechy niezależnej. Współczynnik ten może być wyrażony w procentach, wówczas otrzymany wynik należy pomnożyć przez 100. W zakresie przedmiotu niniejszej rozprawy współczynnik

determinacji określa, jaka część zmienności pomierzonego tłumienia propagacyjnego jest wyjaśniana przez model opisujący to tłumienie. Im współczynnik determinacji jest bliższy jedności tym model lepiej przystaje do danych pomiarowych.

Znane są również inne miary dopasowania modeli do danych empirycznych, jednakże z punktu widzenia badanego zjawiska uznano, że wyżej zdefiniowane miary oceny wyczerpują w pełni zagadnienie oceny badanych modeli, co potwierdza się również w innych pracach np. [13, 40, 51].

2.3. Analiza regresji materiału pomiarowego

Celem analizy regresji materiału pomiarowego, dla potrzeb niniejszej rozprawy, jest określenie funkcji opisującej przyporządkowanie zmiennym niezależnym w postaci takich wielkości jak np. długość trasy propagacji, wysokości zawieszenia anten stacji bazowej i abonenckiej itp., wielkości zależnej jaką jest tłumienie trasy propagacji. Jest to zagadnienie wielowymiarowej analizy regresji [18, 72, 81].

Regresja oznacza sposób przyporządkowania zmiennych niezależnych wartościom zmiennej zależnej, a formalnym zapisem tego przyporządkowania jest funkcja regresji. Funkcja regresji umożliwia więc przewidywanie przeciętnego zachowania się badanej wielkości przy zadanych wielkościach zmiennych niezależnych. Nie pozwala jednak oszacować możliwej rozbieżności pomiędzy prognozą a rzeczywistą wartością wielkości mierzonej, jaką jest w tym przypadku tłumienie trasy propagacji. Do oceny związku pomiędzy wartością pomierzoną a modelowaną za pomocą funkcji regresji służy współczynnik korelacji pomiędzy tymi wielkościami. Związki pomiędzy zmiennymi mogą być liniowe lub krzywoliniowe. Najogólniej ujmując związek liniowy między zmiennymi występuje wówczas, gdy jednakowym zmianom jednej zmiennej towarzyszą zbliżone co do wielkości i kierunku zmiany drugiej zmiennej. Z kolei związek krzywoliniowy charakteryzuje się tym, że jednakowym zmianom jednej zmiennej towarzyszą różne co do siły lub kierunku zmiany drugiej zmiennej [2, 57]. Współczynnik korelacji dla związku liniowego przyjmuje wartości z przedziału $<-1,1>$ przy czym znak pokazuje kierunek związku a moduł informuje o jego sile. W przypadku współczynnika korelacji równego zero brak jest współzależności. Natomiast współczynnik korelacji dla związku nieliniowego, nosi nazwę indeksu korelacji i przyjmuje wartości $<0,1>$. Jest on obliczany jako pierwiastek kwadratowy ze współczynnika determinacji wyrażonego zależnością (2.4). Indeks korelacji określa zatem siłę związku nie informując przy tym o jego kierunku.

W ramach niniejszej rozprawy model regresji tłumienia propagacyjnego został wyznaczony na podstawie rzeczywistych pomiarów tłumienia propagacyjnego w radiowym systemie dostępowym w warunkach miejskich. Parametry modelu regresji były wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów, która zakłada, że suma kwadratów różnic pomiędzy wartościami zaobserwowanymi i wartościami oszacowanymi z modelu regresji jest najmniejsza, czyli suma kwadratów błędów SS_E :

$$SS_E = \sum_{i=1}^N (L_{pom,i} - L_{s,i})^2 = \text{minimum}. \quad (2.5)$$

Jako parametr oceny istotności regresji wykorzystano stosunek oszacowania wariancji modelu MS_M do zmienności reprezentowanej wariancją błędów MS_E . Wówczas statystyka testowa F Snecodera – Fishera przyjmuje postać:

$$F = \frac{MS_M}{MS_E}, \quad (2.6)$$

przy czym:

$$MS_M = \frac{\sum_{i=1}^N (L_{s,i} - L_{pom, \acute{s}r})^2}{p}, \quad (2.7)$$

oraz

$$MS_E = \frac{\sum_{i=1}^N (L_{pom,i} - L_{s,i})^2}{N - p - 1}. \quad (2.8)$$

Statystyka ta ma rozkład F-Snecodera o p oraz $(N-p-1)$ stopniach swobody odpowiednio dla licznika i mianownika (gdzie p – liczba zmiennych niezależnych modelu; N – liczebność próby) [16]. Im większa jest wartość statystyki testowej (co oznacza mniejszy odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa), tym istotność przyjętego modelu regresji jest wyższa. Regresja ma uzasadnienie jedynie wtedy, gdy jest ona istotna w powyżej podanym sensie.

Określając model regresji powstaje problem, który ze współczynników regresji ma statystycznie istotny wpływ, czyli istotnie różni się od zera, a który z tych współczynników można pominąć. Ocenę taką dokonano porównując wartość współczynnika regresji z

niedokładnością jego wyznaczania mierzona błędem standardowym. Dla każdego więc współczynnika regresji obliczano statystykę testową t o postaci:

$$t = \frac{b_i}{S_{b_i}}, \quad (2.9)$$

gdzie: b_i - i -ty współczynnik regresji wielowymiarowej,

S_{b_i} - błąd standardowy dla i -tego współczynnika regresji.

Ponieważ współczynniki b_i mają rozkład normalny, to powyższa statystyka pochodzi z rozkładu t-Studenta o $(N-p-1)$ stopniach swobody. Im większa jest wartość statystyki testowej, a więc mniejszy odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa, tym istotność analizowanego współczynnika regresji jest wyższa.

Przy dodawaniu zmiennych niezależnych do modelu wartość współczynnika determinacji rośnie. Takiej wady nie posiada tzw. skorygowany współczynnik determinacji, który definiuje się w następujący sposób

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{N-1}{N-p-1} \quad (2.10)$$

gdzie p reprezentuje liczbę zmiennych niezależnych, zaś R oznacza współczynnik korelacji

Współczynnik korelacji R , będący pierwiastkiem kwadratowym ze współczynnika determinacji jest miarą siły związku pomiędzy zmienną zależną a zmiennymi niezależnymi.

Wszystkie testy zostały wykonane przy założeniu **95%** poziomu ufności. Oznacza to, że stawiane hipotezy były weryfikowane na poziomie istotności **0,05**.

2.4. Uwzględnianie specyfiki środowiska propagacyjnego w mieście

Środowisko miejskie charakteryzuje się dużym urozmaiceniem zabudowy i infrastruktury, co implikuje konieczność uwzględnienia dodatkowych czynników związanych z miejscem lokalizacji stacji abonenckich [10, 11, 34, 45, 46, 61, 71]. Dlatego też uwzględniono specyfikę środowiska propagacyjnego poprzez określenie:

- spełnienia warunków LOS,
- typu obszaru lokalizacji anteny stacji abonenckiej.

W zakresie spełnienia warunków LOS wyróżniono:

1. **LOS** – gdy ekipa pomiarowa stwierdziła widoczność pomiędzy anteną stacji abonenckiej i anteną stacji bazowej,

2. **NLOS** – gdy ekipa pomiarowa stwierdziła brak widoczności pomiędzy anteną stacji abonenckiej i anteną stacji bazowej.

W zakresie typu obszaru lokalizacji stacji abonenckiej wyróżniono dwa typy obszarów, różniące się gęstością zabudowy budynków:

1. **obszar typu I** – śródmieścia miast, tzn. obszary miejskie o zwartej gęstej i zabudowie w postaci wysokich budynków, przylegających do siebie i do ulic, przy których są położone,
2. **obszar typu II** – tereny osiedlowe domów jednorodzinnych kilkukondygnacyjnych oraz bloków wielokondygnacyjnych. Są to obszary leżące poza centrami miast, o niezbyt gęstej zabudowie budynków, których zabudowa nie jest zwarta a budynki są oddalone od siebie o kilkadziesiąt metrów jeden od drugiego.

Określono dodatkowo stopień zadrzewienia tych terenów, uznając umiarkowaną jego intensywność, co jest oczywiste dla terenów miejskich.

ROZDZIAŁ 3

WYZNACZANIE TŁUMIENIA PROPAGACYJNEGO W WARUNKACH MIEJSKICH

Jak już wspomniano wcześniej, w praktyce do analizowania warunków propagacji w terenie zabudowanym, w tym także w warunkach wybitnie miejskich o gęstej zabudowie, istnieje wiele modeli służących do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w takich warunkach. Jednakże z punktu widzenia przedmiotu niniejszej rozprawy są to modele opracowane dla potrzeb radiokomunikacji ruchomej lądowej, a więc sytuacji kiedy to terminal znajduje się na poziomie ulicy. Odbiega to istotnie od sytuacji z jaką mamy do czynienia w systemach dostępowych. W rozdziale tym zostaną scharakteryzowane wszystkie reprezentatywne modele jako punkt wyjścia do wykonania badań oraz zostaną przedstawione wyniki analizy ich przydatności do projektowania radiowych systemów dostępowych.

3.1. Charakterystyka propagacyjna wolnej przestrzeni

Pojęcie wolnej przestrzeni (ang. *free space*) jest wyidealizowanym przypadkiem propagacji fal radiowych w ośrodku, całkowicie wolnym od jakichkolwiek przeszkód, mającym właściwości doskonałej próżni. Tłumienie propagacyjne w takim przypadku, czyli tłumienie wolnej przestrzeni dla pojedynczego łącza radiowego typu punkt – punkt (ang. *point to point*) określone jest zależnością (1.6), którą często przedstawia się w następującej postaci [31]:

$$L_{b,wp} = 32,4 + 20 \lg f_{[MHz]} + 20 \lg d_{[km]}, \quad (3.1)$$

przy czym:

$f_{[MHz]}$ oznacza częstotliwość w [MHz], a

$d_{[km]}$ odległość w [km].

W rzeczywistości spełnienie warunków wolnej przestrzeni jest trudne, a niekiedy wręcz niemożliwe. Dlatego też całkowite tłumienie trasy propagacyjnej L_{prop} oprócz omawianego tu tłumienia wolnej przestrzeni posiada dodatkowy składnik w postaci L_{dod} , wynikający z rzeczywistych warunków propagacji fali radiowej, odbiegających od idealnych. Można to wyrazić następującą zależnością:

$$L_{prop} = L_{b,wp} + L_{dod} \quad (3.2)$$

Tak więc, podczas prac projektowych zachodzi konieczność stosowania tzw. modeli propagacyjnych w celu określenia tłumienia ośrodka, w którym odbywa się propagacja fal radiowych.

3.2. Modelowanie tłumienia propagacyjnego w warunkach LOS

3.2.1. Model COST 231 Walfisha-Ikegami (LOS)

W ramach prac badawczych Grupy COST 231 (ang. *Cooperation for Scientific and Technical Research* nr 231) [12, 14, 29], zaproponowano model opracowany na podstawie wcześniejszych prac Walfisha i Bertoni [87] oraz Ikegami [23, 24, 25], pozwalający obliczać tłumienie trasy propagacji w warunkach LOS w mieście, jakie występują w tzw. kanionach ulic. Opisany jest on zależnością:

$$L_{COST\ W-I,LOS} = 42,6 + 26 \lg d[km] + 20 \lg f[MHz], \quad (3.3)$$

przy czym $d[km] \geq 0,02$ jest odległością między stacją nadawczą a odbiorczą, natomiast f jest częstotliwością sygnału radiowego. W tym przypadku założenie co do spełnienia warunków bezpośredniej widoczności obu stacji jest takie, że wysokość zawieszenia anteny stacji bazowej musi być większa od 30 metrów, by w ten sposób zapewnić niezajętość pierwszej strefy Fresnela.

Uwzględniając zależności (3.1) i (3.3) tłumienie to dla przypadku LOS można zapisać w postaci:

$$L_{COST\ W-I,LOS} = L_{b,wp} + 10,2 + 6 \lg d[km] = L_{b,wp} + 6 \lg(50d[km]), \quad (3.4)$$

3.2.2. Modele ITU-R P.1411

Kolejnymi modelami służącymi do obliczania tłumienia propagacyjnego w warunkach LOS są dwa modele przedstawione w dokumencie ITU-R P.1411 [29, 33, 67], które przewidziane są dla terenów zurbanizowanych w zakresie częstotliwości pracy łącza

radiowego 2-4 GHz (pasmo UHF). Pierwszy z nich określa dolną graniczną wartość tłumienia propagacyjnego $L_{LOS,L}$, drugi zaś górną graniczną wartość tłumienia propagacyjnego $L_{LOS,U}$. Odpowiednie wyrażenia podane są poniżej, tzn.:

$$L_{LOS,L} = L_{bp} + \begin{cases} 20 \lg \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{dla } d \leq R_{bp} \\ 40 \lg \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{dla } d > R_{bp} \end{cases}, \quad (3.5)$$

$$L_{LOS,U} = L_{bp} + 20 + \begin{cases} 25 \lg \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{dla } d \leq R_{bp} \\ 40 \lg \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{dla } d > R_{bp} \end{cases}, \quad (3.6)$$

przy czym:

d - długość łącza radiowego w [m],

λ - długość fali w [m],

h_b - wysokość wzniesienia anteny stacji bazowej w [m],

h_a - wysokość wzniesienia anteny stacji abonenckiej w [m].

Natomiast R_{bp} oraz L_{bp} opisane są następującymi zależnościami:

$$R_{bp} \approx \frac{4h_b h_a}{\lambda} [m], \quad (3.7)$$

$$L_{bp} = \left| 20 \lg \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_b h_a} \right) \right| [dB], \quad (3.8)$$

gdzie wyrażenie na L_{bp} określa wartość tłumienia propagacyjnego w punkcie R_{bp} .

W każdym z tych modeli, można wyróżnić dwa przypadki w zależności od długości trasy propagacji. W przypadku trasy dostatecznie krótkiej, gdy pierwsza strefa Fresnela jest nie zaburzona, straty rosną z kwadratem odległości. Odległość R_{bp} punktu, w którym wystąpi zaburzenie pierwszej strefy Fresnela, tzw. breakpoint, zależy od wysokości wzniesienia anteny stacji bazowej i stacji abonenckiej, oraz od długości fali. Począwszy od tego punktu tłumienie propagacyjne rośnie silniej, tzn. z czwartą potęgą odległości.

Zgodnie z zaleceniem ITU-R P.1411 modele te są przeznaczone do szacowania tłumienia propagacyjnego dla krótkich tras, nie przekraczających 1 km i zakresu częstotliwości 2 do 4 GHz, przy zachowaniu bezpośredniej linii widoczności pomiędzy antenami łącza radiowego, czyli w warunkach LOS jakie występują w tzw. kanionach ulic.

3.3. Modelowanie tłumienia propagacyjnego w warunkach NLOS

3.3.1. Model Okumury-Haty

Na początku lat 80-tych XX wieku Hata dopasował wzory empiryczne do wykresów sporządzonych przez Okumurę na terenie miasta Tokio i w jego okolicach [4, 63]. W ten sposób powstał tzw. klasyczny model propagacyjny Haty, z którego, pomimo pewnych ograniczeń, nadal korzystają projektanci sieci komórkowych. Opracowanie sporządzone przez Hatę, dotyczące statystycznego wpływu charakteru zabudowy miejskiej na warunki propagacyjne fal radiowych, rozróżnia trzy typy zabudowy [20, 21]: miejską, podmiejską i otwartą. Klasę zabudowy miejskiej podzielono dodatkowo na wielkomiejską oraz miast średnich i małych. Zasadnicze wyrażenie na tłumienie propagacyjne L_{OH} , przy użyciu klasycznego modelu Haty, nazywanego również modelem **Okumury-Haty**, w terenie miejskim podaje następująca zależność:

$$L_{OH,[dB]} = 69,55 + 26,16 \lg f - 13,82 \lg(h_b) - a(h_a) + (44,9 - 6,55 \lg(h_b)) \lg(d) \quad (3.9)$$

przy czym:

- f - częstotliwość w [MHz] (od 150 do 1500 MHz),
- h_b - wysokość zawieszenia anteny stacji nadawczej w [m] (od 30 do 200 m),
- d - długość łącza radiowego w [km] (od 1 do 20 km).

W zależności (3.9) $a(h_a)$ reprezentuje tzw. zysk wysokości wzniesienia anteny stacji abonenckiej (ruchovej). Zysk wysokości wzniesienia anteny stacji abonenckiej został zróżnicowany dla małych/średnich i dużych miast. Dla małego/średniego miasta został określony następującą zależnością

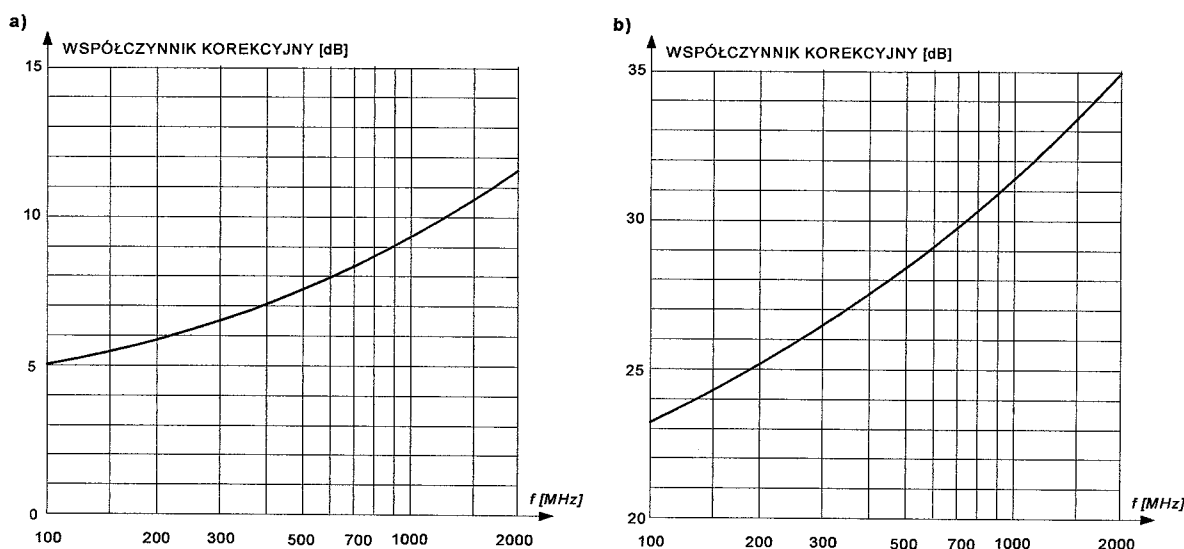
$$a(h_a) = (1,1 \lg f - 0,7) h_a - (1,56 \lg f - 0,8), \quad 1m \leq h_a \leq 10m. \quad (3.10)$$

Zaś dla dużego miasta zysk wysokości wzniesienia anteny stacji abonenckiej został zróżnicowany w zależności od częstotliwości

$$a(h_a) = 3,2 \cdot (\lg 11,75 h_b)^2 - 4,97 \quad dla \quad f \geq 400MHz \quad (3.11)$$

przy czym, praca systemu dostępowego dla częstotliwości poniżej 400 MHz nie jest przewidywana, zatem dla tych warunków zysk wysokości anteny stacji abonenckiej nie został przytoczony.

Poniżej przedstawiono współczynniki korekcyjne tłumienia propagacyjnego dla terenów podmiejskich i otwartych, w których warunki propagacji są korzystniejsze aniżeli w przeciętnym terenie miejskim (rys. 3.1), w którym tłumienie propagacyjne wyrażone jest zależnością (3.9).



Rys. 3.1. Tłumienie propagacyjne w terenie: a) podmiejskim i b) otwartym – odniesione do przeciętnego tłumienia w przeciętnym terenie miejskim.

Powyższe współczynniki korekcyjne tłumienia propagacyjnego dla terenów podmiejskich i otwartych można również przedstawić zależnościami analitycznymi. Uwzględniając je, tłumienie według modelu Haty dla terenu podmiejskiego można szacować na podstawie zależności:

$$L_{\text{teren podmiejski}}[dB] = L_{OH,}[dB] - 2(\lg(f[MHz]/28))^2 - 5,4 \quad (3.12)$$

dla terenu zaś otwartego

$$L_{\text{teren otwarty}}[dB] = L_{OH,}[dB] - 4,78(\lg f[MHz])^2 + 18,33 \lg f[MHz] - 40,94 \quad (3.13)$$

Powyższy model ma pewne ograniczenia, wynikające z minimalnej wysokości anteny stacji bazowej równej 30 m. Dla wysokości wzniesień anten stacji bazowych poniżej tej wysokości szacowanie tłumienia należy wykonywać za pomocą innego modelu np. wykorzystując zależności empiryczne podane przez Malaga [28, 59].

3.3.2. Model COST 231 Haty

W ramach wspomnianego już projektu badawczego COST 231, realizowanego w wielu ośrodkach badawczych na świecie, klasyczny model propagacyjny Haty przeznaczony do projektowania sieci komórkowych został rozszerzony dla zakresu częstotliwości od 1,5 do 2 GHz. Model ten nazywa się modelem **COST 231 Haty**. Pozwala on szacować tłumienie propagacyjne według poniższej zależności:

$$L_{C231H} [dB] = 46,33 + (44,9 - 6,55 \lg(h_b)) [\lg(d)]^\beta + 33,9 \lg(f) - a(h_a) - 13,82 \lg(h_b) + C \quad (3.14)$$

h_b [m] – wysokość zawieszenia anteny stacji bazowej,

d [km] - odległość pomiędzy antenami łącza radiowego,

f [MHz] - częstotliwość fali radiowej,

h_a [m] - wysokość zawieszenia anteny stacji abonenckiej,

C [dB] – parametr dodatkowy, który dla miast średniej wielkości i obszarów podmiejskich z umiarkowaną intensywnością zadrzewienia wynosi 0 dB, natomiast dla metropolii i centrów dużych miast równa się 3 dB,

β - parametr związany z rozszerzeniem zakresu możliwych odległości pomiędzy stacją bazową a ruchomą z 20km do 100 km, wyrażony jest poniższym wzorem:

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{dla } d \leq 20 \text{ km} \\ 1 + (0,14 + 0,000187f + 0,00107h_b) \left[\lg\left(\frac{d}{20}\right) \right]^{0,8} & \text{dla } 20 \text{ km} < d < 100 \text{ km}. \end{cases} \quad (3.15)$$

$a(h_a)$ – zysk wynikający z wysokości zawieszenia anteny stacji abonenckiej, który z kolei jest zdefiniowany poniższą zależnością

$$a(h_a) = (1,1 \lg f - 0,7)h_a - (1,56 \lg f - 0,8) \quad 1 \text{ m} \leq h_a \leq 10 \text{ m} \quad (3.16)$$

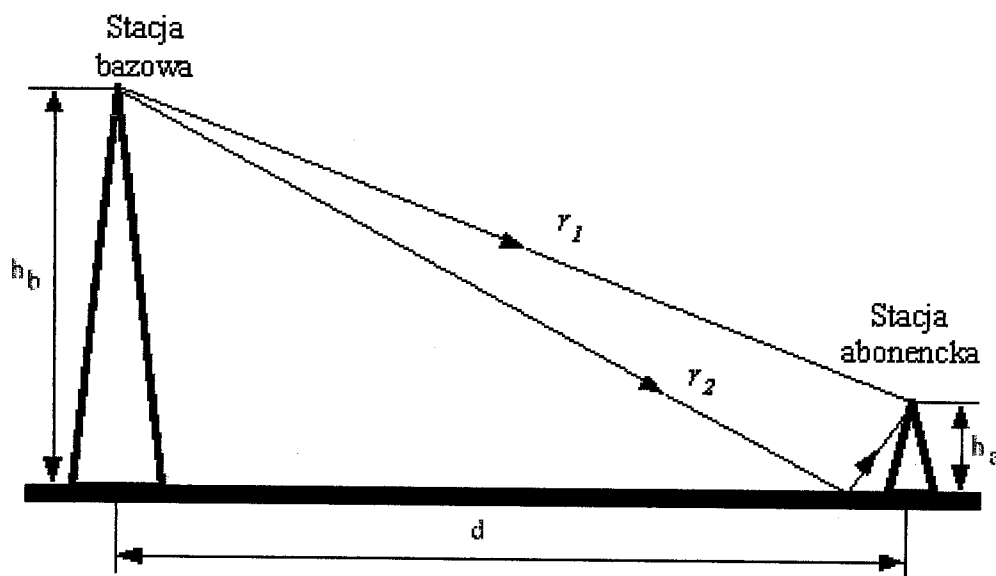
Podsumowując, model propagacyjny COST 231-Haty zaleca się stosować w następującym zakresie wartości parametrów technicznych łącza radiowego:

- odległość d od 1 km do 20 km,
- częstotliwość f od 1500 MHz do 2000 MHz,
- wysokość zawieszenia anteny stacji bazowej od 30 m do 200 m, określona względem średniego poziomu podłoża na dystansie od 3 km do 10 km,
- wysokość zawieszenia anteny odbiorczej od 1 m do 10 m nad ziemią w miejscu lokalizacji stacji użytkownika.

Pomimo tego, że zaleca się stosowanie tego modelu dla wysokości zawieszenia anten stacji bazowych większych od 30 metrów, to jednak można stosować ten model również dla mniejszych wysokości stacji bazowych, pod warunkiem, że średnia wysokość dachów budynków otaczających stację bazową jest dużo mniejsza od wysokości zawieszenia anteny stacji bazowej. Model ten nie nadaje się do szacowania tłumienia propagacyjnego w kanionach ulic miast o gęstej zabudowie. Stosując ten model zadawalające wyniki można uzyskać przy odległościach pomiędzy stacją bazową a stacją abonencką mniejszych od 1 km. Jednakże w tym przypadku należy wziąć pod uwagę charakter zabudowy w bezpośrednim otoczeniu stacji bazowej.

3.3.3. Model Egli

Przed przystąpieniem do opisanego kolejnego sposobu wyznaczania tłumienia propagacyjnego - tzw. modelu **Egli**, w pierwszej kolejności zostanie scharakteryzowany przypadek propagacji dwudrogowej, a więc gdy do anteny stacji abonenckiej docierają dwa promienie fali radiowej: bezpośredni r_1 oraz odbity od doskonale przewodzącej powierzchni r_2 . Ilustracja tego zagadnienia została przedstawiona na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Ilustracja modelu dwudrogowego.

Prawdopodobieństwo wystąpienia takiego przypadku w systemach dostępowych jest duże, bez względu na rodzaj środowiska propagacyjnego. Dokonując pewnych założeń upraszczających, m.in. przyjmując, że wysokości stacji bazowej h_b oraz stacji abonenckiej h_a

są dużo mniejsze od odległości d między nimi, tłumienie fali radiowej w modelu dwudrogowym L można przedstawić w postaci [79]

$$L = 40 \lg d - 20 \lg h_b - 20 \lg h_a \quad (3.17)$$

przy czym, tłumienie propagacyjne L wyrażone jest w [dB], z kolei h_b , h_a i d podstawiamy do wzoru w tych samych jednostkach. Z powyższej zależności widać, że tłumienie propagacyjne szybciej wzrasta wraz z odległością niż to ma miejsce w przypadku wolnej przestrzeni. Dwukrotne zwiększenie odległości pomiędzy stacjami pociąga za sobą wzrost tłumienia o 12dB. Wielkość tego tłumienia nie zależy natomiast od częstotliwości fali nośnej, a jedynie od wysokości zawieszenia anten poszczególnych stacji: bazowej i abonenckiej [4].

Na podstawie dużej liczby pomiarów wykonanych w miastach amerykańskich Egli zaproponował modyfikację modelu propagacji dwudrogowej. Natomiast Delisle w oparciu o rezultaty uzyskane w wyniku prac Egli wykonał aproksymację modelu, łatwiejszą obliczeniowo, wyrażoną następującą zależnością [79]:

$$L_e [dB] = 40 \lg d [km] + 20 \lg f [MHz] - 20 \lg h_b [m] + L_m, \quad (3.18)$$

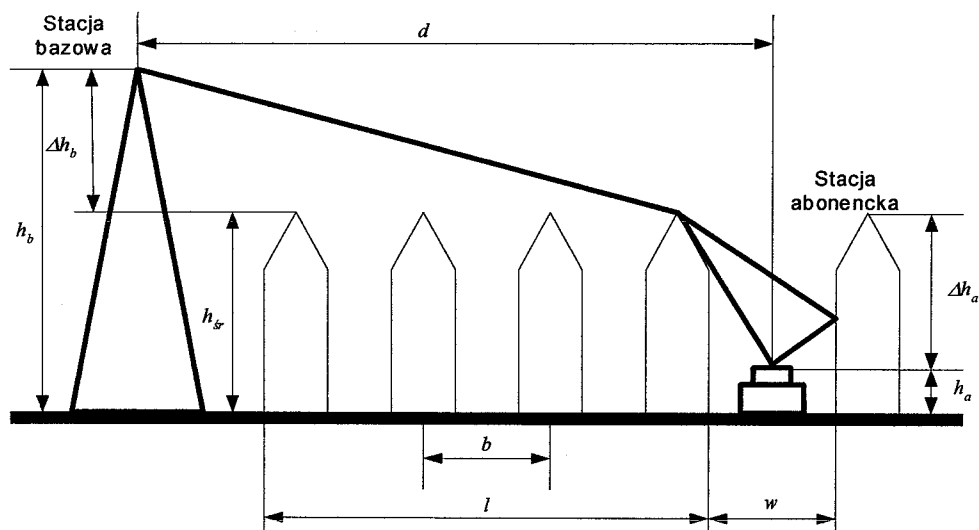
$$\text{gdzie: } L_m = \begin{cases} 76,3 - 10 \lg h_a, & \text{dla } h_a < 10m, \\ 76,3 - 20 \lg h_a, & \text{dla } h_a \geq 10m, \end{cases}$$

h_a – wysokość wzniesienia anteny stacji abonenckiej.

W przeciwieństwie do podstawowej formy modelu propagacji dwudrogowej, Model ten zależy od częstotliwości fali nośnej co jest bardziej reprezentatywne dla rzeczywistych warunków propagacyjnych. Dla bardzo dużych wysokości zawieszenia anten obu stacji, tłumienie propagacyjne wyrażone przez ten model może być niższe od tłumienia propagacyjnego w wolnej przestrzeni. W tym przypadku należy określić tłumienie w oparciu o model wolnej przestrzeni za pomocą zależności (3.1).

3.3.4. Model COST 231 Walfisha-Ikegami (NLOS)

Modelem przedstawionym w raporcie Grupy COST 231 oraz opublikowanym również w dokumencie ITU [29] jest model COST 231 Walfisha-Ikegami przeznaczony do szacowania tłumienia propagacyjnego w warunkach NLOS [8]. Zaprezentowano tutaj odmienny sposób postępowania. Typowa sytuacja występująca w czasie propagacji fali radiowej została pokazana na rys. 3.3 [49, 67], gdzie określone są również parametry wykorzystywane do obliczeń tłumienia propagacyjnego.



Rys. 3.3. Ilustracja modelu propagacyjnego COST 231 Walfischa-Ikegami (NLOS).

W opisie modelu COST 231 Walfischa-Ikegami (NLOS) stosuje się następujące parametry:

h_s [m] - średnia wysokość budynków,

w [m] - szerokość ulicy, na której znajduje się stacja abonencka,

b [m] - średni odstęp pomiędzy budynkami,

h_b [m] - wysokość zawieszenia anteny stacji bazowej,

h_a [m] - wysokość zawieszenia anteny stacji abonenckiej,

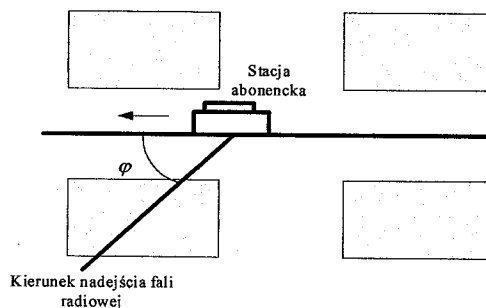
Δh_b [m] = $h_b - h_s$ - wysokość zawieszenia anteny stacji bazowej względem średniego poziomu dachów otaczających budynków,

Δh_a [m] = $h_s - h_a$ - wysokość położenia anteny stacji abonenckiej względem średniego poziomu dachów otaczających budynków,

l [m] - długość drogi propagacji fali radiowej nad budynkami,

d [m] - długość trasy propagacji,

φ [°] - kąt nadejścia fali radiowej do stacji abonenckiej zgodnie z rys. 3.4



Rys. 3.4. Ilustracja kąta nadejścia fali radiowej φ .

Opisywany model zaleca się stosować dla następującego zakresu parametrów technicznych łącza radiowego:

- h_b - od 4 m do 50 m,
- h_a - od 1 m do 3 m,
- f - od 800 MHz do 2000 MHz,
- d - od 20 m do 5 km.

W opisanym modelu założono, że budynki mają wysokości zbliżone do jednego poziomu.

Tłumienie propagacyjne, opisywane w tym modelu, wyraża się następująco

$$L_{WI,NLOS} = \begin{cases} L_{b,wp} + L_{rts} + L_{msd} & \text{dla } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{b,wp} & \text{dla } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases}, \quad (3.19)$$

przy czym :

$L_{b,wp}$ - tłumienie w wolnej przestrzeni,

L_{rts} - tłumienie występujące w trakcie dyfrakcji fali radiowej na krawędzi dachu budynku; (ang. *roof-top-to street diffraction and scatter loss*),

L_{msd} - tłumienie związane z ugięciami fali radiowej przy przejściu nad rzędem wielu budynków; (ang. *multi-screen loss*).

Jak wiadomo wartość tłumienia występująca w wolnej przestrzeni opisana jest zależnością (3.1), natomiast tłumienie L_{rts} występujące przy ugięciu fali na ostatniej krawędzi dachu, gdy fala radiowa kieruje się do odbiornika znajdującego się na ulicy opisane, jest wyrażeniem:

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \lg w + 10 \lg f + 20 \lg \Delta h_a + L_{ori}, \quad (3.20)$$

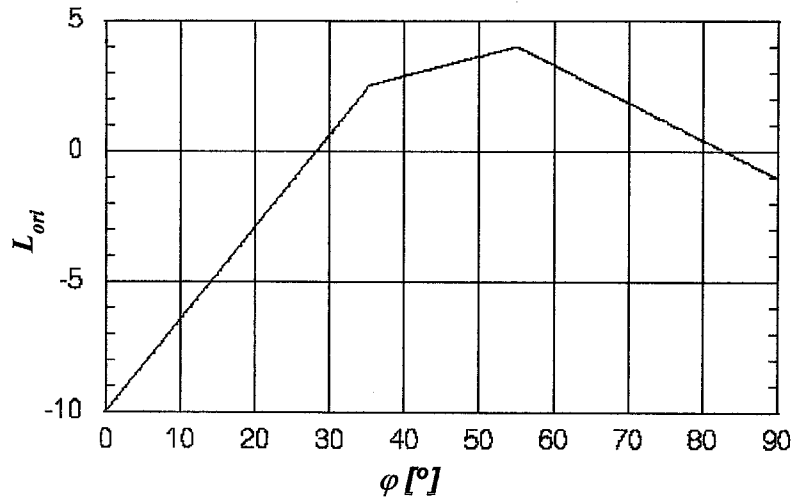
gdzie:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & \text{dla } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & \text{dla } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ, \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55) & \text{dla } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases}, \quad (3.21)$$

oraz

$$\Delta h_a = h_s - h_a, \quad (3.22)$$

przy czym L_{ori} jest parametrem korekcyjnym związanym z orientacją ulicy, na której znajduje się stacja odbiorcza względem kierunku nadejścia fali radiowej. Zmienność tego parametru w funkcji kąta φ przedstawiono na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Wykres tłumienia związanego z orientacją ulicy względem kierunku nadejścia fali radiowej, w zależności od kąta padania fali radiowej.

Z kolei dyfrakcja nad rzędem wielu budynków zależy od wysokości zawieszenia anteny stacji bazowej odniesionej do wysokości tych budynków. Aby wyznaczyć wartość tłumienia L_{msd} rozróżnia się dwa przypadki w zależności od wartości parametru d_s opisanego zależnością:

$$d_s = \frac{\lambda d^2}{\Delta h_b^2}, \quad (3.23)$$

gdzie:

$$\Delta h_b = h_b - h_s. \quad (3.24)$$

W przypadku pierwszym dla $l \geq d_s$, tłumienie L_{msd} określa wyrażenie:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \lg(d/1000) + k_f \lg f - 9 \lg b, \quad (3.25)$$

gdzie:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \lg(1 + \Delta h_b) & \text{dla } h_b > h_s \\ 0 & \text{dla } h_b \leq h_s \end{cases}. \quad (3.26)$$

Występujące we wzorze (3.25) parametry k_a , k_d oraz k_f zostały zdefiniowane w następujący sposób:

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{dla } h_b > h_s \\ 54 - 0,8 \Delta h_b & \text{dla } h_b \leq h_s \text{ i } d \geq 500m, \\ 54 - 1,6 \Delta h_b d / 1000 & \text{dla } h_b \leq h_s \text{ i } d < 500m \end{cases}. \quad (3.27)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{dla } h_b > h_s \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_s} & \text{dla } h_b \leq h_s \end{cases}, \quad (3.28)$$

$$k_f = \begin{cases} 0,7(f[\text{MHz}]/925-1), & \text{dla } \textit{średnich miast i terenów podmiejskich} \\ 1,5(f[\text{MHz}]/925-1), & \text{dla } \textit{centrów dużych miast} \end{cases}. \quad (3.29)$$

Parametr k_f przyjmuje postać opisaną zależnością (3.29) dla obszarów podmiejskich z umiarkowaną gęstością zalesienia. Natomiast parametr k_a wyznacza tłumienie równe 54 dB w momencie, gdy stacja bazowa znajduje się nad dachami budynków ($\Delta h_b > 0$), natomiast w innym przypadku parametr k_a jest większy od tej wartości, w zależności od różnicy poziomów h_b i h_s , szczególnie przy odległościach stacji bazowej do stacji końcowej większych niż 500 metrów.

Natomiast w drugim przypadku dla $l < ds$ tłumienie L_{msd} wyraża się w sposób poniższy:

$$L_{msd} = -10 \lg(Q_M^2), \quad (3.30)$$

gdzie:

$$Q_M = \begin{cases} 2,35 \left(\frac{\Delta h_b}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0,9} & \text{dla } h_b > h_s \\ \frac{b}{d} & \text{dla } h_b \approx h_s \\ \frac{b}{2\pi d} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)} & \text{dla } h_b < h_s \end{cases}, \quad (3.31)$$

oraz

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta h_b}{b}\right), \quad (3.32)$$

$$\rho = \sqrt{\Delta h_b^2 + b^2}. \quad (3.33)$$

Można zauważyć, że tłumienie fali radiowej, przy jej przejściu nad rzędem wielu budynków maleje wraz ze wzrostem odległości b pomiędzy budynkami.

Opisany powyżej model zaleca się stosować w następującym zakresie parametrów technicznych łącza radiowego:

- h_b - wysokość wzniesienia anteny stacji bazowej od 4 m do 50 m,
- h_a - wysokość wzniesienia anteny stacji abonenckiej od 1 m do 3 m,

- f - częstotliwość pracy łącza radiowego od 800 MHz do 2000 MHz,
- d - długość łącza radiowego od 20 m do 5 km.

3.4. Analiza przydatności projektowej modeli propagacyjnych

Analiza przydatności projektowej opisanych modeli propagacyjnych została wykonana poprzez ocenę dopasowania modeli do danych pomiarowych. Miarami tej oceny jest błąd średni określony zależnością (2.1) oraz błąd standardowy estymacji określony zależnością (2.2).

Wyniki analizy przydatności projektowej badanych modeli propagacyjnych dla warunków LOS oraz NLOS z uwzględnieniem wpływu zabudowy przedstawiono w poniższych podrozdziałach.

3.4.1. Wolna przestrzeń

Analizę przydatności projektowej modelu wolnej przestrzeni przeprowadzono w oparciu o zależność (3.1). Model ten można stosować w pełnym zakresie odległości d i częstotliwości f . Zwrócić należy jednak uwagę, że pierwsza strefa Fresnela powinna być całkowicie wolna od przeszkód, czyli powinna być niezaburzona. Analizę tą wykonano dla danych pomiarowych pochodzących ze wszystkich stacji bazowych, zebranych we wszystkich miastach, czyli Krakowie, Gdańsku, Poznaniu i Gdyni.

W pierwszej kolejności wykonano analizę przydatności modelu wolnej przestrzeni dla sytuacji pomiarowych spełniających warunek LOS, czyli najbardziej zbliżonych do warunków propagacyjnych w tzw. wolnej przestrzeni. Poniżej w tab. 3.1 zestawiono wspomniane wcześniej miary dopasowania modelu wolnej przestrzeni do warunków LOS występujących w radiowym systemie dostępowym.

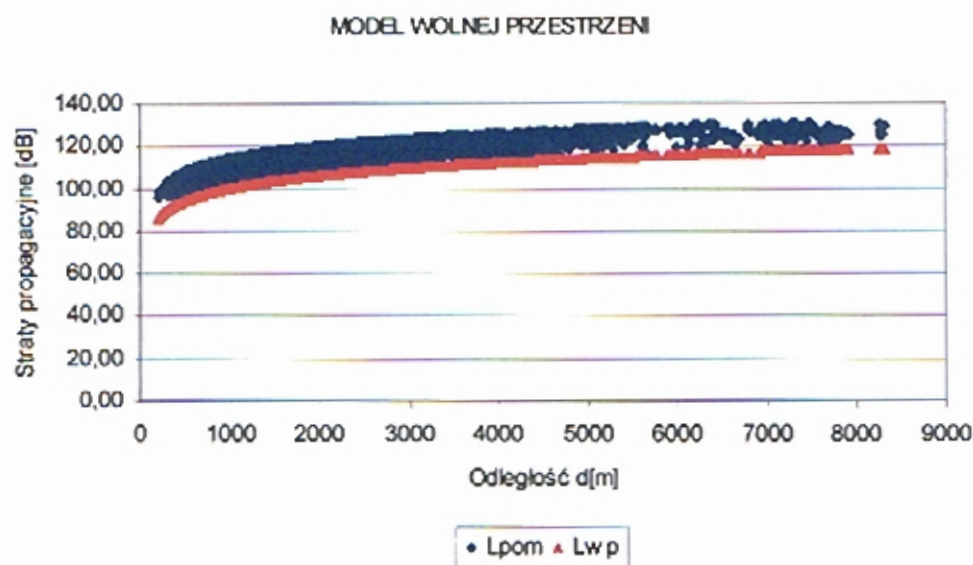
Tab. 3.1. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu wolnej przestrzeni zastosowanego dla warunków pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, w sytuacjach LOS.

LOS	Model wolnej przestrzeni - zależność (3.1)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	9,135	9,752	8556

Jak widać, model wolnej przestrzeni nie przystaje do danych pomiarowych tłumienia propagacyjnego w warunkach LOS pomimo, że sytuacja ta jest najbardziej zbliżona do warunków wolnej przestrzeni. Błąd średni wynosi w tym przypadku 9,135 dB, a więc średnio

o tą wartość model ten niedoszacowuje tłumienie propagacyjnego. Błąd standardowy estymacji wynosi 9,752 dB, co świadczy o złym dopasowaniu modelu do wyników pomiarowych.

Przystawalność analizowanego modelu do danych pomiarowych można przedstawić także w postaci wykresu wartości tłumienia propagacyjnego obliczonych i pomierzonych, w zależności od długości tras propagacji. Zostało to przedstawione na rys. 3.6.



Rys. 3.6. . Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla modelu wolnej przestrzeni i sytuacji pomiarowych LOS.

Oznaczenia: *Lpom* – wartości pomierzone, *Lwp* – wartości obliczone wg zależności (3.1).

Z powyższego rysunku także widać opisane niedoszacowanie tłumienia propagacyjnego.

Dodatkowych informacji na temat przydatności projektowej analizowanego modelu dostarcza rozkład błędów z uwzględnieniem podziału na poszczególne stacje bazowe. W tab. 3.2 przedstawiono wyniki błędu: średniego i standardowego estymacji dla poszczególnych stacji bazowych.

Analizując wyniki błędów daje się zauważyć znaczne zróżnicowanie ich wartości w zależności od stacji bazowej. Błąd średni waha się od 5,688 dB dla stacji GDY01 do 10,934 dB dla stacji KRA03. Podobny trend występuje dla błędów standardowych estymacji.

W tab 3.3 przedstawiono ocenę przydatności modelu wolnej przestrzeni, uwzględniając typ obszaru na jakim zlokalizowane były stacje abonenckie. Podobnie jak poprzednio, miarą porównawczą jest błąd średni oraz standardowy estymacji.

Tab. 3.2. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu wolnej przestrzeni zastosowanego dla warunków pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, w sytuacjach LOS z podziałem na stacje bazowe.

LOS	Stacja bazowa	Model wolnej przestrzeni zależność (3.1)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SSE [dB]	
	GDA01	8,788	9,217	2068
	GDY01	5,688	6,553	265
	GDY02	7,187	8,025	466
	GDY03	8,442	8,923	499
	KRA01	10,990	11,293	1392
	KRA02	10,338	10,732	961
	KRA03	10,934	11,256	716
	POZ01	8,219	9,049	1358
	POZ02	8,055	9,011	831

Tab. 3.3. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu wolnej przestrzeni zastosowanego dla warunków pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, w sytuacjach LOS z podziałem na typ obszaru.

LOS	Typ obszaru	Model wolnej przestrzeni zależność (3.1)		
		ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	Typ I	9,185	9,830	4709
	Typ II	9,074	9,657	3847

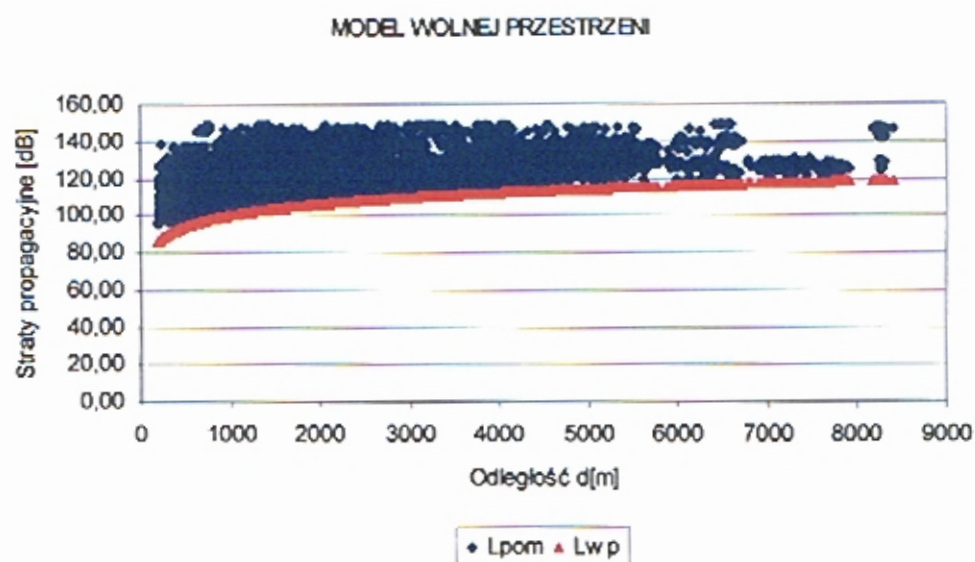
Z powyższego można zaobserwować (tab. 3.3), że w przypadku modelu wolnej przestrzeni zastosowanego w warunkach LOS, typ obszaru, na którym została zlokalizowana stacja abonencka, ma niewielki wpływ na wartości rozpatrywanych błędów. Tak więc, można stwierdzić, że głównym czynnikiem determinującym w przypadku modelu wolnej przestrzeni jest spełnienie warunku LOS, a nie typ obszaru, na którym zlokalizowana jest stacja abonencka.

Zatem jeszcze mniejszej przydatności projektowej modelu wolnej przestrzeni można się spodziewać dla wszystkich danych pomiarowych, a więc danych spełniających zarówno warunek LOS jak i NLOS. Poniżej w tab. 3.4. zestawiono miary oceny przydatności modelu wolnej przestrzeni dla wszystkich danych pomiarowych. Tak, jak można było się spodziewać dla powyższego przypadku błąd średni i błąd standardowy estymacji wzrósł odpowiednio o ok. 7 dB i prawie o 9 dB. Zatem dla wszystkich danych pomiarowych model wolnej przestrzeni wykazuje jeszcze mniejszą przydatność projektową.

Tab. 3.4. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu wolnej przestrzeni zastosowanego dla warunków pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, dla wszystkich danych pomiarowych.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Model wolnej przestrzeni zależność (3.1)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	16,330	18,424	18924

Graficzna ilustracja rozrzutu tłumienia propagacyjnego dla wszystkich danych pomiarowych została przedstawiona na rys. 3.7.



Rys. 3.7. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla modelu wolnej przestrzeni, dla wszystkich danych pomiarowych.

Oznaczenia: Lpom – wartości pomierzone, Lwp – wartości obliczone wg zależności (3.1).

W tab. 3.5 przedstawiono wyniki oceny modelu dla wszystkich danych pomiarowych, uwzględniając typ obszaru na jakim zlokalizowane były poszczególne stacje abonenckie.

Tab. 3.5. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu wolnej przestrzeni zastosowanego dla warunków pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, dla wszystkich danych pomiarowych z podziałem na typ obszaru.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Typ obszaru	Model wolnej przestrzeni zależność (3.1)		
		ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	Typ I	17,078	19,017	11804
Typ II	15,086	17,394	7120	

Uwzględnienie typu obszaru, na którym zlokalizowane były stacje abonenckie, wprowadza niewielkie zróżnicowanie jakości otrzymanych wyników w porównaniu z poprzednią analizą. Dla obszarów typu II model wykazuje większą przydatność projektową aniżeli dla obszarów typu I.

Dodatkowo, szczegółowe wyniki analizy przydatności projektowej modelu wolnej przestrzeni zostały zebrane w Załączniku nr 1. Analiza tych wyników potwierdza małą przydatność analizowanego modelu wolnej przestrzeni dla potrzeb projektowych radiowych systemów dostępowych. Model wolnej przestrzeni wykazuje najmniejszą przydatność projektową w warunkach NLOS, czyli gdy nie jest zachowana linia bezpośredniej widoczności pomiędzy antenami łącza radiowego. Błąd średni w tym przypadku wynosi 22,239 dB, zaś błąd standardowy estymacji wynosi 23,241 dB. Natomiast nie stwierdza się w warunkach NLOS wpływu typu obszaru, na którym zlokalizowana jest stacja abonencka.

Podsumowując, model wolnej przestrzeni odnosi się do sytuacji idealnego ośrodka propagacji fali radiowej. Należało się więc spodziewać, że dla rzeczywistego środowiska propagacyjnego przydatność modelu wolnej przestrzeni opisanego zależnością (3.1) jest mała. Sytuacja zbliżona do warunków idealnych, w których spełniony jest warunek LOS, daje znacząco mniejsze błędy wyznaczania tłumienia propagacyjnego, aniżeli gdy pod uwagę weźmie się wszystkie dane pomiarowe, zarówno spełniające warunek LOS jak i NLOS. Zatem spełnienie warunku LOS jest głównym i zarazem najistotniejszym czynnikiem wpływającym na wartość tłumienia propagacyjnego. Gęstość zabudowy obszaru (typ obszaru), na którym znajduje się stacja abonencka nie wpływa w tym przypadku w sposób istotny na jakość szacowania tłumienia propagacyjnego.

3.4.2. Warunki LOS

Jak to już napisano tłumienie propagacyjne w warunkach LOS można wyznaczać na podstawie znanych i szeroko stosowanych modeli propagacyjnych:

- modelu COST 231 Walfisha-Ikegami, dla warunków LOS jakie występują w tzw. kanionach ulic, zależność (3.3), oraz
- modeli opisanych w zaleceniu ITU-R P.1411, zależności (3.5) i (3.6).

W niniejszym podrozdziale przeanalizowano przydatność projektową powyższych modeli w sytuacjach LOS oraz dla wszystkich sytuacji pomiarowych.

3.4.2.1. Model COST 231 Walfisha-Ikegamię (LOS)

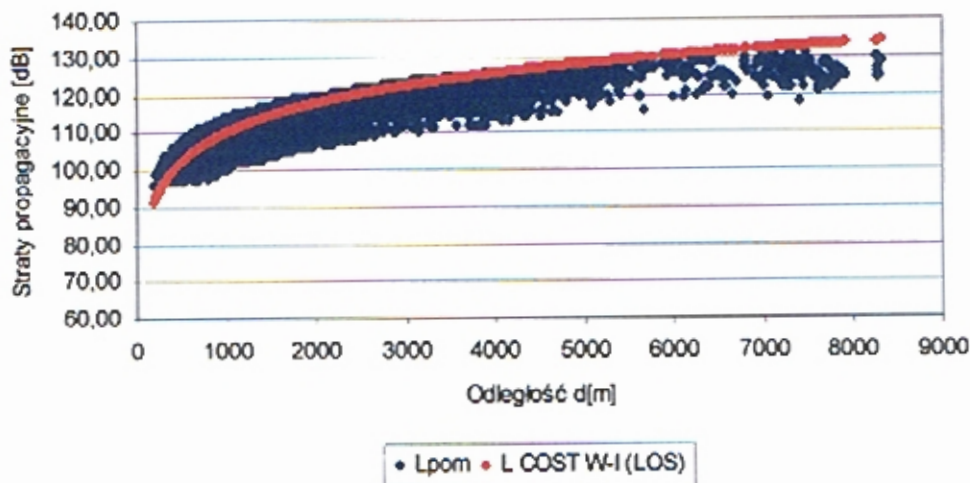
Przystępując do analizy przydatności projektowej pierwszego z wyżej wymienionych modeli najpierw zostanie wykonana analiza jego przydatności dla warunków LOS, które najczęściej występują w rzeczywistych warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście. Zaznaczyć należy, że model ten jest przewidziany do szacowania tłumienia propagacyjnego w systemach radiokomunikacji ruchomej lądowej w warunkach LOS jakie występują w tzw. kanionach ulic. Poniżej w tab. 3.6 zestawiono wartości błędów obliczane wg zależności (2.1) oraz (2.2), dla oceny przydatności modelu COST 231 Walfisha-Ikegamię w warunkach LOS.

Tab. 3.6. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu COST 231 Walfisha-Ikegamię (LOS) zastosowanego dla warunków pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, w sytuacjach LOS.

LOS	Model Walfisha-Ikegamię (LOS), zależność (3.3)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	-2,854	4,704	8556

Jak widać, uzyskane wyniki błędów wskazują na znacznie lepszą przydatność projektową modelu COST 231 Walfisha – Ikegamię (LOS) w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, aniżeli wcześniej analizowanego modelu wolnej przestrzeni. Błąd średni w tym przypadku znacznie się zmniejszył i wynosi $-2,854$ dB. Także zmniejszeniu uległ błąd standardowy estymacji SEE. Wynosi on $4,704$ dB. Można zauważyć, że model ten daje zawyżone wartości tłumienia propagacyjnego w warunkach pracy systemu dostępowego w mieście. Wskazuje to, że tłumienie w warunkach LOS jest większe w tzw. kanionach ulic w porównaniu z warunkami LOS jakie występują w systemach dostępowych. Poniżej na rys. 3.8 zobrazowano wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji dla wartości pomierzonych i obliczonych przy użyciu modelu COST 231 Walfisha-Ikegamię (LOS). Analizując rys. 3.8 zauważa się, że model ten przeszacowuje tłumienie propagacyjne w stosunku do wartości pomierzonych w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście. Wartości tłumienia propagacyjnego obliczone za pomocą tego modelu są tym większe, w stosunku do wartości obliczonych, im dłuższa jest trasa propagacji. Przydatność modelu jest więc znacznie większa przy krótszych trasach propagacji.

MODEL COST 231 WALFISHA - IKEGANIEGO



Rys. 3.8. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla modelu COST 231 Walfisha-Ikeganiego (LOS), dla sytuacji LOS.

Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone, $L_{COST\ W-I(LOS)}$ – wartości obliczone przy użyciu zależności (3.3).

Wartości obliczonych błędów zestawiono w tab. 3.7, uwzględniając ich podział dla stacji bazowych.

Tab. 3.7. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla modelu COST 231 Walfisha-Ikeganiego (LOS) zastosowanego dla warunków pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, w sytuacjach LOS z podziałem na stacje bazowe.

	Stacja bazowa	Model COST 231 Walfisha-Ikeganiego (LOS) zależność (3.3)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	
LOS	GDA01	-4,252	5,186	2068
	GDY01	-4,893	5,964	265
	GDY02	-1,960	4,636	466
	GDY03	-6,432	7,005	499
	KRA01	-1,856	3,475	1392
	KRA02	-1,509	3,779	961
	KRA03	-0,499	2,891	716
	POZ01	-2,574	4,808	1358
	POZ02	-2,792	5,159	831

W tym przypadku błąd średni waha się od wartości $-6,432$ dB dla stacji bazowej GDY03 do $-0,499$ dB dla stacji bazowej KRA03. Natomiast skrajne wartości błędu standardowego estymacji wynoszą $7,005$ dB oraz $2,891$ dB, odpowiednio dla stacji GDY03 oraz KRA03.

Natomiast w tab. 3.8 zebrano wartości obliczonych błędów dla analizowanego modelu COST 231 Walfisha-Ikegamię (LOS), uwzględniając wpływ obszaru, na którym zlokalizowane były stacje abonenckie.

Tab. 3.8. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu COST 231 Walfisha-Ikegamię (LOS) zastosowanego dla warunków pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, w sytuacjach LOS z podziałem na typ obszaru.

LOS	Typ obszaru	Model COST 231 Walfisha-Ikegamię (LOS) zależność (3.3)		
		ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	Typ I	-2,409	4,480	4709
	Typ II	-3,399	4,967	3847

W tym przypadku obserwuje się, że miejsce lokalizacji stacji abonenckiej, przy spełnieniu warunków LOS, ma niewielki wpływ na wielkość błędów szacowania tłumienia propagacyjnego. Model COST 231 Walfisha – Ikegamię (LOS) z większą dokładnością szacuje tłumienie propagacyjne na obszarach o gęstszej zabudowie typu I w porównaniu z obszarami o niezbyt gęstej zabudowie, czyli obszarze typu II.

Z kolei w tab. 3.9 zestawiono wartości błędów dla wszystkich pomiarów, czyli spełniających warunek LOS oraz NLOS.

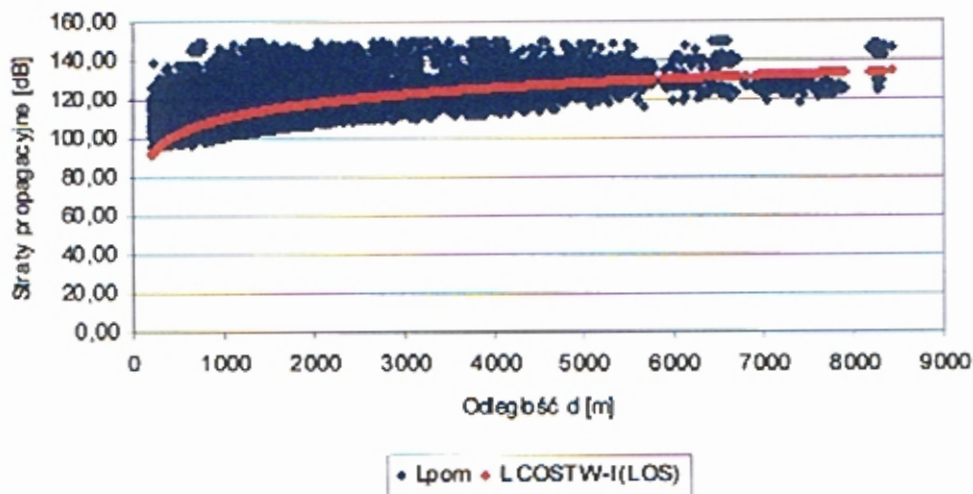
Tab. 3.9. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu COST 231 Walfisha-Ikegamię (LOS) zastosowanego dla warunków pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, dla wszystkich danych pomiarowych.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Model COST 231 Walfisha – Ikegamię (LOS) zależność (3.3)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	4,499	9,990	18924

Dla wszystkich danych pomiarowych model COST 231 Walfisha – Ikegamię (LOS) niedoszacowuje tłumienie propagacyjne średnio o 4,499 dB. Model ten nie nadaje się do szacowania tłumienia propagacyjnego w takich warunkach. Niemniej jednak charakteryzuje się prawie o 12 dB mniejszym błędem średnim aniżeli model wolnej przestrzeni w tych samych warunkach. Błąd standardowy estymacji w tym przypadku wynosi 9,99 dB i jest o prawie 9 dB mniejszy niż dla modelu wolnej przestrzeni.

Tłumienie propagacyjne w zależności od długości tras propagacji obliczone w oparciu o wyrażenie (3.3) oraz pomierzone w warunkach pracy systemu dostępowego przedstawiono graficznie na rys. 3.9.

MODEL COST 231 WALFISHA-IKEGAMIEGO



Rys. 3.9. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla modelu COST 231 Walfisha-Ikegami (LOS), dla wszystkich danych pomiarowych.

Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; $L_{COST\ W-I\ (LOS)}$ – wartości obliczone przy użyciu zależności (3.3).

Na podstawie analizy wartości błędów zamieszczonych w Załączniku nr 1 można stwierdzić, że model ten wykazuje najmniejszą przydatność projektową w warunkach NLOS, a w szczególności gdy stacje abonenckie znajdują się na obszarach typu II.

Podsumowując model COST 231 Walfisha – Ikegami (LOS) w warunkach rzeczywistego środowiska propagacyjnego wykazuje większą przydatność projektową aniżeli model wolnej przestrzeni [42]. Zaznaczyć należy, że model ten został zweryfikowany pomiarowo w Sztokholmie [12]. Niemniej przy spełnieniu warunku LOS model ten przeszacowuje średnio wartości tłumienia propagacyjnego o prawie 3dB. Znajduje to swoje uzasadnienie w fakcie, że model ten został opracowany dla potrzeb projektowania sieci komórkowych, a więc dla stacji przenośnych i przewoźnych, przemieszczających się w tzw. kanionach ulic.

3.4.2.2. Modele ITU-R P.1411

Kolejne dwa modele, dla których zostanie przeprowadzona analiza przydatności projektowej, pochodzą z zalecenia ITU-R P.1411 i są opisane zależnościami (3.5) i (3.6).

Pierwszy z nich, jak to już napisano służy do wyznaczania dolnej granicznej wartości tłumienia propagacyjnego $L_{LOS,L}$, drugi zaś służy do wyznaczania górnej granicznej wartości $L_{LOS,U}$ tego tłumienia. Należy w tym miejscu podkreślić, że w warunkach w jakich

dokonywano pomiarów tłumienia propagacyjnego nie stwierdzono przypadków, dla których byłby spełniony warunek $d > R_{bp}$, tzn. analiza przydatności projektowej tych modeli dotyczy przypadku niezaburzenia pierwszej strefy Fresnela - $d \leq R_{bp}$.

Poniżej w tab. 3.10 zestawiono wartości błędów obliczane wg zależności (2.1) oraz (2.2), dla oceny przydatności modeli ITU-R P.1411 w warunkach LOS.

Tab. 3.10. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla modeli ITU-R P.1411 (LOS) zastosowanych dla warunków pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, w sytuacjach LOS.

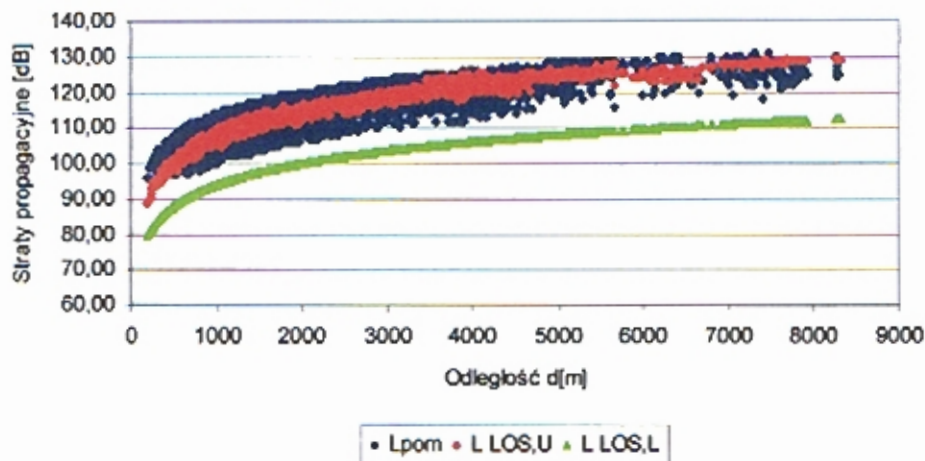
LOS	Model ITU-R P.1411 $L_{LOS,L}$ zależność (3.5)		Model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ zależność (3.6)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SEE [dB]	ME [dB]	SEE [dB]	
	15,114	15,495	0,373	3,472	

W warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, w sytuacjach LOS, daje się zauważyć bardzo dużą przydatność projektową modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ opisanego zależnością (3.6). Błąd średni wynosi tylko 0,373 dB, a błąd standardowy estymacji wynosi 3,472 dB. Model ten jest przeznaczony do szacowania tłumienia propagacyjnego dla warunków LOS na trasach krótkich tj. do 1 km. Tak więc przeprowadzona analiza przydatności projektowej na podstawie weryfikacji pomiarowej daje podstawy do zwiększenia zakresu stosowalności tego modelu.

Drugi z modeli $L_{LOS,L}$ opisany w zaleceniu ITU-R P.1411 znacznie gorzej przystaje do danych pomiarowych. Zatem jego przydatność projektowa jest znikoma. Błąd średni szacunku tłumienia propagacyjnego wynosi 15,114 dB, natomiast błąd standardowy estymacji wynosi 15,495 dB. Są to wyniki znacznie gorsze w porównaniu z wcześniej analizowanymi modelami.

Wartości obliczone tłumienia propagacyjnego przy użyciu obu modeli oraz wartości pomierzone zostały zobrazowane w zależności od długości tras propagacji na rys. 3.10. Na podstawie tego rysunku można stwierdzić dużą przydatność projektową modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ w warunkach pracy systemu dostępowego w mieście, przy jednocześnie znikomej przydatności projektowej modelu $L_{LOS,L}$. Dla pełniejszej analizy omawianych modeli w tab. 3.11 przedstawiono miary oceny tych modeli przy uwzględnieniu podziału na stacje bazowe.

MODEL ITU-R P.1411 (LOS)



Rys. 3.10. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla modeli ITU-R P.1411 (LOS) i sytuacji pomiarowych LOS.

Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; $L_{LOS,U}$, $L_{LOS,L}$ – wartości obliczone przy użyciu zależności odpowiednio (3.5) i (3.6).

Tab. 3.11. Zestawienie błędów średniego: (ME) i błędu standardowego estymacji (SEE), dla modeli ITU-R P.1411(LOS) zastosowanych w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe, sytuacje LOS.

	Stacja bazowa	Model ITU-R P.1411 $L_{LOS,L}$ zależność (3.5)		Model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ zależność (3.6)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	ME [dB]	SEE [dB]	
		LOS	GDA01	14,767	15,029	
	GDY01	11,667	12,128	-1,843	3,843	265
	GDY02	13,166	13,651	-0,394	4,310	466
	GDY03	14,421	14,717	-1,234	2,991	499
	KRA01	16,969	17,170	1,380	3,019	1392
	KRA02	16,317	16,574	1,045	3,374	961
	KRA03	16,913	17,129	1,962	3,324	716
	POZ01	14,198	14,697	0,311	4,013	1358
	POZ02	14,034	14,609	0,553	4,276	831

Jak widać powyżej przy uwzględnieniu podziału na stacje bazowe model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ wykazuje również dużą przydatność projektową. Błąd średni waha się dla tego modelu w granicach od -1,843 dB do 1,962 dB, zaś błąd standardowy estymacji waha się od 2,924 dB do 4,310 dB. Jak się można było spodziewać na podstawie poprzedniej analizy model ITU-R P.1411 $L_{LOS,L}$ wykazuje niewielką przydatność projektową w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście.

Podobne jak wyżej wnioski można wyciągnąć na podstawie analizy wartości miar oceny przydatności projektowej badanych modeli, uwzględniając rodzaj obszaru na którym zlokalizowane były stacje abonenckie (tab. 3.12).

Tab. 3.12. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), modeli ITU-R P.1411(LOS) zastosowanych w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z podziałem na typ obszaru.

Typ obszaru	Model ITU-R P.1411 $L_{LOS,L}$		Model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SEE [dB]	ME [dB]	SEE [dB]	
Typ I	23,057	24,528	8,283	11,720	11804
Typ II	21,065	22,775	5,964	10,599	7120

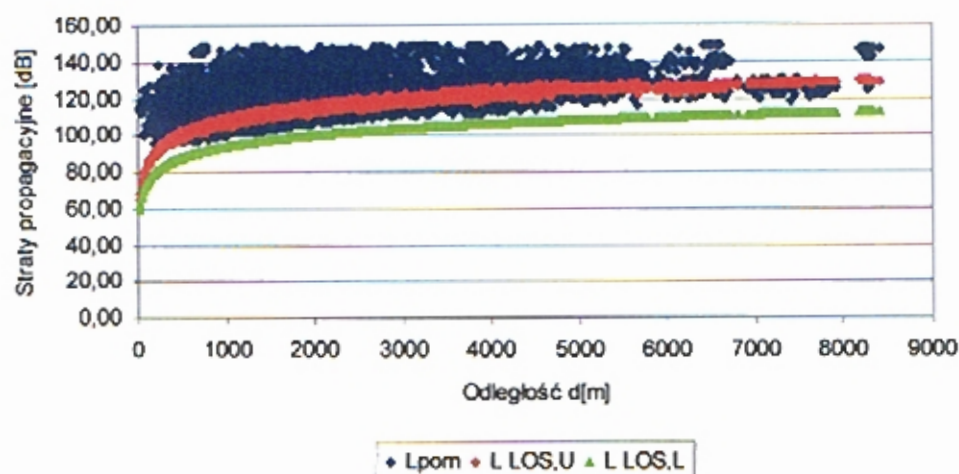
Kolejna ocena przydatności modeli ITU-R P.1411 do szacowania tłumienia propagacyjnego w sytuacji LOS zostanie określona dla wszystkich danych pomiarowych. Wartości obliczonych błędów zestawiono w tab. 3.13. Należało się spodziewać, biorąc pod uwagę przeznaczenie tych modeli, na znacznie gorsze wyniki oceny. Dla wszystkich danych pomiarowych, a więc spełniających zarówno warunek LOS jak i NLOS, wzrosły błędy szacowania tłumienia propagacyjnego dla obu modeli.

Tab. 3.13. Zestawienie błędów średniego: (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla modeli ITU-R P.1411 (LOS) zastosowanych w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, dla wszystkich danych pomiarowych.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Model ITU-R P.1411 $L_{LOS,L}$ zależność (3.5)		Model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ zależność (3.6)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SEE [dB]	ME [dB]	SEE [dB]	
	22,309	23,884	7,412	11,311	

Ilustrację graficzną przydatności projektowej modeli ITU-R P.1411 przedstawiono na rys. 3.11.

MODEL ITU-R P.1411 (LOS)



Rys. 3.11. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla modeli ITU-R P.1411 (LOS), wszystkie dane pomiarowe.

Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; $L_{LOS,U}$, $L_{LOS,L}$ – wartości obliczone przy użyciu zależności odpowiednio (3.5) i (3.6).

Podsumowując analizę przydatności projektowej badanych modeli propagacyjnych służących do szacowania tłumienia propagacyjnego w warunkach LOS dokonano zbiorczego zestawienia uzyskanych rezultatów w tab. 3.14.

Tab. 3.14. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), modeli do wyznaczania tłumienia dla warunków LOS radiowego systemu dostępowego w mieście.

	Model	Miary oceny przydatności projektowej modeli		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	
LOS	COST 231 Walfisha-Ikegami (LOS) - zależność (3.3)	-2,854	4,704	8556
	ITU-R P.1411 $L_{LOS,L}$ - zależność (3.5)	15,114	15,495	
	ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ - zależność (3.6)	0,373	3,472	

Dla projektowania łącz radiowych w systemie dostępowym, przy zachowaniu warunku LOS, największą przydatność wykazuje model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$, charakteryzujący się najmniejszą wartością zarówno błędu średniego jak i błędu standardowego estymacji. Wartości tych błędów wynoszą odpowiednio 0,373 dB oraz 3,472 dB. Dodatkowo (patrz Załącznik nr 1) można zauważyć, że model ten w warunkach LOS najdokładniej szacuje

tłumienie propagacyjne, gdy stacje abonenckie zlokalizowane są na obszarach typu II, przy nieco gorszej dokładności na obszarach typu I. W innych warunkach środowiskowych model ten wykazuje znacznie mniejszą przydatność projektową.

Ponadto można stwierdzić, że także zadawalającą przydatność projektową wykazuje również model COST 231 Walfisha – Ikegamiego (LOS). Błąd średni dla tego modelu wynosi $-2,854$ dB a błąd standardowy estymacji wynosi $4,704$ dB.

Trzeci z badanych modeli, czyli model ITU-R P.1411 $L_{LOS,L}$ całkowicie nie nadaje się do szacowania tłumienia propagacyjnego w warunkach pracy radiowych systemów dostępowych we wszystkich środowiskach propagacyjnych.

Analiza przydatności projektowej tych wszystkich trzech modeli wykazała również, że modele te w warunkach LOS (oprócz modelu $L_{LOS,L}$) lepiej przystają do rzeczywistych pomiarów aniżeli model wolnej przestrzeni, co wynika z czysto teoretycznego podłoża tego modelu i czego należało się spodziewać.

Przedstawiona ocena przydatności projektowej została wykonana w zakresie parametrów technicznych łączy radiowych opisanych w punkcie 2.1, co oznacza, że badania te zostały wykonane w szerszych warunkach technicznych aniżeli określają je tzw. zakresy stosowalności modeli podawane przy ich opisach. Tym samym wykazano w niniejszej pracy, że model COST 231 Walfisha – Ikegamiego (LOS) oraz model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ pozwalają szacować tłumienie propagacyjne z dobrą dokładnością dla szerszego zakresu parametrów technicznych łączy radiowych.

3.4.3. Warunki NLOS

Tłumienie tras propagacyjnych, przy braku informacji o warunkach LOS, można szacować na podstawie znanych i szeroko stosowanych modeli takich jak:

1. model Okumury-Haty – jest to popularny i szeroko stosowany model empiryczny, który powstał na bazie intensywnych pomiarów na terenie miasta Tokio i w jego okolicach,
2. model COST 231 Haty, który został zaproponowany przez Grupę COST 231,
3. model Egli, który został opracowany na bazie bardzo dużej liczby pomiarów w miastach amerykańskich.
4. model COST 231 Walfisha – Ikegamiego (NLOS), przedstawiony w pracach Grupy COST 231 oraz także w zaleceniu ITU-R P.1411.

3.4.3.1. Model Okumury-Haty

Pierwszym z wymienionych modeli, który służy do szacowania tłumienia propagacyjnego w warunkach NLOS jest model Okumury – Haty. W modelu tym wyróżnia się dwa rodzaje miast : małe/średnie oraz duże. Dla dużych miast zaleca się stosowanie współczynnika korekcyjnego określonego zależnością (3.11), przy częstotliwościach pracy łącza większych od 400 MHz. W przeciwnym przypadku, czyli dla miast małych i średnich, zaleca się stosowanie funkcyjnego współczynnika korekcyjnego określonego zależnością (3.10).

Mając to na uwadze przyjmując, że miasta, w których przeprowadzono badania tłumienia propagacyjnego można zaklasyfikować jako miasta duże (Trójmiasto, Kraków, Poznań). Zatem zastosowano poprawkę określoną wzorem (3.11).

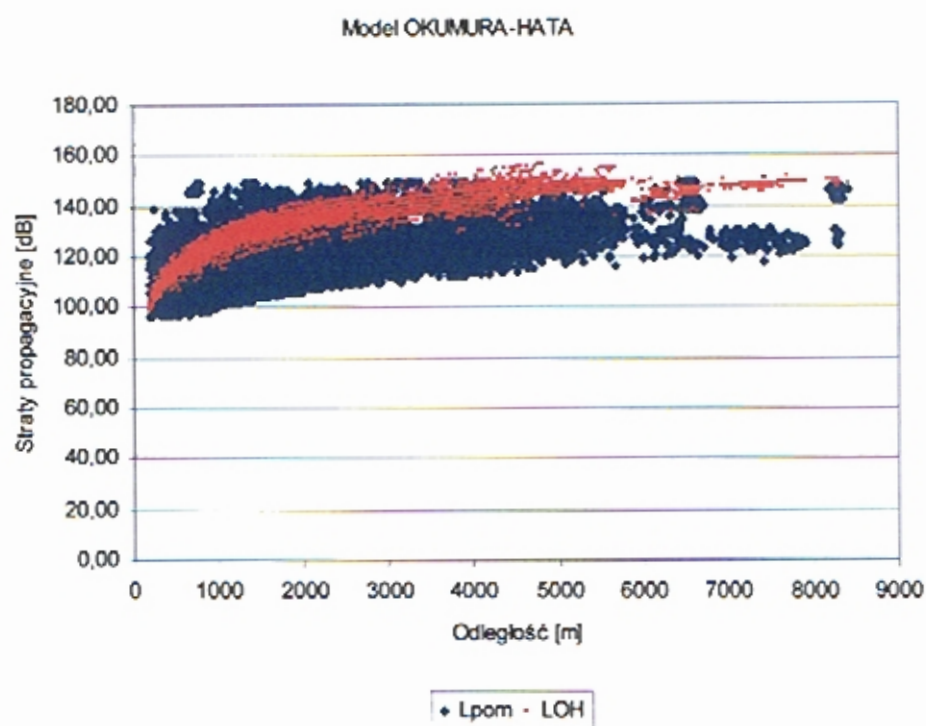
Dla wszystkich zebranych danych pomiarowych zestawienie wartości błędów dla modelu Okumury – Haty zawarto w tab. 3.15.

Tab. 3.15. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu Okumury-Haty zastosowanego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Model Okumury-Haty zależności (3.9) i (3.11)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	-11,784	14,904	18924

Analizując przydatność projektową modelu Okumury – Haty dla potrzeb projektowania radiowego systemu dostępowego w mieście, należy stwierdzić, że model ten przeszacowuje tłumienie propagacyjne średnio o 11,784 dB, przy błędzie standardowym estymacji równym 14,904 dB, co zostało potwierdzone również w [13].

Na rys. 3.12 przedstawiono graficznie wartości obliczone tłumienia propagacyjnego za pomocą modelu Okumury-Haty oraz wartości pomierzone w zależności od długości tras propagacyjnych.



Rys. 3.12. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla modelu Okumury-Haty, wszystkie dane pomiarowe.

Oznaczenia: Lpom – wartości pomierzone; LOH – wartości obliczone wg zależności (3.9) i (3.11).

Jak widać na powyższym rysunku model Okumury – Haty, z uwzględnieniem poprawki wyrażonej zależnością (3.11), w warunkach pracy systemu dostępowego przeszacowuje tłumienie propagacyjne w porównaniu do wartości pomierzonych, zwłaszcza dla wyższych długości tras propagacyjnych.

Uwzględniając dodatkowo klasyfikację danych pomiarowych ze względu na lokalizację stacji bazowych (tab. 3.16), wyniki błędów średnich zmieniają się w przedziale od $-16,863$ dB do $-6,694$ dB, zaś błędów standardowych estymacji od $12,751$ dB do $18,334$ dB. Ponadto przeanalizowano także przydatność projektową modelu Okumury – Haty z uwzględnieniem typu obszaru na którym zlokalizowane były stacje abonenckie. Dla tego fragmentu analizy wartości poszczególnych błędów zestawiono w tab. 3.17 i tab. 3.18.

Tab. 3.16. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla modelu Okumury-Haty zastosowanego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe dla wszystkich danych pomiarowych.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Stacja bazowa	Model Okumury-Haty zależność (3.9) i (3.11)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	
	GDA01	-14,125	16,631	3441
	GDY01	-9,460	14,187	620
	GDY02	-6,694	15,318	900
	GDY03	-16,863	18,334	624
	KRA01	-14,459	15,350	3814
	KRA02	-9,495	12,787	3180
	KRA03	-13,311	14,296	1774
	POZ01	-8,790	14,700	2630
POZ02	-9,833	13,954	1438	
POZ03	-11,500	12,751	552	

Tab. 3.17. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu Okumury-Haty zastosowanego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, obszar typu I.

OBSZAR TYPU I	Model Okumury- Haty zależności (3.9) i (3.11)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	-10,813	13,986	11804

Tab. 3.18. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu Okumury-Haty zastosowanego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, obszar typu II.

OBSZAR TYPU II	Model Okumury-Haty zależności (3.9) i (3.11)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	-13,444	16,353	7120

Podsumowując można stwierdzić, że model Okumury-Haty z uwzględnieniem poprawki określonej wzorem (3.11), dokładniej szacuje tłumienie propagacyjne na obszarach o gęstej i zwartej zabudowie (centra miast typ I zabudowy), aniżeli w obszarach o niezbyt gęstej zabudowie (typ II zabudowy). Średnio oszacowanie to jest dokładniejsze o ok. 2,5 dB.

3.4.3.2. Model COST 231 Haty

Analizę przydatności projektowej modelu COST 231 Haty wykonano obliczając tłumienie propagacyjne posługując się zależnościami (3.14) - (3.16). Charakter środowiska został uwzględniony poprzez zastosowanie poprawki 3 dB dla obszarów typu I, zaś dla obszarów typu II poprawka ta wynosiła 0 dB.

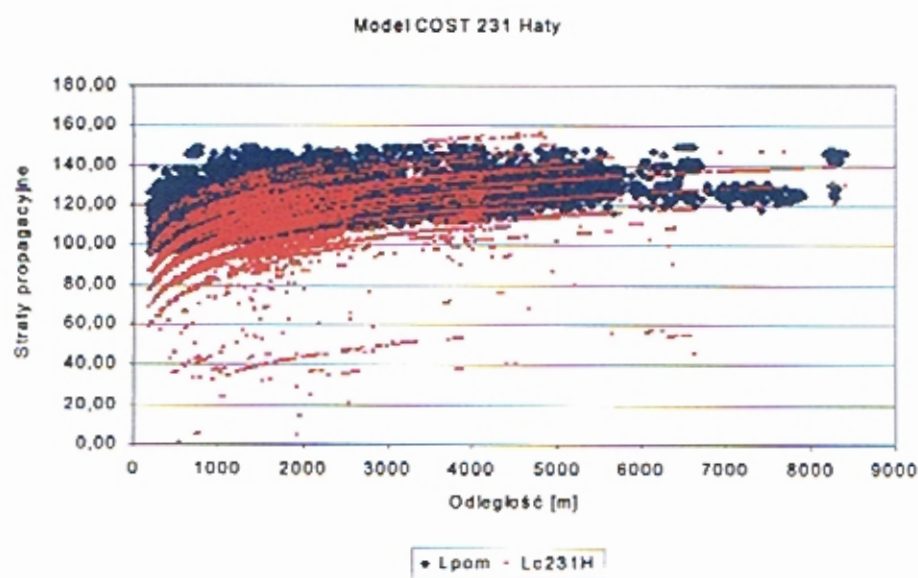
W pierwszej kolejności wykonano analizę przydatności projektowej tego modelu dla wszystkich danych pomiarowych. Zestawienie wyników błędów przedstawiono w tab. 3.19.

Tab. 3.19. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu COST 231 Haty zastosowanego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Model COST 231 Haty zależności (3.14) – (3.16)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	7,974	16,178	18924

Jak widać model ten niedoszacowuje tłumienie propagacyjne średnio o 7,974 dB przy błędzie standardowym estymacji równym 16,178 dB.

Pomierzone i obliczone przy użyciu modelu COST 231 Haty, wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych graficznie przedstawiono na rys. 3.13.



Rys. 3.13. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji dla modelu COST 231 Haty, wszystkie dane pomiarowe.

Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; L_{C231H} – wartości obliczone wg zależności (3.14) – (3.16).

Jak można zauważyć na powyższym rysunku, model COST 231 Haty źle przystaje do danych pomiarowych zebranych w warunkach pracy systemu dostępowego w mieście. Podstawową przyczyną rozbieżności uzyskanych rezultatów są wysokości wzniesienia anten stacji abonenckich, wykraczające znacznie poza granice stosowalności modelu. Model ten

został opracowany dla radiokomunikacji ruchomej, gdzie anteny stacji odbiorczych umieszczone są na niewielkiej wysokości ponad poziomem terenu.

Poniżej w tab. 3.20 zestawiono wyniki obliczonych błędów z podziałem na poszczególne stacje bazowe.

Tab. 3.20. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla modelu COST 231 Haty zastosowanego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe, wszystkie dane pomiarowe.

POMIAROWE WSZYSTKIE DANE	Stacja bazowa	Model COST 231 Haty zależność (3.14 – 3.16)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	
	GDA01	2,386	13,591	3441
	GDY01	12,434	20,496	620
	GDY02	10,043	20,807	900
	GDY03	3,765	20,580	624
	KRA01	3,031	13,665	3814
	KRA02	11,004	14,324	3180
	KRA03	6,404	9,084	1774
	POZ01	14,874	21,035	2630
POZ02	13,345	19,576	1438	
POZ03	14,055	18,692	552	

Z tab. 3.20 wynika, że wartości poszczególnych błędów znacznie się od siebie różnią, w zależności od lokalizacji stacji bazowej. Błąd średni zawiera się w przedziale od 2,386 dB dla stacji GDA01 do 14,874 dla stacji POZ01, natomiast błąd standardowy estymacji zmienia się od wartości 9,084 dB do 21,035 dB.

Kolejną analizą jaką przeprowadzono odnosiła się do zbadania wpływu typu obszaru na jakość estymacji tłumienia propagacyjnego, co wykonano oddzielnie dla obszarów typu I oraz typu II. W tym celu dokonano zestawienia wartości obliczonych błędów, odpowiednio w tab. 3.21 i tab. 3.22.

Tab. 3.21. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu COST 231 Haty zastosowanego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, obszar typu I.

OBSZAR TYPU I	Model COST 231 Haty zależności (3.14) – (3.16)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	9,899	15,524	11852

Tab. 3.22. Zestawienie błędów średniego (ME) i błędu standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla potrzeb analizy przydatności projektowej modelu COST 231 Haty w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – obszar typu II.

OBSZAR TYPU II	Model COST 231 Haty		
	zależności (3.14) – (3.16)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	5,137	17,887	7166

Analiza wyników błędów zestawionych w powyższych dwóch tabelach pozwala stwierdzić, że model COST 231 Haty szacuje tłumienie propagacyjne średnio o ok. 4,7 dB dokładniej dla obszarów typu II. Jednakże w dla tego obszaru rozrzut wyników jest większy aniżeli dla obszaru typu I.

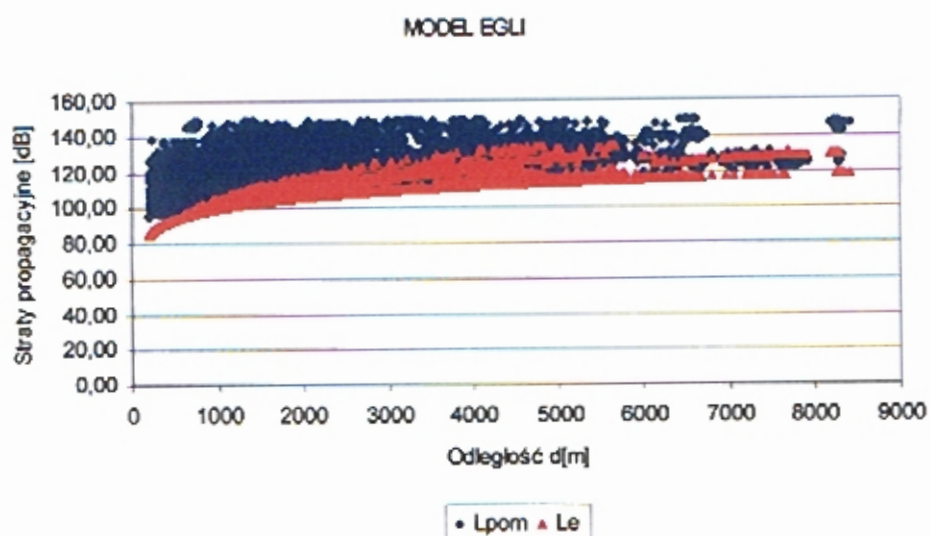
3.4.3.3. Model Egli

Kolejnym modelem poddanym analizie pod kątem przydatności projektowej jest **model Egli** opisany zależnością (3.18). Poniżej w tab. 3.23 podano wartości poszczególnych błędów dla wszystkich danych pomiarowych, natomiast na rys.3.14 zilustrowano graficznie pomierzone i obliczone tłumienie propagacyjne w zależności od długości tras propagacyjnych.

Tab. 3.23. Zestawienie błędów średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla potrzeb analizy przydatności projektowej modelu Egli w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Model Egli		
	zależność (3.18)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	14,514	17,099	18924

Wyniki błędów zestawione w tab. 3.23 świadczą o małej przydatności modelu Egli do projektowania systemów radiowego dostępu abonenckiego. Błąd średni wynosi 14,514 dB przy błędzie standardowym estymacji równym 17,099 dB. Z rys. 3.14 zamieszczonego poniżej widać dodatkowo, że model Egli gorzej przystaje do danych pomiarowych dla krótkich tras propagacyjnych, zaś nieco lepiej dla tras o długości powyżej 3 km.



Rys. 3.14. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji dla modelu Egli, wszystkie dane pomiarowe. Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; L_e – wartości obliczone wg zależności (3.18).

W tab. 3.24 zestawiono z kolei wartości błędów ME i SSE, wprowadzając przy tym podział ze względu na lokalizację stacji bazowych. W zależności od stacji bazowej, model Egli szacuje tłumienie propagacyjne dając różne wartości błędów średnich (od 6,896 dB do 19,888 dB) i błędów standardowych estymacji (od 11,210 dB do 21,982 dB). W modelu tym nie uwzględnia się typu środowiska, na obszarze którego położone są stacje abonenckie. Dlatego też pominięto analizę przydatności projektowej z klasyfikacją uwzględniającą typ środowiska propagacji.

Tab. 3.24. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla modelu Egli zastosowanego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe, wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Stacja bazowa	Model Egli zależność (3.18)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	
		GDA01	11,633	14,535
	GDY01	15,373	19,025	620
	GDY02	17,025	21,982	900
	GDY03	6,896	11,210	624
	KRA01	12,443	14,191	3814
	KRA02	19,119	20,954	3180
	KRA03	15,407	16,211	1774
	POZ01	15,228	17,926	2630
	POZ02	13,534	15,867	1438
	POZ03	19,888	21,194	552

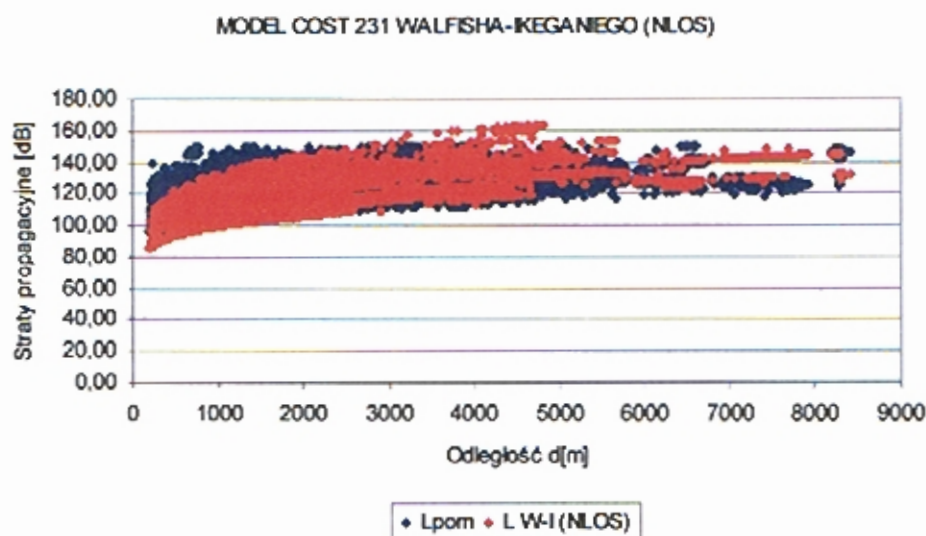
3.4.3.4. Model COST 231 Walfisha-Ikegamięgo (NLOS)

Kolejnym modelem, który zostanie przeanalizowany pod kątem przydatności projektowej w systemach dostępowych jest model COST 231 Walfisha- Ikegamięgo (NLOS). Tłumienie propagacyjne za pomocą tego modelu obliczano w oparciu o zależności od (3.19) do (3.29), tj. przypadek 1 opisu tego modelu. Przypadku 2 nie stwierdzono w posiadanym materiale badawczym. Nie dysponowano również wszystkimi, występującymi w opisie modelu wielkościami, tj. nie mierzono dla każdego przypadku pomiarowego odległości pomiędzy budynkami. Przyjęto więc, opierając się na zaleceniach autorów modelu, że odległość pomiędzy budynkami równą się 35 m, co w warunkach polskich miast należy uznać za wartość najbardziej zbliżoną do rzeczywistości. Nie wyznaczano również dla każdego przypadku pomiarowego kąta nadejścia fali, przyjmując każdorazowo kąt równy 90 stopni. Zaznaczyć również należy, że model COST 231 Walfisha – Ikegamięgo (NLOS) istotnie odbiega od warunków pracy rzeczywistego systemu dostępowego i jego zastosowania należy przede wszystkim upatrywać w szacowaniu tłumienia propagacyjnego na krótkich trasach propagacyjnych do 1 km. Niemniej postanowiono zbadać przydatność tego modelu w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście. W tab. 3.25 zestawiono wyniki otrzymanych błędów dla wszystkich danych pomiarowych. Dla wszystkich danych pomiarowych model COST 231 Walfisha-Ikegamięgo szacuje tłumienie propagacyjne z błędem średnim równym 1,044 dB i błędem standardowym estymacji równym 11,147 dB. Jest to więc model, którego środek skupienia w stosunku do danych pomiarowych jest położony najbliżej spośród rozpatrywanych modeli pomimo, że warunki w jakich model jest analizowany znacznie odbiegają od jego zakresu stosowalności.

Tab. 3.25. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla modelu COST 231 Walfisha-Ikegamięgo (NLOS) zastosowanego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Model COST 231 Walfisha-Ikegamięgo (NLOS) zależności (3.19) – (3.29)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	1,044	11,147	18924

Z kolei na rys. 3.15 przedstawiono graficznie w zależności od długości tras propagacyjnych wartości pomierzone i obliczone tłumienia propagacyjnego dla modelu COST 231 Walfisha-Ikegamięgo (NLOS).



Rys. 3.15. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji dla modelu COST 231 Walfisha-Ikeganiego (NLOS), wszystkie dane pomiarowe.

Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; $L_{w-i(NLOS)}$ – wartości obliczone wg zależności (3.19) – (3.29).

Z powyższego rysunku wynika, że wartości obliczone wg zależności opisujących analizowany model dość dobrze pokrywają się z pomierzonymi wartościami tłumienia propagacyjnego. Natomiast w tab. 3.26 zestawiono wartości błędów z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe. Pomimo niewielkiego średniego błędu szacowania tłumienia propagacyjnego dla wszystkich danych pomiarowych, w przypadku uwzględnienia dodatkowego czynnika klasyfikacyjnego jakim jest podział na stacje bazowe, można stwierdzić duże zróżnicowanie wartości błędu średniego, który w zależności od stacji zmienia się w zakresie od $-5,529$ dB do $10,144$ dB. Podobnie jest z błędem standardowym estymacji, który przyjmuje wartości z zakresu od $7,281$ dB do $19,037$ dB.

Ponadto w tab. 3.27 przedstawiono wyniki błędów dla sytuacji obejmującej wyłącznie przypadki pomiarowe NLOS, pomimo, że opis modelu nie wskazuje na stosowanie go wyłącznie do takich przypadków. Dla tych warunków błąd średni dla modelu COST 231 Walfisha-Ikeganiego powiększył się o ponad 4 dB, a błąd standardowy estymacji o ponad 1 dB. W sytuacji NLOS model ten obarczony jest większym błędem szacunku tłumienia propagacyjnego, a więc wykazuje mniejszą przydatność projektową.

Tab. 3.26. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla modelu COST 231 Walfisha – Ikegamiiego (NLOS) zastosowanego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe, wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Stacja bazowa	Model COST 231 Walfisha-Ikegamiiego zależności (3.19) do (3.29)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	
	GDA01	6,206	11,618	3441
	GDY01	2,053	11,409	620
	GDY02	10,144	19,037	900
	GDY03	-5,529	11,981	624
	KRA01	-1,371	7,281	3814
	KRA02	0,158	8,930	3180
	KRA03	-3,288	6,262	1774
	POZ01	6,134	15,437	2630
POZ02	5,570	14,345	1438	
POZ03	-1,168	10,241	552	

Tab. 3.27. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla modelu COST 231 Walfisha - Ikegamiiego (NLOS) w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe, w sytuacjach NLOS.

NLOS	Model COST 231 Walfisha-Ikegamiiego zależności (3.19) – (3.29)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	5,383	12,281	10368

Uwzględniając dla sytuacji pomiarowych NLOS dodatkową klasyfikację danych pomiarowych na stacje bazowe, wartości błędów szacowania tłumienia propagacyjnego za pomocą modelu COST 231 Walfisha- Ikegamiiego (NLOS) zestawiono w tab. 3.28.

Tab. 3.28. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla modelu COST 231 Walfisha - Ikegamiiego (NLOS) w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe, sytuacje NLOS.

Obszar stacji bazowej	Model COST 231 Walfisha-Ikegamiiego zależności (3.19) – (3.29)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SSE [dB]	
GDA01	14,855	17,464	1373
GDY01	6,877	12,898	355
GDY02	21,799	25,554	430
GDY03	7,672	11,388	125
KRA01	1,259	5,559	2422
KRA02	3,316	8,817	2219
KRA03	-1,904	5,501	1058
POZ01	14,191	19,204	1229
POZ02	13,987	18,110	605
POZ03	-1,168	10,241	552

Jak można zauważyć w powyższej tabeli, wartości błędów średnich i błędów standardowych estymacji są bardzo zróżnicowane.

Błąd średni zmienia się od wartości $-1,904$ dB dla stacji bazowej KRA03 do wartości aż $21,799$ dB dla stacji bazowej GDY02. Dla tych samych stacji bazowych otrzymujemy też skrajne wartości błędu standardowego estymacji.

Klasyfikując dane pomiarowe pod kątem typu obszaru, na którym zlokalizowane były stacje abonenckie, w warunkach NLOS otrzymano następujące wartości błędów:

- obszar typu I : $ME[\text{dB}] = 4,722$, natomiast $SEE[\text{dB}] = 11,572$,
- obszar typu II : $ME[\text{dB}] = 6,822$, natomiast $SEE[\text{dB}] = 13,700$.

Zatem, jak widać model COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS), szacuje tłumienie propagacyjne z większym błędem w przypadku, gdy stacje abonenckie zlokalizowane są obszarach typu II.

Podsumowując analizę przydatności projektowej modeli służących do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w warunkach NLOS, opracowano zestawienie zbiorcze miar oceny tych modeli, co zaprezentowano w tab. 3.29.

Tab. 3.29. Zbiorcze zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla modeli propagacyjnych służących do wyznaczania tłumienia w sytuacjach NLOS, zastosowanych w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście.

	Model	Miary oceny przydatności projektowej modeli		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	
NLOS	COST 231 Haty -zależność (3.14) – (3.16)	7,974	16,178	18924
	Okumury - Haty -zależność (3.9) i (3.11)	-11,784	14,904	
	Egli -zależność (3.18)	14,514	17,099	
	COST 231 Walfisha Ikegamiiego (NLOS) – zależności (3.19) – (3.29)	1,044	11,147	

Reasumując analizę przydatności projektowej badanych modeli propagacyjnych służących do szacowania tłumienia propagacyjnego w warunkach NLOS należy stwierdzić, że modele te nie dają zadawalających wyników szacowania tłumienia propagacyjnego, a niektóre z nich wręcz nie nadają się do wykorzystania w praktyce projektowej dla potrzeb radiowych systemów dostępowych. Szczególnie istotne znaczenie przy ocenie przydatności projektowej ma błąd standardowy estymacji. Duże wartości tego błędu przekraczające 11 dB świadczą o małej przystawalności modeli do danych empirycznych. Jeżeli dodatkowo

uwzględni się duże zróżnicowanie błędów średnich dla poszczególnych stacji bazowych, przydatność projektowa analizowanych modeli dodatkowo zmniejsza się.

Przyczyny tego stanu należy upatrywać w tym, że przeanalizowane modele służą do szacowania tłumienia propagacyjnego w warunkach pracy systemów radiokomunikacji ruchomej lądowej, a więc w warunkach istotnie różnych od warunków jakie występują w radiowych systemach dostępowych.

Wykazana mała przydatność projektowa tych modeli w skłania do stwierdzenia, że aby mogły się one stać przydatne do analiz praktycznych w zakresie dotyczącym tematyki rozprawy konieczne i celowe jest ich skorygowanie.

ROZDZIAŁ 4

SZACOWANIE TŁUMIENIA PROPAGACYJNEGO W WARUNKACH PRACY RADIOWEGO SYSTEMU DOSTĘPOWEGO W MIEŚCIE

W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione modele propagacyjne opisane w rozdziale 3, zmodyfikowane o współczynniki liczbowe lub funkcyjne współczynniki korekcyjne, uzyskane poprzez przeprowadzoną analizę regresji zebranego materiału badawczego. Celem tej modyfikacji było zwiększenie dokładności wyznaczania tłumienia propagacyjnego w warunkach pracy systemu dostępowego w mieście, w stosunku do szacowania tego tłumienia przy użyciu klasycznych form tych modeli.

4.1. Opis w warunkach wolnej przestrzeni

Jak wykazano w rozdziale 3.4.1, przydatność projektowa modelu wolnej przestrzeni, w warunkach pracy systemu dostępowego, jest mała. Powodem tego jest idealny charakter ośrodka propagacji jakim jest wolna przestrzeń. Z przyczyn oczywistych, w warunkach zbliżonych do idealnych, a więc gdy spełnione są warunki LOS, model wolnej przestrzeni charakteryzuje się znacznie mniejszymi błędami szacowania tłumienia propagacyjnego, aniżeli dla sytuacji, gdy pod uwagę weźmiemy przypadki nie spełniające tego warunku, czyli sytuacje propagacyjne typu NLOS.

W celu poprawy dokładności szacowania tłumienia propagacyjnego za pomocą modelu wolnej przestrzeni, wykonano modyfikację modelu określonego zależnością (3.1) poprzez określenie nowych współczynników liczbowych występujących w tym wzorze. Analizie regresji została poddana następująca funkcja błędu:

$$\Delta L = L_{pom} - 20 \cdot \lg f = A + B \cdot \lg d, \quad (4.1)$$

gdzie A reprezentuje stałą, B jest współczynnikiem regresji, natomiast L_{pom} stanowią pomierzone wartości tłumienia propagacyjnego w [dB].

W warunkach LOS, analiza regresji przeprowadzona metodą najmniejszych kwadratów, przy założonym poziomie ufności równym 95%, daje rezultaty, które zostały zamieszczone w tab. 4.1.

Tab. 4.1. Współczynniki regresji i ich istotność dla zmodyfikowanego modelu wolnej przestrzeni w sytuacjach LOS.

Zmienne	Współczynniki regresji	Błąd standardowy	Test t	Poziom prawdopodobieństwa dla testu t
Stała: A	41,390	0,053969039	766,9287	0
lg d	20,485	0,132195889	154,9626	0

Poziom prawdopodobieństwa dla testu t równy zero wskazuje, że współczynniki regresji są istotnie różne od zera. Wyznaczone wartości współczynników regresji są więc następujące:

$$A = 41,390 \text{ (stała)}$$

$$B = 20,485$$

Ponizej, w tab. 4.2. została przedstawiona ogólna ocena przyjętego modelu regresji.

Tab. 4.2. Ogólna ocena modelu regresji dla sytuacji LOS.

Współczynnik korelacji R	0,858687744
Współczynnik determinacji R ²	0,737344642
Skorygowany współczynnik determinacji R ²	0,737313937
Błąd standardowy	3,409384757
Ilość obserwacji	8556
Statystyka testowa istotności regresji F	24013,39
Poziom prawdopodobieństwa dla F : p	0

Jak widać poziom prawdopodobieństwa statystyki testowej *F* Snecodera-Fishera jest równy zero, co podobnie jak współczynniki determinacji potwierdzają, że model regresji jest istotny.

Tak więc, w rzeczywistych warunkach pracy radiowego systemu dostępowego, w sytuacji LOS, zmodyfikowane ujęcie analityczne tłumienia propagacyjnego wywodzące się z modelu wolnej przestrzeni przyjmuje postać:

$$L_{LOS,wp} [dB] = 41,39 + 20 \cdot \lg f_{[MHz]} + 20,485 \cdot \lg d_{[km]}. \quad (4.2)$$

Zależność (4.2), określająca tłumienie propagacyjne w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, przy spełnieniu warunku LOS, wyjaśnia pomierzone wartości tłumienia propagacyjnego w 73,73 %, o czym świadczy współczynnik determinacji.

Natomiast 26,27% pomiarów jest niewyjaśnione przyjętym modelem regresji i zależy od innych czynników nie ujętych w jego opisie.

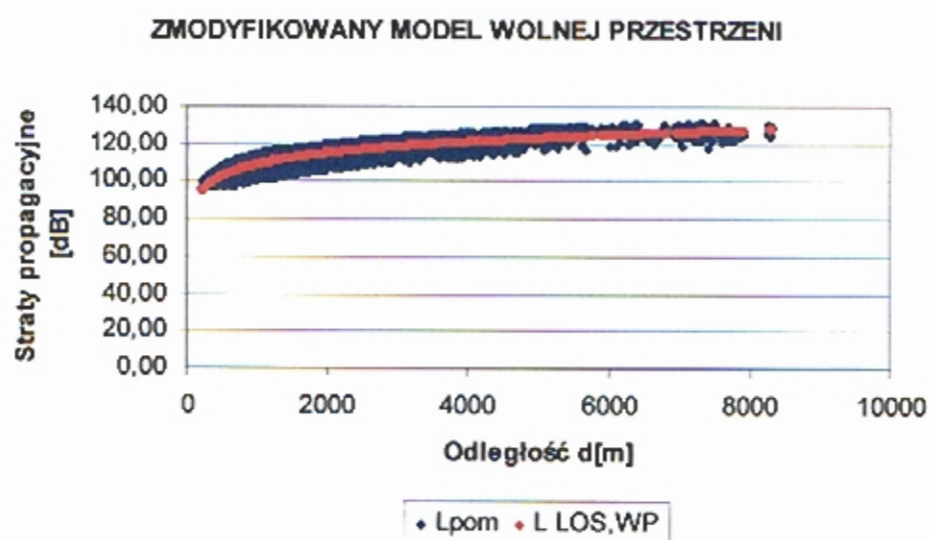
W porównaniu z klasyczną formą modelu wolnej przestrzeni uzyskano znaczące zmniejszenie błędów średniego i standardowego estymacji wyrażonych odpowiednio zależnościami (2.1) i (2.2), co przedstawiono w tab. 4.3.

Tab. 4.3. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla zmodyfikowanego modelu wolnej przestrzeni w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, sytuacji LOS.

LOS	Zmodyfikowany model wolnej przestrzeni – zależność (4.2)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	0,000 (9,135)	3,410 (9,752)	8556

W nawiasach podano wartości błędów dla modelu wolnej przestrzeni wyrażonego zależnością (3.1), a więc klasycznej jego formy.

Poniżej, na rys. 4.1 graficznie przedstawiono pomierzone i obliczone za pomocą zmodyfikowanego modelu wolnej przestrzeni, wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych.



Rys. 4.1. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla zmodyfikowanego modelu wolnej przestrzeni, sytuacji LOS.

Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; $L_{LOS,WP}$ – wartości obliczone wg zależności (4.2)

Jak można zauważyć na powyższym rysunku, zmodyfikowany model wolnej przestrzeni dobrze przystaje do danych pomiarowych tłumienia propagacyjnego.

Wprowadzając dodatkową klasyfikację danych pomiarowych na stacje bazowe, wyniki oceny zmodyfikowanego modelu wolnej przestrzeni przedstawiono w tab. 4.4.

Tab. 4.4. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla zmodyfikowanego modelu wolnej przestrzeni w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z podziałem na stacje bazowe w sytuacjach LOS.

	Stacja bazowa	Zmodyfikowany model wolnej przestrzeni zależność (4.2)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SSE [dB]	
LOS	GDA01	-0,432 (8,788)	2,815 (9,217)	2068
	GDY01	-3,333 (5,688)	4,648 (6,553)	265
	GDY02	-1,718 (7,187)	3,983 (8,025)	466
	GDY03	-0,926 (8,442)	2,996 (8,923)	499
	KRA01	1,786 (10,990)	3,151 (11,293)	1392
	KRA02	1,214 (10,338)	3,142 (10,732)	961
	KRA03	1,844 (10,934)	3,233 (11,256)	716
	POZ01	-0,819 (8,219)	3,876 (9,049)	1358
	POZ02	-0,988 (8,055)	4,159 (9,011)	831

W nawiasach podano wartości błędów dla modelu wolnej przestrzeni wyrażonego zależnością (3.1), a więc klasycznej jego formy.

Ponadto, w przypadku uwzględnienia podziału wyników pomiarowych na poszczególne stacje bazowe, uzyskano również znaczącą poprawę jakości szacowania tłumienia propagacyjnego w warunkach LOS. We wszystkich przypadkach błędy będące miarami oceny modelu istotnie się zmniejszyły.

Kolejna analiza regresji zostanie przeprowadzona dla wszystkich danych pomiarowych (N=18924). Za podstawę tej analizy przyjęto również wspomnianą już funkcję błędu określoną zależnością (4.1). W takich warunkach, przeprowadzona analiza regresji metodą najmniejszych kwadratów, przy założonym poziomie ufności równym 95% daje następujące rezultaty, zestawione w tab. 4.5.

Tab. 4.5. Współczynniki regresji i ich istotność dla zmodyfikowanego modelu wolnej przestrzeni, wszystkie dane pomiarowe.

Zmienne	Współczynniki regresji	Błąd standardowy	Test t	Poziom prawdopodobieństwa dla testu t
Stała: A	49,3762886	0,083672446	590,1141	0
lg d	17,47694251	0,206706186	84,54968	0

Poziom prawdopodobieństwa dla testu t równy zero wskazuje, że współczynniki regresji są istotnie różne od zera. Wyznaczone wartości współczynników regresji są następujące:

$$A = 49,376 \text{ (stała)}$$

$$B = 17,477$$

Poniżej w tab. 4.6. została przedstawiona ogólna ocena przyjętego modelu regresji.

Tab. 4.6. Ogólna ocena modelu regresji, wszystkie dane pomiarowe.

Współczynnik korelacji R	0,523644
Współczynnik determinacji R ²	0,274203
Skorygowany współczynnik determinacji R ²	0,274165
Błąd standardowy	8,442476
Ilość obserwacji	18924
Statystyka testowa istotności regresji F	7148,65
Poziom prawdopodobieństwa dla F : p	0

Jak widać, poziom prawdopodobieństwa statystyki testowej F Snecodera-Fishera jest równy zero, co podobnie jak współczynniki determinacji potwierdzają, że model regresji jest istotny.

W rezultacie dla wszystkich danych pomiarowych, w rzeczywistych warunkach pracy radiowego systemu dostępowego, zmodyfikowane ujęcie analityczne tłumienia propagacyjnego wywodzące się z modelu wolnej przestrzeni przyjmuje postać:

$$L_{NLOS,wp}[dB] = 49,376 + 20 \cdot \lg f_{MHz} + 17,477 \cdot \lg d_{km}. \quad (4.3)$$

Zależność (4.3) określająca tłumienie propagacyjne w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, dla wszystkich danych pomiarowych, wyjaśnia pomierzone wartości tłumienia propagacyjnego w 27,42%, o czym świadczy współczynnik determinacji. Natomiast 72,58% pomiarów jest niewyjaśnione przyjętym modelem regresji i zależy od innych czynników nie ujętych w jego opisie.

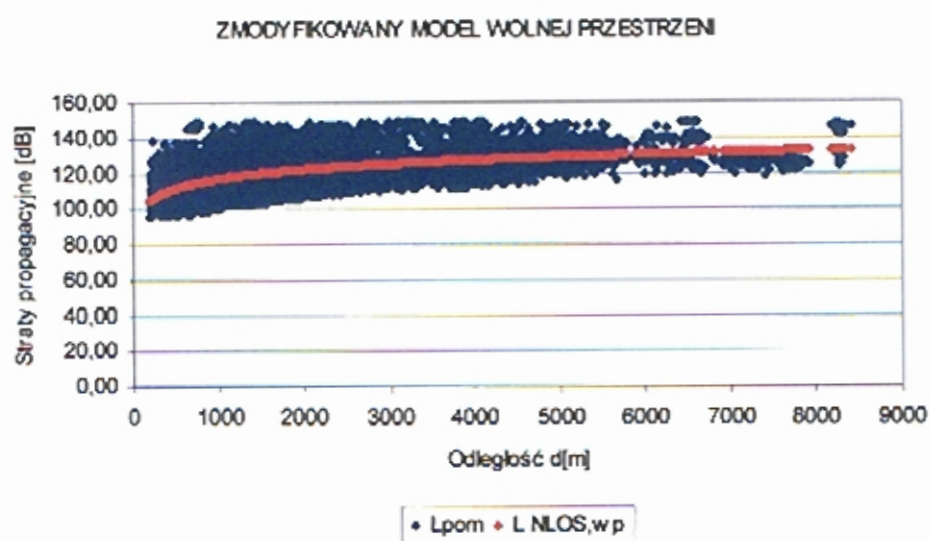
W porównaniu z klasyczną formą modelu wolnej przestrzeni uzyskano jednak znaczące zmniejszenie błędów średniego i standardowego estymacji wyrażonych odpowiednio zależnościami (2.1) i (2.2). Zostało to przedstawione w tab. 4.7.

Tab. 4.7. Zestawienie błędów średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla zmodyfikowanego modelu wolnej przestrzeni, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Zmodyfikowany model wolnej przestrzeni zależność (4.3)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	0,000 (16,330)	8,442 (18,424)	18924

W nawiasach podano wartości błędów dla modelu wolnej przestrzeni wyrażonego zależnością (3.1), a więc klasycznej jego formy.

Poniżej na rys. 4.2 przedstawiono graficznie pomierzone i obliczone na podstawie wyrażenia (4.3) wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji.



Rys. 4.2. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla zmodyfikowanego modelu wolnej przestrzeni, wszystkie dane pomiarowe.

Oznaczenia: Lpom – wartości pomierzone; LNLOS,wp – wartości obliczone wg zależności (4.3).

Jak widać na powyższym rysunku, zmodyfikowany model wolnej przestrzeni dość dobrze przystaje do danych pomiarowych, o czym świadczą również błędy oceny modelu oraz statystyki regresji.

Zmodyfikowany model wolnej przestrzeni zarówno w sytuacji LOS jak i NLOS poprawia jakość szacowania tłumienia propagacyjnego w stosunku do klasycznej formy tego modelu. Świadczy o tym analiza błędów i współczynników determinacji. Niewątpliwą zaletą zmodyfikowanych form modelu wolnej przestrzeni jest prostota jego opisu analitycznego. Należy się jednak spodziewać, że zmodyfikowanie „lepszyc” modeli (patrz rozdział 3.4) pozwoli szacować tłumienie propagacyjne z jeszcze większą dokładnością.

4.2. Opis w warunkach LOS

4.2.1. Zmodyfikowany model COST 231 Walfisha-Ikegami (LOS)

Jak wykazano w rozdziale 3.4.2.1. przydatność projektowa klasycznego modelu COST 231 Walfisha – Ikegami (LOS), w warunkach pracy systemu dostępowego jest umiarkowana, a w porównaniu z klasyczną formą modelu wolnej przestrzeni jest dość dobra.

Podkreślić należy, że model ten jest dedykowany do szacowania tłumienia propagacyjnego w rzeczywistych warunkach LOS.

Zarówno model COST 231 Walfisha-Ikegami (LOS) jak i model wolnej przestrzeni wyrażone są za pomocą takich samych parametrów łącza radiowego, czyli częstotliwości f oraz długości trasy propagacji d . Modyfikacja tego modelu o korekcyjne współczynniki liczbowe da znaną już postać wyrażenia na tłumienie propagacyjne w warunkach LOS określone zależnością (4.2). Mając na uwadze nieprzesłonięcie pierwszej strefy Fresnela z warunkiem LOS postawiono pytanie: czy wyznaczanie tłumienia propagacyjnego w sposób statystycznie istotny zależy od wielkości h_{LOS} , określonej wyrażeniem (1.9), szczególnie w połowie trasy propagacji, gdzie jak wiadomo promień I strefy Fresnela jest największy. Dodatkowo analiza rozrzutu tłumienia propagacyjnego na rys. 3.8 wykazuje wpływ długości trasy propagacji na ten rozrzut. Wraz ze wzrostem długości trasy propagacji zaobserwowano większe odchylenie od danych pomiarowych wartości tłumienia propagacyjnego obliczonego za pomocą modelu COST 231 Walfisha – Ikegami (LOS). Tak więc proponuje się wprowadzenie dodatkowego funkcyjnego współczynnika korekcyjnego w modelu COST 231 Walfisha – Ikegami (LOS) o postaci:

$$WK(h_{LOS}, (1/2d), d) = A + B \cdot \lg d [km] + C \cdot \lg h_{LOS}, (1/2d) [m], \quad (4.4)$$

gdzie:

$$h_{LOS}, (1/2d) = \frac{h_b + h_a}{2}, \quad (4.5)$$

wyznacza położenie punktu znajdującego się na linii widoczności anten łącza radiowego, w połowie trasy propagacji, względem (płaskiej) powierzchni ziemi.

Oraz

h_b - wysokość wzniesienia anteny stacji bazowej w [m],

h_a - wysokość wzniesienia anteny stacji abonenckiej w [m],

A - stała,

B, C - współczynniki regresji,

Biorąc pod uwagę klasyczną postać wyrażenia na tłumienie propagacyjne w warunkach LOS, określone zależnością (3.1), możemy wyznaczyć postać korekcyjnego współczynnika funkcyjnego poprzez analizę regresji następującej funkcji błędu:

$$\Delta L = L_{pom} - L_{COSTW-I,LOS} = A + B \cdot \lg d [km] + C \cdot \lg h_{LOS,(1/2d)} [m] \quad (4.6)$$

Przeprowadzona w tym zakresie analiza regresji metodą najmniejszych kwadratów, przy założonym poziomie ufności równym 95% daje następujące rezultaty, które zostały zebrane w tab. 4.8. Poziom prawdopodobieństwa dla testu t równy zero wskazuje, że współczynniki regresji są istotnie różne od zera. Wyznaczone zaokrąglone wartości współczynników regresji są następujące:

$$A = 8,478 \text{ (stała)}$$

$$B = - 3,85$$

$$C = - 6,64$$

Tab. 4.8. Współczynniki regresji i ich istotność dla funkcji błędu (4.6), sytuacje LOS.

Zmienne	Współczynniki regresji	Błąd standardowy	Test t	Poziom prawdopodobieństwa dla testu t
Stała: A	8,478265	0,561135	15,10913	0
lg d	-3,85054	0,161527	-23,8384	0
lg h _{LOS,(1/2d)}	-6,63985	0,382867	-17,3424	0

Poniżej została przedstawiona ogólna ocena przyjętego modelu regresji (tab.4.9).

Tab. 4.9. Ogólna ocena modelu regresji dla funkcji błędu (4.6), sytuacje LOS.

Współczynnik korelacji R	0,444152
Współczynnik determinacji R ²	0,197271
Skorygowany współczynnik determinacji R ²	0,197083
Błąd standardowy	3,351172
Ilość obserwacji	8556
Statystyka testowa istotności regresji F	25161,54
Poziom prawdopodobieństwa dla F : p	0

Poziom prawdopodobieństwa statystyki testowej F Snecodera-Fishera jest równy zero, co potwierdza, że model regresji jest istotny.

Zatem, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w sytuacji LOS model COST 231 Walfisha – Ikegamiego (LOS) można zmodyfikować, dodając do klasycznej jego formy nowy funkcyjny współczynnik korekcyjny o postaci:

$$WK(h_{LOS,(1/2d)}, d) = 8,478 - 3,85 \cdot \lg d [km] - 6,64 \cdot \lg h_{LOS} [m] \quad (4.7)$$

Tak więc nowa postać modelu COST 231 Walfisha – Ikegami po wprowadzeniu współczynnika korekcyjnego przyjmuje postać:

$$L_{LOS,SD} [dB] = 51,08 + 20 \cdot \lg f [MHz] + 22,15 \cdot \lg d [km] - 6,64 \cdot \lg h_{LOS,(1/2d)} [m] \quad (4.8)$$

Ocena przydatności projektowej zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha – Ikegami po zastosowaniu funkcyjnego współczynnika korekcyjnego, dla warunków LOS w systemach dostępowych jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi **74,63%**
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi **0,000 dB**
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi **3,351 dB**

Wyniki oceny zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha – Ikegami (LOS) wskazują jednoznacznie na zwiększenie dokładności szacowania tłumienia propagacyjnego zarówno w stosunku do jego formy klasycznej, jak i zmodyfikowanego modelu wolnej przestrzeni dla sytuacji LOS.. Podkreślić należy, że modyfikacja polegająca wyłącznie na określeniu nowych współczynników liczbowych dałaby postać wyrażenia analitycznego identyczną z zależnością (4.2), ponieważ jak już wspomniano modele te są opisane takimi samymi zmiennymi niezależnymi, wyrażonymi poprzez częstotliwość f oraz długość trasy propagacji d .

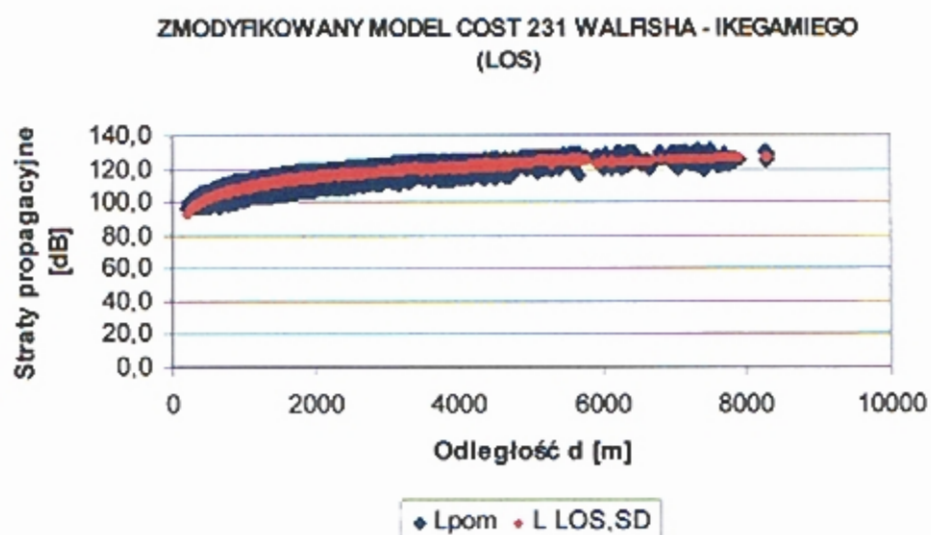
W porównaniu z klasyczną formą modelu COST 231 Walfisha – Ikegami (LOS) uzyskano znaczące zmniejszenie błędów średniego i standardowego estymacji wyrażonych odpowiednio zależnościami (2.1) i (2.2), co przedstawiono w tab. 4.10.

Tab. 4.10. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha – Ikegami, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, sytuacje LOS.

LOS	Zmodyfikowany model COST 231 Walfisha – Ikegami – zależność (4.8)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	0,000 (-2,854)	3,351 (4,704)	8556

W nawiasach podano wartości błędów dla modelu Walfisha – Ikegami (LOS) wyrażonego zależnością (3.3), a więc klasycznej jego formy.

Pomierzone i obliczone za pomocą zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha-Ikegami (LOS), wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych, przedstawiono graficznie na rys. 4.3.



Rys. 4.3. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha – Ikegami (LOS) – sytuacja LOS.

Oznaczenia: Lpom – wartości pomierzone; L LOS,SD – wartości obliczone wg zależności (4.8).

Ponadto, w tab. 4.11 zestawiono wartości poszczególnych błędów z podziałem na stacje bazowe.

Tab. 4.11. Zestawienie błędów średniego: (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha – Ikegami (LOS), w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z podziałem na stacje bazowe – sytuacja LOS.

	Stacja bazowa	Zm. model COST 231 Walfisha-Ikegami (LOS) zależność (4.8)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	
LOS	GDA01	0,015 (-4,252)	2,795 (5,186)	2068
	GDY01	-3,157 (-4,893)	4,507 (5,964)	265
	GDY02	-1,823 (-1,960)	4,209 (4,636)	466
	GDY03	0,205 (-6,432)	2,777 (7,005)	499
	KRA01	1,610 (-1,856)	3,042 (3,475)	1392
	KRA02	0,365 (-1,509)	3,006 (3,779)	961
	KRA03	1,100 (-0,499)	2,862 (2,891)	716
	POZ01	-0,885 (-2,574)	3,929 (4,808)	1358
	POZ02	-0,587 (-2,792)	4,124 (5,159)	831

W nawiasach podano wartości błędów dla modelu Walfisha – Ikegami (LOS) wyrażonego zależnością (3.3), a więc klasycznej jego formy.

Uwzględniając podział na stacje bazowe, zastosowanie nowego funkcyjnego współczynnika korekcyjnego, pozwala na poprawę szacowania tłumienia propagacyjnego za pomocą modelu COST 231 Walfisha – Ikegami w warunkach LOS. We wszystkich

przypadkach błędy standardowe estymacji zmniejszyły się, co świadczy o lepszej przystawalności modelu do danych pomiarowych.

4.2.2. Zmodyfikowany model ITU-R P.1411

W zaleceniu ITU-R P.1411, jak już napisano, przedstawiono dwa modele do szacowania tłumienia propagacyjnego w warunkach LOS, czyli model ITU-R P.1411 $L_{LOS,L}$ określony zależnością (3.5) oraz model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ określony zależnością (3.6). Ponadto każdy z tych modeli składa się z dwóch rozróżnialnych odcinków tras propagacji w stosunku do punktu tzw. „breakpoint”. Pierwsza część odnosi się do przypadków, dla których trasa propagacji jest krótsza lub równa w stosunku do punktu „breakpoint”, drugi zaś stanowi sytuację przeciwną, czyli trasa propagacji przekracza punkt „breakpoint”. W warunkach systemów dostępowych, gdzie anteny stacji abonenckich umieszczone są na dachach budynków, poczynając od budynków jednokondygnacyjnych, przypadek tras dłuższych w stosunku do punktu „breakpoint” spotykany jest sporadycznie, co w zebranych materiale badawczym nie wystąpiło ani razu. Dlatego też dalsze rozważania dotyczą przypadków dla których długości tras propagacji są krótsze od punktu „breakpoint”. W takiej sytuacji modele przedstawione w zaleceniu ITU-R P.1411 można zapisać następująco:

$$L_{LOS,L} = L_{bp} + 20 \lg \left(\frac{d}{R_{bp}} \right), \quad (4.9)$$

$$L_{LOS,U} = L_{bp} + 20 + 25 \lg \left(\frac{d}{R_{bp}} \right), \quad (4.10)$$

gdzie dla przypomnienia $R_{bp} \approx \frac{4h_b h_a}{\lambda}$, natomiast $L_{bp} = \left| 20 \lg \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_b h_a} \right) \right| [dB]$, co wyraża wartości tłumienia propagacyjnego w punkcie R_{bp} , zaś d reprezentuje długość łącza radiowego [m], λ - długość fali w [m], a h_b - wysokość wzniesienia anteny stacji bazowej [m]. Mając powyższe na uwadze można dodatkowo przekształcić zależność (4.9), do następującej postaci:

$$L_{LOS,L} = 20 \lg \frac{\lambda}{2\pi} + 20 \lg d \quad (4.11)$$

Tak więc, biorąc pod uwagę zapis (4.11) tłumienie propagacyjne $L_{LOS,L}$ łącza radiowego wyrażone jest poprzez długość trasy propagacji d i długość fali radiowej λ , która jest bezpośrednio powiązana z częstotliwością zgodnie ze znaną zależnością:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (4.12)$$

gdzie c jest prędkością rozchodzenia się fali radiowej w środowisku propagacji (w próżni $c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

Rozpatrując postać modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,L}$ w warunkach systemów dostępowych, która zależy wyłącznie od częstotliwości fali radiowej f oraz długości trasy propagacji d , zauważamy, że przedstawienie zmodyfikowanej jego postaci poprzez korekcyjne współczynniki liczbowe nie wniesie nic nowego. Wyniki oceny tego modelu będą więc identyczne w stosunku do zmodyfikowanego modelu wolnej przestrzeni. W dalszej części niniejszego rozdziału obiektem analizy będzie zatem drugi ze wspomnianych tu modeli, czyli model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$.

Jak pokazała przeprowadzona, we wcześniejszej części niniejszej rozprawy, analiza przydatności projektowej modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$, model ten w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w zakresie zebranego materiału pomiarowego i powiązanych z nim parametrów konstrukcyjnych łączy radiowych, wykazuje dobrą przydatność projektową. Charakteryzuje się on niewielkim błędem średnim szacunku tj. 0,373 dB oraz błędem standardowym estymacji równym 3,472 dB. Obliczony dla tego modelu współczynnik determinacji wg zależności (2.3) wynosi 73,18 %. Poprzez jego dodatkowe zmodyfikowanie drogą analizy regresji, można uzyskać zmniejszenie błędów oraz zwiększenie współczynnika determinacji.

Zatem, przekształcając wyrażenie (4.10) otrzymujemy:

$$L_{LOS,U} = 20 \lg \frac{\lambda}{2\pi} + 20 + 25 \lg d - 5 \lg R_{bp}. \quad (4.13)$$

Przeprowadzając następnie wielowymiarową analizę regresji następującej funkcji błędu:

$$\Delta L(WK(d[m], R_{bp}[m])) [dB] = L_{pom} - 20 \lg \frac{\lambda}{2\pi} - 20 = A + B \lg d[m] + C \lg R_{bp}[m] \quad (4.14)$$

gdzie dodatkowo A reprezentuje stałą, natomiast B i C są współczynnikami regresji, otrzymamy statystyki regresji, które zostały zestawione w tab. 4.12.

Tab. 4.12. Współczynniki regresji i ich istotność dla zmodyfikowanego modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$

Zmienne	Współczynniki regresji	Błąd standardowy	Test t	Poziom prawdopodobieństwa dla testu t
Stała: A	77,84536411	0,858918755	90,63181	0
$\lg d$	21,48765651	0,136615207	157,286	0
$\lg R_{bp}$	-4,502751608	0,206281228	-21,8282	0

Poziom prawdopodobieństwa dla testu t równy zero wskazuje, że współczynniki regresji są istotnie różne od zera. Wyznaczone, zaokrąglone wartości współczynników regresji wynoszą odpowiednio:

$$A = 77,845 \text{ (stała)}$$

$$B = 21,49$$

$$C = -4,5$$

Poniżej, w tab. 4.13 przedstawiono ogólną ocenę przyjętego modelu regresji. Poziom prawdopodobieństwa statystyki testowej F Snecodera-Fishera równy jest zero co potwierdza, że model regresji jest istotny.

Tak więc zmodyfikowana forma modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ przyjmuje postać:

$$L_{LOS,U,zm}[dB] = 97,845 + 20 \cdot \lg \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} + 21,49 \cdot \lg d_{[m]} - 4,5 \cdot \lg R_{bp}[m] \quad (4.15)$$

Tab. 4.13. Ogólna ocena modelu regresji dla zmodyfikowanego modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$.

Współczynnik korelacji R	0,866720575
Współczynnik determinacji R^2	0,751204556
Skorygowany współczynnik determinacji R^2	0,751146378
Błąd standardowy	3,318405709
Ilość obserwacji	8556
Statystyka testowa istotności regresji F	12912,32
Poziom prawdopodobieństwa dla F : p	0

Ocena przydatności zmodyfikowanego modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ po zastosowaniu liczbowych współczynników korekcyjnych, dla warunków LOS w systemach dostępowych, jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi **75,11%**
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi **0,000 dB**
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi **3,318 dB**

W porównaniu z klasyczną formą modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ uzyskano zmniejszenie poszczególnych błędów, szczególnie błędu średniego, co zostało przedstawione w tab. 4.14.

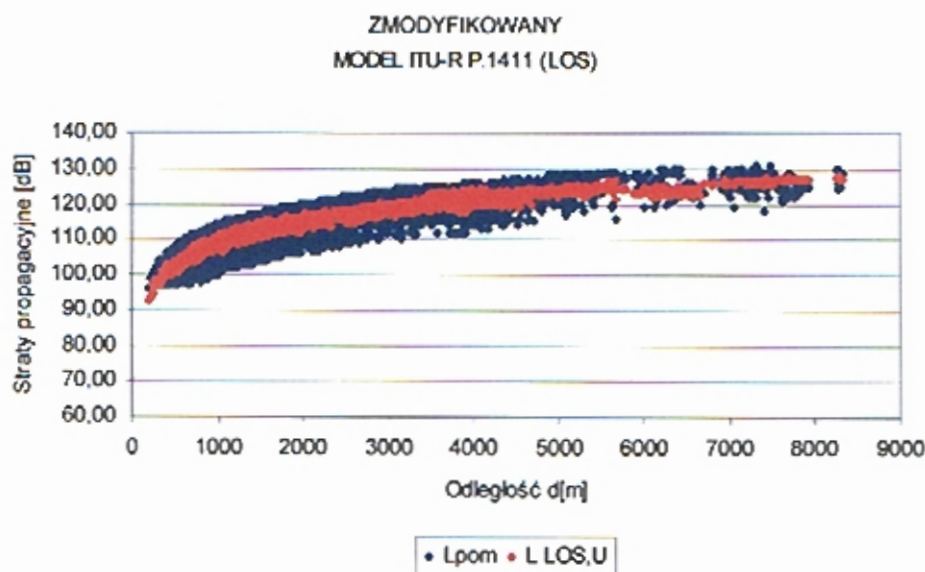
Tab. 4.14. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla zmodyfikowanego modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – sytuacji LOS.

LOS	Zm. model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ zależność (4.15)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SEE [dB]	
	0,000 (0,373)	3,318 (3,472)	8556

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznego modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$, wyrażonego zależnością (3.6).

Natomiast współczynnik determinacji, zależność (2.4), dla zmodyfikowanego modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$, w porównaniu z formą klasyczną tego modelu wzrósł o ok. 2%, co stanowi niewątpliwą korzyść.

Pomierzone i obliczone za pomocą zmodyfikowanego modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$, wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych, przedstawiono graficznie na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla zmodyfikowanego modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ – sytuacji LOS.

Oznaczenia: Lpom – wartości pomierzone; $L_{LOS,U}$ – wartości obliczone wg zależności (4.15).

Poniżej, w tab. 4.15 zostały przedstawione wartości poszczególnych błędów z podziałem na stacje bazowe.

Tab. 4.15. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla zmodyfikowanego modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe – sytuacje LOS.

	Stacja bazowa	Zm. model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ zależność (4.15)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	
LOS	GDA01	-0,160 (-0,353)	2,775 (2,924)	2068
	GDY01	-3,046 (-1,843)	4,419 (3,843)	265
	GDY02	-2,313 (-0,394)	4,509 (4,310)	466
	GDY03	-0,067 (-1,234)	2,775 (2,991)	499
	KRA01	1,552 (1,380)	2,884 (3,019)	1392
	KRA02	0,653 (1,045)	2,931 (3,374)	961
	KRA03	1,330 (1,962)	2,886 (3,324)	716
	POZ01	-0,748 (0,311)	3,881 (4,013)	1358
	POZ02	-0,520 (0,553)	4,070 (4,276)	831

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznego modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$, wyrażonego zależnością (3.6).

Analizując wartości błędów dla poszczególnych stacji bazowych można stwierdzić, że modyfikacja modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$ spowodowała zmniejszenie błędów standardowych estymacji (najważniejszych z punktu widzenia dopasowania modelu) prawie we wszystkich przypadkach. Tylko w przypadku jednej stacji bazowej GDY01 błąd ten wzrósł o ok. 0,5 dB. Dla pozostałych stacji bazowych błędy te zmniejszyły się.

4.3. Opis w warunkach NLOS

Badania przydatności modeli propagacyjnych przeznaczonych do stosowania w sytuacjach gdy nie jest znana informacja o spełnieniu warunku LOS wykazały bardzo małą przydatność projektową tych modeli, co opisano w rozdziale 3.4.3. Wartości poszczególnych błędów były na tyle duże, że należy uznać nikłą przydatność tych modeli do projektowania systemów dostępowych w mieście. Tak więc postanowiono zmodyfikować ich klasyczne formy aby polepszyć jakość szacowania tłumienia propagacyjnego w warunkach NLOS.

4.3.1. Zmodyfikowany model Okumury–Haty

Jak wiadomo klasyczną formę modelu Okumury – Haty opisują zależności (3.9) – (3.11). Mając na uwadze, że badania tłumienia propagacyjnego wykonane zostały na terenie tzw. „dużych miast” i dla częstotliwości powyżej 400 MHz. Należy w takich przypadkach

zastosować poprawkę wynikającą z wysokości zawieszenia anteny stacji abonenckiej określoną zależnością (3.11).

W celu modyfikacji tego modelu wykonano analizę regresji następującej funkcji błędu:

$$\Delta L = L_{pom} - 26,16 \lg f_{[MHz]} = A[\lg h_b[m]; \lg h_b[m] \lg d[km]; \lg d[km]; (\lg 11,75 h_a[m])^2] \quad (4.16)$$

gdzie wielkości występujące w powyższym wzorze są takie same jak w przypadku formy klasycznej. Biorąc pod uwagę opis modelu Okumury-Haty wyrażony zależnościami (3.9) i (3.11) oraz mając na uwadze wyrażenie (4.16), funkcja regresji przyjmuje postać:

$$\Delta L = A + B \lg h_b[m] + C \lg h_b[m] \lg d[km] + D \lg d[km] + E (\lg 11,75 h_a[m])^2 \quad (4.17)$$

gdzie A reprezentuje wartość stałą, natomiast B, C, D, E są współczynnikami regresji.

W analizowanych warunkach przeprowadzono analizę regresji metodą najmniejszych kwadratów, przy założonym poziomie ufności równym 95%, co dało następujące rezultaty, zebrane w tab. 4.16.

Tab. 4.16. Współczynniki regresji i ich istotność dla zmodyfikowanego modelu Okumury-Haty.

Zmienne	Współczynniki regresji	Błąd standardowy	Test t	Poziom prawdopodobieństwa dla testu t
Stała: A	73,8048	1,532386	48,16332	0
$\lg h_B$	-16,6588	0,858017	-19,4154	0
$\lg h_B \lg d$	-1,0047	1,59324	-0,6306	0,528307
$\lg d$	22,02324	2,696204	8,168241	0
$(\lg 11,75 h_b)^2$	-3,78591	0,099799	-37,9355	0

Poziom prawdopodobieństwa dla testu t bliski zeru wskazuje, że dla większości zmiennych współczynniki regresji są istotnie różne od zera. W jednym przypadku dla zmiennej $\lg h_B \lg d$ wynosi ok. 0,53. Oznacza to, że współczynnik regresji nie jest w tym przypadku istotny na założonym poziomie istotności 0,05. Jednakże przeprowadzona dodatkowa analiza bez uwzględnienia tej zmiennej wykazała, że zmienną tą należy przyjąć w opisie modelu. Zaokrąglone wartości współczynników regresji wynoszą odpowiednio:

A=73,8 (stała)

B= -16,66

C= -1

D= 22

E= -3,79

Poniżej, w tab. 4.17 została przedstawiona ogólna ocena przyjętego modelu regresji.

Tab. 4.17. Ogólna ocena modelu dla funkcji błędu (4.17).

Współczynnik korelacji R	0,595031
Współczynnik determinacji R ²	0,354062
Skorygowany współczynnik determinacji R ²	0,353925
Błąd standardowy	7,965116
Ilość obserwacji	18924
Statystyka testowa istotności regresji F	2592,55
Poziom prawdopodobieństwa dla F : p	0

Poziom prawdopodobieństwa statystyki testowej F Snecodera-Fishera jest równy zero, co potwierdza, że model regresji jest istotny.

Zmodyfikowane wyrażenie na tłumienie propagacyjne w systemach dostępowych modelu Okumury - Haty przyjmuje postać

$$L_{O-H, zm}[dB] = 73,8 + 26,16 \lg f + (22 - 11 \lg h_b) \lg d - 16,66 \lg h_b - a(h_a), \quad (4.18)$$

gdzie:

$$a(h_a) = 3,79(\lg 11,75h_a)^2. \quad (4.19)$$

Wysokości zawieszenia anten oraz długość trasy propagacji we wzorach (4.18) i (4.19) występują w takich samych jednostkach jak dla klasycznej formy modelu Okumury – Haty.

Ocena przydatności zmodyfikowanego modelu Okumury-Haty do zastosowania w systemach dostępowych jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi **35,39%**
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi **0,000 dB**
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi **7,964 dB**

Natomiast w tab. 4.18 zestawiono miary oceny zmodyfikowanego modelu, czyli błąd: średni i standardowy estymacji.

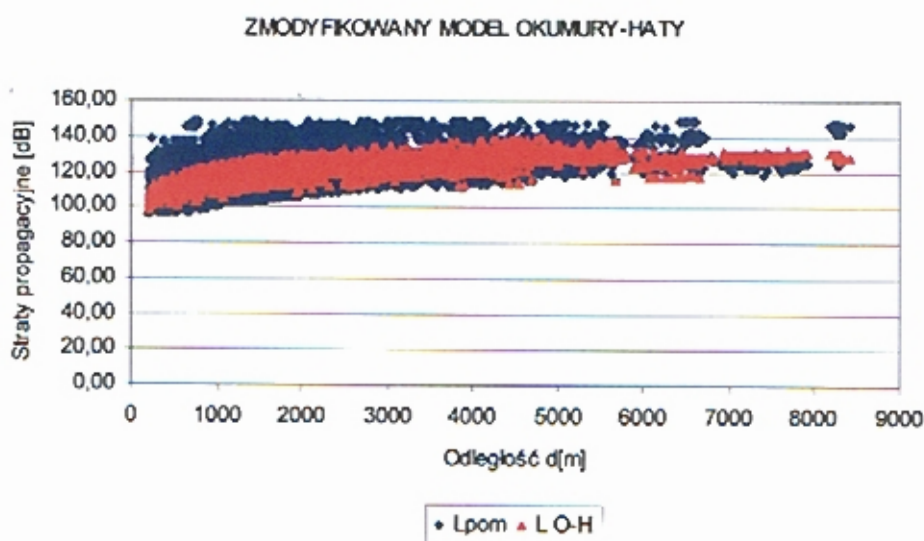
Tab. 4.18. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla zmodyfikowanego modelu Okumury – Haty, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Zmodyfikowany model Okumury-Haty zależności (4.18) i (4.19)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	0,000 (-11,784)	7,964 (14,904)	18924

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu Okumury – Haty, wyrażonej zależnościami (3.9) i (3.11).

Poprzez modyfikację klasycznej formy modelu Okumury – Haty uzyskano znaczne zmniejszenie błędu średniego i błędu standardowego estymacji, przy współczynniku determinacji modelu równym 35,42%.

Poniżej na rys. 4.5 przedstawiono graficznie obliczone wartości tłumienia propagacyjnego za pomocą zmodyfikowanej formy modelu Okumury - Haty oraz wartości pomierzone w zależności od długości tras propagacji.



Rys. 4.5. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla zmodyfikowanego modelu Okumury - Haty – wszystkie dane pomiarowe.

Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; $L_{O-H, zm}$ – wartości obliczone wg zależności (4.18) i (4.19).

W porównaniu z rys. 3.12, gdzie przedstawiono rozrzut tłumienia propagacyjnego dla klasycznej formy modelu Okumury- Haty, można stwierdzić, że zmodyfikowany model Okumury - Haty znacznie lepiej przystaje do danych pomiarowych. Model ten został również

zmodyfikowany pod kątem innej klasyfikacji obszarów dla terenów otwartych, co opublikowano w [37]

W tab. 4.19 i tab. 4.20 zestawione zostały wartości poszczególnych błędów w odniesieniu do typu obszarów, na których zlokalizowane były anteny stacji abonenckich.

Tab. 4.19. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla zmodyfikowanego modelu Okumury – Haty, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – obszar typu I.

OBSZAR TYPU I	Zmodyfikowany model Okumury- Haty zależności (4.18) i (4.19)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	0,596 (-10,813)	7,683 (13,986)	11804

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu Okumury - Haty.

Tab. 4.20. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla zmodyfikowanego modelu Okumury – Haty, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – obszar typu II.

OBSZAR TYPU II	Zmodyfikowany model Okumury-Haty zależności (4.18) i (4.19)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	-0,992 (-13,444)	8,411 (16,353)	7120

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu Okumury - Haty.

W zależności od typu obszaru, na którym zlokalizowane były stacje abonenckie zmodyfikowany model Okumury – Haty nieznacznie niedoszacowuje tłumienie propagacyjne w obszarach typu I, czyli o gęstej zabudowie. Natomiast nieznacznie przeszacowuje to tłumienie w obszarach typu II, czyli o niezbyt gęstej zabudowie typu osiedlowego. Podsumowując, przy klasyfikacji uwzględniającej typ obszaru błąd średni nie przekracza wartości +/- 1 dB. W przypadku lokalizacji stacji abonenckich na obszarach typu I obserwuje się mniejszy błąd standardowy estymacji, co świadczy o lepszym dopasowaniu zmodyfikowanego modelu do danych pomiarowych na tych obszarach.

W następnej kolejności została przeprowadzona ocena dopasowania do danych pomiarowych zmodyfikowanego modelu Okumury-Haty z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe (tab. 4.21). Zmodyfikowany model Okumury – Haty, przy uwzględnieniu podziału danych pomiarowych na poszczególne stacje bazowe, także umożliwia dokładniejsze szacowanie tłumienia propagacyjnego w porównaniu z formułą klasyczną. Uzyskano zmniejszenie błędów zarówno średnich jak i standardowych dla każdej ze stacji bazowych.

Błędy: średni oraz standardowy estymacji zmniejszyły się znacząco. Niemniej błąd standardowy estymacji waha się w zakresie od 4,904 dB do 13,813 dB.

Tab. 4.21. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla zmodyfikowanego modelu Okumury-Haty, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe – wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Stacja bazowa	Model Okumury-Haty zależność (4.18) i (4.19)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	
	GDA01	0,421 (-14,125)	8,389 (16,631)	3441
GDY01	0,205 (-9,460)	10,624 (14,187)	620	
GDY02	-1,017 (-6,694)	13,813 (15,318)	900	
GDY03	1,331 (-16,863)	7,375 (18,334)	624	
KRA01	-0,208 (-14,459)	4,904 (15,350)	3814	
KRA02	1,424 (-9,495)	8,153 (12,787)	3180	
KRA03	-2,404 (-13,311)	5,442 (14,296)	1774	
POZ01	-0,808 (-8,790)	8,899 (14,700)	2630	
POZ02	-0,745 (-9,833)	8,194 (13,954)	1438	
POZ03	4,865 (-11,500)	7,003 (12,751)	552	

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu Okumury - Haty.

4.3.2. Zmodyfikowany model COST 231 Haty

Klasyczna forma tego modelu jest opisana zależnościami (3.14) – (3.16). Przekształcając wyrażenia (3.14) – (3.16) w taki sposób, by od zmiennej zależnej odjąć składniki związane z częstotliwością fali radiowej, określono następującą funkcję błędu:

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_{pom} - 33,9 \lg f[\text{MHz}] + 1,1 h_a \lg f[\text{MHz}] - 1,56 \lg f + 0,8 - C = \\ &= A(\log h_b[m]; \lg h_b[m]; \lg d[km]; \lg d[km]; h_a[m]) \end{aligned} \quad (4.20)$$

gdzie wszystkie oznaczenia występujące w powyższym wzorze są takie same jak w przypadku formy klasycznej. Tak więc, funkcja regresji przyjmuje postać:

$$\Delta L = A + B \lg h_b[m] + D \lg h_b[m] \lg d[km] + E \lg d[km] + F h_a[m] \quad (4.21)$$

gdzie A reprezentuje wartość stałą, natomiast B, D, E i F są współczynnikami regresji.

Następnie wykonano analizę regresji funkcji określonej zależnością (4.21), przy założonym poziomie ufności równym 95%, co daje rezultaty zestawione w tab. 4.22. Poziom prawdopodobieństwa dla testu t bliski zeru wskazuje, że współczynniki regresji są istotnie różne od zera. Po zaokrągleniu wartości współczynników regresji odpowiednio wynoszą:

$$A = 20,6 \text{ (stała)}$$

$$B = - 10,42$$

D= - 4,82

E= 28,15

F= 3,14

Tab. 4.22. Współczynniki regresji i ich istotność dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Haty.

Zmienne	Współczynniki regresji	Błąd standardowy	Test t	Poziom prawdopodobieństwa dla testu t
Stała: A	20,60387	1,432709	14,38106	0
h_a	3,14097	0,01369	229,4397	0
$lgh_B lgd$	-4,81936	1,593409	-3,02456	0,002493
lgh_B	-10,4194	0,855622	-12,1775	0
lgd	28,15309	2,696426	10,44089	0

Poniżej w tab. 4.23 przedstawiono ogólną ocenę przyjętego modelu regresji funkcji określonej zależnością (4.21).

Tab. 4.23. Ogólna ocena modelu regresji dla funkcji określonej zależnością (4.21).

Współczynnik korelacji R	0,874064
Współczynnik determinacji R ²	0,763989
Skorygowany współczynnik determinacji R ²	0,763939
Błąd standardowy	7,964042
Ilość obserwacji	18924
Statystyka testowa istotności regresji F	15310,61
Poziom prawdopodobieństwa dla F : p	0

Poziom prawdopodobieństwa statystyki testowej F Snecodera-Fishera jest równy zero, co potwierdza, że model regresji jest istotny.

Zmodyfikowane wyrażenie modelu COST 231 Haty do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w systemach dostępowych przyjmuje postać:

$$L_{C-H,zm} [dB] = 20,6 + 33,9 \lg f + (28,15 - 4,82 \lg h_b) \lg d + -10,82 \lg h_b - a(h_a) + C \quad (4.22)$$

gdzie:

$$a(h_a) = (1,1 \lg f - 3,14) h_a - (1,56 \lg f - 0,8), \quad (4.23)$$

zaś stała C ma takie samo znaczenie jak w formie klasycznej tego modelu.

Ocena przydatności zmodyfikowanego modelu COST 231 Haty, określonego zależnościami (4.22) i (4.23) jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi **35,42%**
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi **- 0,002 dB**
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi **7,963 dB**

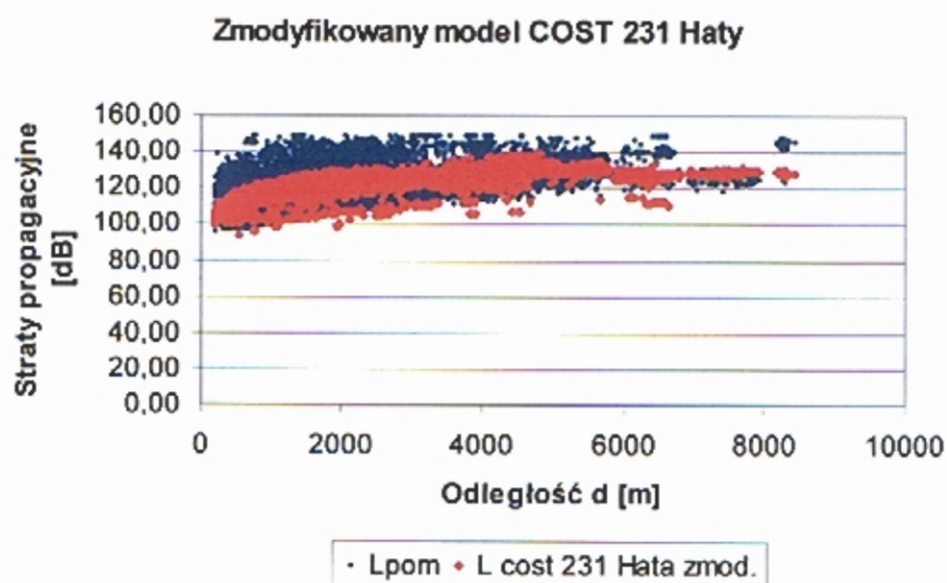
Jak to wynika z tab. 4.24, uzyskano znaczne zmniejszenie błędu średniego i błędu standardowego estymacji, przy współczynniku determinacji modelu równym 35,42%.

Tab. 4.24. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Haty, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Zmodyfikowany model COST 231 Haty zależności (4.22) i (4.23)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	-0,002 (7,974)	7,963 (16,178)	18924

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu COST 231 Haty.

Poniżej na rys. 4.6, przedstawiono graficznie wartości tłumienia propagacyjnego: obliczone za pomocą zmodyfikowanej formy modelu COST 231 Haty oraz wartości pomierzone, w zależności od długości tras propagacji.



Rys. 4.6. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Haty – wszystkie pomiary

Oznaczenia: Lpom – wartości pomierzone; Lcost231 Hata zmod – wartości obliczone wg zależności (4.22) i (4.23).

W porównaniu z rys. 3.13, gdzie przedstawiono rozrzut tłumienia propagacyjnego dla klasycznej formy modelu COST 231 Haty, można stwierdzić, że zmodyfikowany model COST 231 Haty znacznie lepiej przystaje do danych pomiarowych.

Poniżej w tab. 4.25 i 4.26 zestawiony obliczone wartości poszczególnych błędów modelu zmodyfikowanego, z uwzględnieniem typu obszaru, na którym zlokalizowane były anteny stacji abonenckich.

Tab. 4.25. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Haty, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – obszar typu I.

OBSZAR TYPU I	Zmodyfikowany model COST 231 Haty zależności (4.22) i (4.23)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	-0,419 (9,899)	7,667 (15,524)	11804

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu COST 231 Haty.

Tab. 4.26. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Haty, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – obszar typu II.

OBSZAR TYPU II	Zmodyfikowany model COST 231 Haty zależności (4.22) i (4.23)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	0,686 (5,137)	8,432 (17,887)	7120

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu COST 231 Haty.

Obliczając tłumienie propagacyjne wg nowych zależności, także w przypadku podziału na typ obszaru błędy szacowania tego tłumienia zmniejszyły się, z tym że w obszarach typu I, a więc o gęstej zabudowie, model zmodyfikowany nieznacznie przeszacowuje tłumienie propagacyjne. Natomiast w obszarach typu II, czyli obszarach o niezbyt gęstej zabudowie zmodyfikowany model jest modelem nieznacznie optymistycznym.

Natomiast zestawienie błędów szacowania tłumienia propagacyjnego z uwzględnieniem klasyfikacji na stacje bazowe przedstawiono w tab. 4.27.

Uwzględniając klasyfikację na poszczególne stacje bazowe można zauważyć, że poprzez zastosowanie zmodyfikowanej zależności COST 231 Haty, uzyskuje się zwiększenie dokładności szacowania tłumienia propagacyjnego. Błąd średni waha się od wartości $-2,332$ dB do $6,602$ dB, natomiast błąd standardowy estymacji od $4,409$ dB do $13,882$ dB.

Tab. 4.27. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Haty, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe – wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Stacja bazowa	Zmodyfikowany model COST 231 Haty zależność (4.22) i (4.23)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	
	GDA01	0,778 (2,386)	8,508 (13,591)	3441
GDY01	1,920 (12,434)	11,049 (20,496)	620	
GDY02	2,038 (10,043)	13,832 (20,807)	900	
GDY03	2,877 (3,765)	7,813 (20,580)	624	
KRA01	1,093 (3,031)	4,409 (13,665)	3814	
KRA02	1,685 (11,004)	8,058 (14,324)	3180	
KRA03	-2,332 (6,404)	5,395 (9,084)	1774	
POZ01	-0,639 (14,874)	8,826 (21,035)	2630	
POZ02	-1,524 (13,345)	8,304 (19,576)	1438	
POZ03	6,602 (14,055)	8,746 (18,692)	552	

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu COST 231 Haty.

4.3.3. Zmodyfikowany model Egli

Opis klasycznej formy modelu Egli wyrażona zależność (3.18), która wywodzi się z teoretycznego ujęcia określanego w literaturze anglojęzycznej jako *plane Earth model*. Wychodząc z tej zależności, modyfikację modelu Egli dla potrzeb projektowych w systemach dostępowych przeprowadzono poprzez określenie dodatkowej wartości współczynnika K tzw. *clutter factor*. Wartość tego współczynnika, uwzględniając zależność (3.18) wyznaczono w następującej formie:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (L_{pom,i} - 40 \lg d_{km,i} - 20 \lg f_{MHz} + 20 \lg h_{b_{m,i}} + L_{m,i}), \quad (4.24)$$

gdzie L_m w i-tym łączu radiowym wyrażone jest cytowaną już zależnością:

$$L_m = \begin{cases} 76,3 - 10 \lg h_a, & \text{dla } h_a < 10m, \\ 76,3 - 20 \lg h_a, & \text{dla } h_a \geq 10m. \end{cases}$$

oraz dodatkowo:

$L_{pom,i}$ – i-ta wartość pomierzona tłumienia propagacyjnego w [dB],

N – liczba wykonanych pomiarów.

Dla wszystkich wykonanych pomiarów ($N = 18924$), obliczona w oparciu o zależność (4.24) wartość współczynnika K wynosi

$$K = 20 \text{ dB.}$$

Zatem, nowa zależność, zmodyfikowanego modelu Egli wyrażona jest następującą formułą analityczną:

$$L_{e, zm}[dB] = 40 \lg d[km] + 20 \lg f[MHz] - 20 \lg h_b[m] + L_m \quad (4.25)$$

$$\text{gdzie: } L_m = \begin{cases} 96,3 - 10 \lg h_a & \text{dla } h_a < 10 \text{ m} \\ 96,3 - 20 \lg h_a & \text{dla } h_a \geq 10 \text{ m} \end{cases}$$

h_a – wysokość zawieszenia anteny stacji abonenckiej.

Ocena przydatności zmodyfikowanego modelu Egli po zastosowaniu nowego współczynnika korekcyjnego K dla warunków występujących w systemach dostępowych jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi **18,28%**
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi **-0,001 dB**
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi **10,948 dB**

Poniżej w tab. 4.28 przedstawiono miary oceny zmodyfikowanego modelu Egli dla wszystkich danych pomiarowych.

Tab. 4.28. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), dla zmodyfikowanego modelu Egli, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Zmodyfikowany model Egli zależność (4.25)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	-0,001 (14,514)	10,948 (17,099)	18924

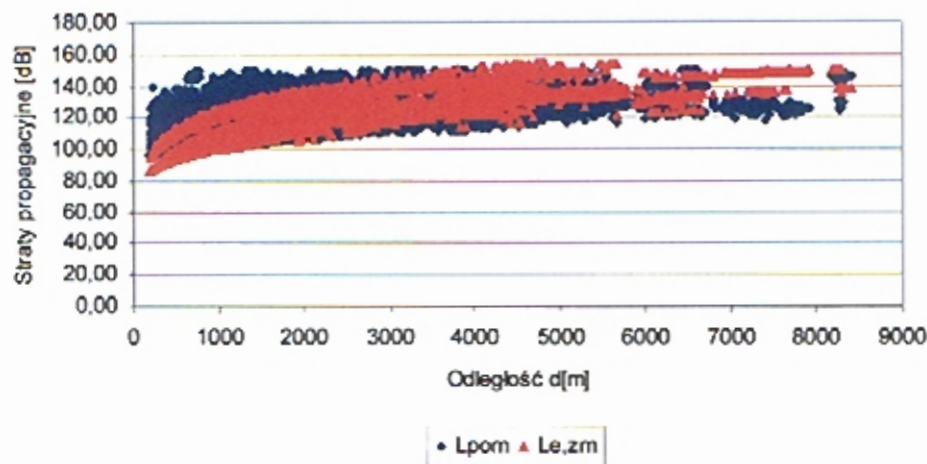
W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu Egli.

Nowa zależność (4.25) znacząco poprawiła dokładność szacowania tłumienia propagacyjnego w radiowych systemach dostępowych w mieście, w porównaniu z formą klasyczną modelu. Błąd średni zmniejszył się o ponad 14,5 dB, a błąd standardowy estymacji o ponad 6 dB.

Na rys. 4.7 przedstawiono ilustrację graficzną obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego za pomocą zmodyfikowanej formuły modelu Egli na tle wartości pomierzonych. Porównując ten rysunek z rys. 3.14 można zauważyć, że zmodyfikowany model lepiej przystaje do danych pomiarowych, niemniej dla mniejszych długości tras propagacji wartości tłumienia propagacyjnego są nadal zaniżane.

W tab. 4.29 zostały przedstawione miary oceny zmodyfikowanego modelu Egli z uwzględnieniem podziału na poszczególne stacje bazowe.

Zmodyfikowany MODEL EGLI



Rys. 4.7. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji, dla zmodyfikowanego modelu Egli - wszystkie dane pomiarowe.

Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; $L_{e,zm}$ – wartości obliczone wg zależności (4.25).

Tab. 4.29. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla zmodyfikowanego modelu Egli, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe – wszystkie dane pomiarowe.

WSZYSTKIE DANE POMIAROWE	Stacja bazowa	Zmodyfikowany model Egli zależność (4.25)		Liczebność próby (N)
		ME [dB]	SEE [dB]	
	GDA01	-4,295 (11,633)	10,781 (14,535)	3441
GDY01	3,039 (15,373)	11,836 (19,025)	620	
GDY02	5,347 (17,025)	16,730 (21,982)	900	
GDY03	-9,898 (6,896)	14,585 (11,210)	624	
KRA01	-5,954 (12,443)	9,707 (14,191)	3814	
KRA02	4,423 (19,119)	9,841 (20,954)	3180	
KRA03	0,508 (15,407)	4,841 (16,211)	1774	
POZ01	5,825 (15,228)	13,116 (17,926)	2630	
POZ02	5,934 (13,534)	12,292 (15,867)	1438	
POZ03	0,046 (19,888)	7,462 (21,194)	552	

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu Egli.

Uwzględnienie podziału na stacje bazowe, w przypadku zmodyfikowanego Egli wypada bardzo niekorzystnie w porównaniu z innymi wcześniej analizowanymi modelami zmodyfikowanymi. Pomimo, że dla większości stacji bazowych uzyskano poprawę wyników błędów to w porównaniu z innymi modelami zmodyfikowanymi przedstawiają się one znacznie gorzej. Szczególnie jest to widoczne dla stacji GDY03. Do zmodyfikowanego

modelu Egli należy więc odnieść się krytycznie i uznać jego małą przydatność w praktyce projektowej.

Należy jednak zaznaczyć, że modyfikacja tego modelu polegała tylko na określaniu nowego współczynnika *clutter factor* [79].

4.3.4. Zmodyfikowany model COST 231 Walfisha – Ikegamiiego (NLOS)

Modyfikację modelu COST 231 Walfisha – Ikegamiiego (NLOS) przeprowadzono dla próby spełniającej warunek NLOS, czyli przy braku bezpośredniej widoczności pomiędzy antenami łącza radiowego. W takiej sytuacji tłumienie propagacyjne wyrażone jest zależnością [12]:

$$L_{WI,NLOS}[dB] = L_{b,wp}[dB] + L_{rts}[dB] + L_{msd}[dB], \quad (4.26)$$

przy czym :

$L_{b,wp}[dB]$ - określone jest równaniem (3.1),

$L_{rts}[dB]$ - wyrażone jest równaniem (3.20), oraz

$L_{msd}[dB]$ - określone jest równaniem (3.25).

W warunkach przeprowadzonych badań pomiarowych, w systemie dostępowym, wszystkie dane pomiarowe spełniają warunek $h_b > h_a$, co sprawia, że w równaniu (3.25), określającym składową $L_{msd}[dB]$, składnik $L_{bsh}[dB]$ wyrażony zależnością (3.26), przyjmuje następującą postać:

$$L_{bsh}[dB] = -18 \lg(1 + h_b - h_s), \quad (4.27)$$

natomiast wartość parametru k_a określony zależnością (3.27) wynosi **54**, zaś wartość parametru k_d określonego zależnością (3.28) wynosi **18**.

Tak więc, dla sytuacji $h_s > h_a$ (NLOS), wyrażenie na tłumienie propagacyjne $L_{WI,NLOS}[dB]$ można zapisać w następujący sposób:

$$\begin{aligned} L_{WI,NLOS,1}[dB] = & 32,4 + 20 \lg f[\text{MHz}] + 20 \lg d[\text{km}] - 16,9 - 10 \lg w[\text{m}] + 10 \lg f[\text{MHz}] + \\ & + 20 \lg(h_s[\text{m}] - h_a[\text{m}]) + L_{ori} - 18 \lg(1 + h_b[\text{m}] - h_s[\text{m}]) + 54 + 18 \lg d[\text{km}] + \\ & - 9 \lg b[\text{m}] + k_f \lg f[\text{MHz}], \end{aligned} \quad (4.28)$$

przy czym :

$$k_f = \begin{cases} 0,7(f[\text{MHz}]/925-1) & \text{dla średnich miast i terenów podmiejskich} \\ 1,5(f[\text{MHz}]/925-1) & \text{dla centrów dużych miast} \end{cases}, \quad (4.29)$$

oraz $L_{ori}[\text{dB}]$ określone jest zależnością (3.21).

Natomiast dla sytuacji $h_s \leq h_a$ (NLOS), wyrażenie na tłumienie propagacyjne $L_{WI,NLOS}[\text{dB}]$ można zapisać w następujący sposób:

$$L_{WI,NLOS,2}[\text{dB}] = 32,4 + 20 \lg f[\text{MHz}] + 20 \lg d[\text{km}] - 18 \lg(1 + h_b[m] - h_s[m]) + 54 + \\ + 18 \lg d[\text{km}] - 9 \lg b[m] + k_f \lg f[\text{MHz}]. \quad (4.30)$$

Przyjmując zgodnie z [29], $b = 35[\text{m}]$, $\varphi = 90^\circ$ oraz $w = \frac{b}{2} = 17,5[\text{m}]$, równanie (4.28) można przekształcić do następującej postaci:

$$L_{WI,NLOS,1}[\text{dB}] = 43,18 + 30 \lg f[\text{MHz}] + 38 \lg d[\text{km}] + 20 \lg(h_s[m] - h_a[m]) + \\ - 18 \lg(1 + h_b[m] - h_s[m]) + k_f \lg f[\text{MHz}], \quad (4.31)$$

zaś równanie (4.30) przyjmuje postać:

$$L_{WI,NLOS,2}[\text{dB}] = 72,5 + 20 \lg f[\text{MHz}] + 38 \lg d[\text{km}] - 18 \lg(1 + h_b[m] - h_s[m]) + \\ + k_f \lg f[\text{MHz}]. \quad (4.32)$$

Zatem, w celu modyfikacji modelu COST 231 Walfisha-Ikegamiego (NLOS) wykonano analizę regresji następujących funkcji błędu ΔL , dla sytuacji $h_s > h_a$:

$$\Delta L = L_{pom} - 30 \lg f[\text{MHz}] - k_f \lg f[\text{MHz}] = A + B \lg d[\text{km}] + C \lg(h_s[m] - h_a[m]) + \\ + D \lg(1 + h_b[m] - h_s[m]), \quad (4.33)$$

oraz dla sytuacji $h_s \leq h_a$:

$$\Delta L = L_{pom} - 20 \lg f[\text{MHz}] - k_f \lg f[\text{MHz}] = A + B \lg d[\text{km}] + D \lg(1 + h_b[m] - h_s[m]), \quad (4.34)$$

gdzie we wzorach (4.33) i (4.34) symbole B , C , D oznaczają współczynniki regresji, zaś A oznacza wartość stałą.

Przeprowadzona analiza regresji metodą najmniejszych kwadratów, przy założonym poziomie ufności równym 95% funkcji błędu określonej równaniem (4.33) daje następujące rezultaty, zebrane w tab. 4.30.

Tab. 4.30. Współczynniki regresji i ich istotność dla funkcji błędu określonej równaniem (4.33).

Zmienne	Współczynniki regresji	Błąd standardowy	Test t	Poziom prawdopodobieństwa dla testu t
Stała: Θ	11,36825	0,723647	15,70965	0
lgd	18,31517	0,332818	55,03063	0
$lg(h_s-h_a)$	1,91171	0,130654	14,63182	0
$lg(1+h_b-h_s)$	2,282569	0,477865	4,776601	0

Poziom prawdopodobieństwa dla testu t równy zero wskazuje, że dla wszystkich zmiennych współczynniki regresji są istotnie różne od zera na przyjętym poziomie ufności równym 95%.

$$A=11,37 \text{ (stała)}$$

$$B=18,315$$

$$C= 1,91$$

$$D= 2,28$$

Ponizej, w tab. 4.31 została przedstawiona ogólna ocena modelu regresji funkcji błędu określonej równaniem (4.33).

Tab. 4.31. Ogólna ocena modelu.

Współczynnik korelacji R	0,654301
Współczynnik determinacji R ²	0,42811
Skorygowany współczynnik determinacji R ²	0,427831
Błąd standardowy	6,849374
Ilość obserwacji	6168
Statystyka testowa istotności regresji F	1538,09
Poziom prawdopodobieństwa dla F : p	0

Poziom prawdopodobieństwa statystyki testowej F Snecodera-Fishera jest równy zero, co potwierdza, że model regresji jest istotny, na przyjętym poziomie ufności równym 95%.

Zmodyfikowane wyrażenie na tłumienie propagacyjne w systemach dostępowych modelu COST 231 Walfisha-Ikegami (NLOS) dla sytuacji $h_s > h_a$ przyjmuje postać:

$$L_{WI,NLOS,1,zm}[dB] = 11,37 + 30 \lg f [MHz] + 18,315 \lg d [km] + 1,91 \lg (h_s [m] - h_a [m]) + 2,28 \lg (1 + h_b [m] - h_s [m]) + k_f \lg f [MHz]. \quad (4.35)$$

Ocena zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha-Ikegami (NLOS) do zastosowania w systemach dostępowych dla sytuacji $h_s > h_a$ jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi **42,78%**

2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi **0,000 dB**
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi **6,848 dB**

Natomiast przeprowadzona dla sytuacji $h_s \leq h_a$, analiza regresji metodą najmniejszych kwadratów, przy założonym poziomie ufności równym 95% funkcji błędu określonej równaniem (4.34) daje następujące rezultaty, zebrane w tab. 4.32.

Tab. 4.32. Współczynniki regresji i ich istotność dla funkcji błędu określonej równaniem (4.34).

Zmienne	Współczynniki regresji	Błąd standardowy	Test t	Poziom prawdopodobieństwa dla testu t
Stała: Θ	50,6986	0,852151	59,49485	0
lgd	17,20766	0,343241	50,13285	0
$lg(1+h_b-h_s)$	-1,95424	0,577493	-3,38401	0,000721

Poziom prawdopodobieństwa dla testu t bliski zeru wskazuje, że dla wszystkich zmiennych współczynniki regresji są istotnie różne od zera, na przyjętym poziomie ufności równym 95%.

$$A=50,7 \text{ (stała)}$$

$$B=17,21$$

$$D=-1,95$$

Poniżej w tab. 4.33 została przedstawiona ogólna ocena modelu regresji funkcji błędu określonej równaniem (4.34).

Tab. 4.33. Ogólna ocena modelu.

Współczynnik korelacji R	0,633209
Współczynnik determinacji R^2	0,400954
Skorygowany współczynnik determinacji R^2	0,400668
Błąd standardowy	6,701274
Ilość obserwacji	4200
Statystyka testowa istotności regresji F	1404,57
Poziom prawdopodobieństwa dla F : p	0

Poziom prawdopodobieństwa statystyki testowej F Snecodera-Fishera jest równy zero, co potwierdza, że model regresji jest istotny, na przyjętym poziomie ufności równym 95%.

Zmodyfikowane wyrażenie na tłumienie propagacyjne w systemach dostępowych modelu COST 231 Walfisha-Ikegamiego (NLOS) dla sytuacji $h_s \leq h_a$ przyjmuje postać:

$$L_{WI, NLOS, 2, zm} [dB] = 50,7 + 20 \lg f [MHz] + 17,21 \lg d [km] - 1,95 \lg (1 + h_b [m] - h_s [m]) + k_f \lg f [MHz]. \quad (4.36)$$

Ocena przydatności zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS), do zastosowania w systemach dostępowych, dla sytuacji $h_s \leq h_a$ jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi **39,99%**
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi **0,000 dB**
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi **6,699 dB**

Natomiast całościowa, tzn. dla $(h_s > h_a \cap h_s \leq h_a)$, ocena zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS), dla próby spełniającej warunek NLOS (liczebność próby $N=10368$) jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi **40,98%**
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi **0,000 dB**
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi **6,788 dB**

Poniżej w tab. 4.34. zestawiono wartości błędu średniego ME oraz błędu standardowego estymacji SEE dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS) dla próby spełniającej warunek NLOS.

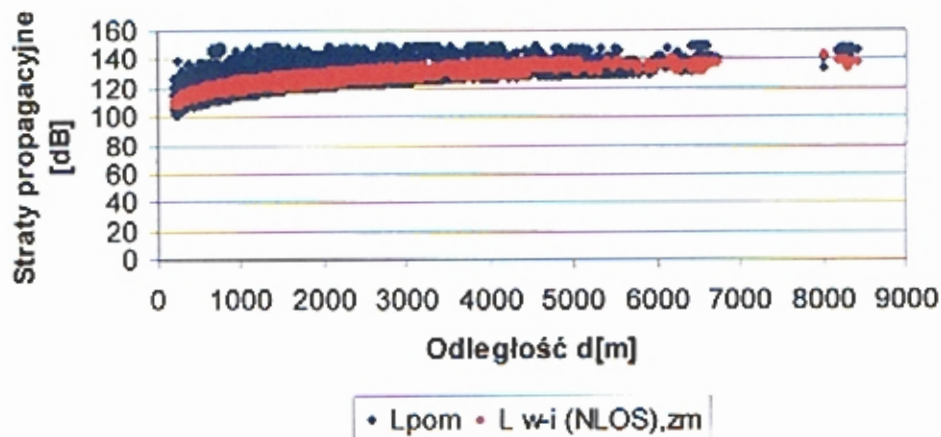
Tab. 4.34. Zestawienie błędów średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS) w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – dane pomiarowe spełniające warunek NLOS.

NLOS	Zmodyfikowany model COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS)		
	zależności (4.35 i 4.36)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	0,000 (5,383)	6,788 (12,281)	10368

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS), dla danych pomiarowych spełniających warunek NLOS.

Na rys. 4.8 przedstawiono graficznie wyniki pomierzone i obliczone tłumienia propagacyjnego dla modelu COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS), w warunkach NLOS.

Zmodyfikowany model COST 231 Walfisha-Ikegamięgo (NLOS)



Rys. 4.8. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacji dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha-Ikegamięgo (NLOS) - dane pomiarowe spełniające warunek NLOS. Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; $L_{w-i(NLOS),zm}$ – wartości tłumienia obliczone wg zależności (4.35) – (4.36).

Z powyższego rysunku wynika, że wartości obliczone wg zależności opisujących analizowany model dość dobrze pokrywają się z wartościami pomierzonymi tłumienia propagacyjnego. W tab. 4.35. zestawiono wyniki błędów z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe.

Tab. 4.35. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SEE), dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha - Ikegamięgo (NLOS), w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z uwzględnieniem podziału na stacje bazowe – dane pomiarowe spełniające warunek NLOS.

Obszar stacji bazowej	Zmodyfikowany model COST 231 Walfisha-Ikegamięgo (NLOS) zależności (4.35 i 4.36)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SSE [dB]	
GDA01	1,802 (14,855)	7,893 (17,464)	1373
GDY01	3,542 (6,877)	8,994 (12,898)	355
GDY02	9,697 (21,799)	14,008 (25,554)	430
GDY03	4,201 (7,672)	6,892 (11,388)	125
KRA01	-2,170 (1,259)	3,678 (5,559)	2422
KRA02	0,079 (3,316)	6,783 (8,817)	2219
KRA03	-4,372 (-1,904)	6,174 (5,501)	1058
POZ01	0,274 (14,191)	6,397 (19,204)	1229
POZ02	-1,504 (13,987)	6,149 (18,110)	605
POZ03	3,370 (-1,168)	6,561 (10,241)	552

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu COST 231 Walfisha-Ikegamięgo (NLOS), dla danych pomiarowych spełniających warunek NLOS.

Jak można zauważyć, analizując wyniki błędów dla większości stacji bazowych, zarówno błędy średnie i błędy standardowe estymacji zmniejszyły się i to w sposób znaczący. Tylko w jednym przypadku błąd standardowy estymacji zwiększył się tj. dla stacji bazowej KRA03.

Uwzględniając dodatkowo klasyfikację danych pomiarowych ze względu na typ obszaru, na którym zlokalizowane były stacje abonenckie, poniżej w tabelach 4.36 oraz 4.37 zestawiono wartości poszczególnych błędów.

Tab. 4.36. Zestawienie błędów średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS) w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – dane pomiarowe spełniające warunek NLOS, obszar typu I.

OBSZAR TYPU I	Zmodyfikowany model COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS): zależności (4.35 i 4.36)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	-1,015 (4,722)	6,109 (11,572)	7095

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS), dla danych pomiarowych spełniających warunek NLOS.

Tab. 4.37. Zestawienie błędów średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla zmodyfikowanego modelu COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS) w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście – dane pomiarowe spełniające warunek NLOS, obszar typu II.

OBSZAR TYPU II	Zmodyfikowany model COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS): zależności (4.35 i 4.36)		
	ME [dB]	SSE [dB]	Liczebność próby (N)
	2,202 (6,822)	8,068 (13,700)	3273

W nawiasach podano wartości błędów dla klasycznej formy modelu COST 231 Walfisha-Ikegamiiego (NLOS), dla danych pomiarowych spełniających warunek NLOS.

Również w przypadku klasyfikacji uwzględniającej typ obszaru lokalizacji stacji abonenckiej zmniejszyły się błędy szacowania tłumienia propagacyjnego za pomocą zmodyfikowanej formy rozpatrywanego modelu.

4.4. Porównawcza analiza przydatności z uwzględnieniem zabudowy

Analiza porównawcza przydatności projektowej zmodyfikowanych modeli szacujących tłumienie propagacyjne została przeprowadzona poprzez porównanie błędów standardowych estymacji. Z oczywistych przyczyn, związanych z zastosowaną metodą regresji do wyznaczania współczynników funkcyjnych i liczbowych, występujących w analitycznym zapisie tych modeli, błąd średni ma mniejsze znaczenie, gdyż dla rozważanych przypadków

równy jest zero lub przyjmuje wartości bliskie zeru. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wszystkie brane pod uwagę zmodyfikowane modele dokładniej szacują tłumienie propagacyjne w porównaniu z formami klasycznymi. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono również, że z praktycznego punktu widzenia największe znaczenie mają przypadki z zachowaniem w łączy radiowym warunków LOS, gdyż wtedy szacowanie tłumienia propagacyjnego jest najdokładniejsze. Tłumienie propagacyjne w warunkach LOS najlepiej przybliża zmodyfikowany model ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$. Błąd standardowy estymacji nie przekracza wówczas wartości 4,6 dB, bez względu na podział wyników pomiarowych na poszczególne stacje bazowe, a co bezpośrednio także jest powiązane z typem obszaru. Znacznie gorzej przedstawiają się wyniki w warunkach NLOS. W tych przypadkach błąd standardowy estymacji wzrasta nawet do wartości 16,7 dB dla zmodyfikowanego modelu Egli. Najdokładniej szacowane jest tłumienie propagacyjne za pomocą zmodyfikowanego modelu COST 231 Haty oraz Okumury-Haty. Dla tych dwóch modeli błąd standardowy estymacji nie przekracza 14 dB. Niemniej otrzymane rezultaty szacowania tłumienia propagacyjnego za pomocą zmodyfikowanych modeli propagacyjnych w warunkach NLOS są zdecydowanie lepsze niż w przypadku takiej samej analizy wykonanej dla modeli klasycznych. Badania przeprowadzone w ramach tej części rozprawy dowodzą, że analizowane modele szacowania tłumienia propagacyjnego dla potrzeb projektowania radiowych sieci dostępowych na obszarach miejskich są nadal nieodpowiednie i dlatego należy poszukiwać lepszych rozwiązań.

ROZDZIAŁ 5

NOWY, WIELOWARIANTOWY MODEL EMPIRYCZNY TŁUMIENIA PROPAGACYJNEGO W SYSTEMIE DOSTĘPOWYM

5.1. Geneza i sposób tworzenia modelu

Przedstawiona w rozdziale trzecim analiza przydatności projektowej, najczęściej stosowanych w praktyce modeli propagacyjnych, wykazała małą ich przydatność do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w radiowym łączy dostępowym w mieście. To stało się podstawą do rozpoczęcia prac zmierzających do modyfikacji tych modeli, tak aby uzyskiwane za ich pomocą wyniki dawały zadowalające rezultaty podczas prac projektowych.

Zmodyfikowane modele propagacyjne, opracowane na podstawie ich form klasycznych przeznaczonych do zastosowania w systemach radiokomunikacji ruchomej lądowej, pomimo zdecydowanie większej ich przydatności projektowej nie uwzględniają w pełni specyfiki występującej w systemach dostępowych. Przede wszystkim związanej z faktem powszechnego umieszczania w tych systemach anten stacji abonenckich na dachach budynków. A więc w warunkach propagacyjnych zdecydowanie innych aniżeli ma to miejsce w systemach radiokomunikacji ruchomej lądowej, w których anteny stacji abonenckich umieszczana są na niewielkiej wysokości bezpośrednio nad ziemią. Pociąga to za sobą konieczność odmiennego podejścia do sposobu modelowania tłumienia propagacyjnego w radiowym łączy dostępowym.

Przy projektowaniu radiowego systemu dostępowego, pomimo znacznego urozmaicenia zabudowy i infrastruktury, w sposób naturalny dąży się do:

- zapewnienia warunku LOS, oraz
- nieprzysłonięcia pierwszej strefy Fresnela, tzn. spełnienia podstawowych wymagań związanych z pojęciem tzw. „wolnej przestrzeni” propagacyjnej.

W praktyce powyższe postulaty są trudne do spełnienia. Najczęściej mamy wówczas do czynienia z częściowym przysłonięciem tej strefy, jednakże przy zachowaniu warunku LOS. Można zatem stwierdzić, że w takiej sytuacji o tłumieniu propagacyjnym decydują dwa czynniki, tzn.:

- tłumienie „wolnej przestrzeni”,
- tłumienie dodatkowe, będące rezultatem oddziaływania innych uwarunkowań występujących w rzeczywistym środowisku propagacyjnym.

Mając to na uwadze, za punkt wyjścia do opracowania nowego ujęcia analitycznego do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w radiowym łączu dostępowym, przyjęto wyrażenie na tłumienie w „wolnej przestrzeni”. Uwzględniono przy tym także następujące zjawiska zachodzące podczas propagacji sygnału radiowego w takim łączu, tzn.:

- stopień przesłonięcia pierwszej strefy Fresnela,
- zjawisko rozproszenia fal radiowych na krawędziach dachów.

Przyjęto, że wpływ tych zjawisk jest zależny od położenia anteny stacji abonenckiej, odnosząc to położenie do średniej wysokości zabudowy oraz warunków spełnienia LOS [40].

Wyróżniono zatem cztery sytuacje występujące w łączu dostępowym:

- gdy antena stacji abonenckiej jest zawieszona na wysokości poniżej średniej wysokości zabudowy i spełnione są warunki LOS, czyli istnieje bezpośrednia widoczność pomiędzy antenami łącza dostępowego, w dalszej części określana mianem **sytuacji LOS1**,
- gdy antena stacji abonenckiej jest zawieszona na wysokości powyżej lub równej średniej wysokości zabudowy i jednocześnie jednak spełnione są warunki LOS, w dalszej części określana mianem **sytuacji LOS2**,
- gdy antena stacji abonenckiej jest zawieszona na wysokości poniżej średniej wysokości zabudowy i nie są spełnione warunki LOS, czyli nie istnieje bezpośrednia widoczność pomiędzy antenami łącza dostępowego, w dalszej części określana mianem **sytuacji NLOS1**,
- gdy antena stacji abonenckiej jest zawieszona na wysokości powyżej lub równej średniej wysokości zabudowy i nie są spełnione warunki LOS, w dalszej części określana mianem **sytuacji NLOS2**.

Przed omówieniem każdej z wymienionych wyżej sytuacji występujących w łączu dostępowym, zostanie zweryfikowana statystycznie istotność wprowadzenia takiego podziału. A mianowicie, zostaną porównane średnie wartości prób wielkości badanej, czyli tłumienia propagacyjnego. Do tego celu zostanie wykorzystana statystyka testowa Z z dwiema próbami

dla średnich o nieznanymi wariancjach w populacjach, przy założeniu ich nierówności. Statystyka ta ma postać[5, 57]:

$$Z = \frac{L_{p1} - L_{p2}}{\sqrt{\frac{S_{p1}^2}{N_1} + \frac{S_{p2}^2}{N_2}}}, \quad (5.1)$$

Z – statystyka testowa Z ,

N_1, N_2 – liczebności prób,

$L_{p1}; L_{p2}$ – wartości średnie tłumienia propagacyjnego porównywanych prób,

S_{p1}^2, S_{p2}^2 – wariancje z porównywanych prób.

Podział na wyżej wymienione sytuacje ma sens tylko wtedy, gdy grupy danych pomierzonych należących do poszczególnych sytuacji istotnie się różnią. Postawiono więc następujące hipotezy odnośnie wartości średnich prób tłumienia propagacyjnego w sytuacjach LOS1 oraz LOS2:

1) *hipoteza zerowa*

$$H_0 : L_{p_{LOS1}} = L_{p_{LOS2}},$$

2) *hipoteza alternatywna*

$$H_1 : L_{p_{LOS1}} \neq L_{p_{LOS2}}.$$

Przy tak postawionej hipotezie alternatywnej obszar krytyczny testu jest dwustronny. Obliczono więc wartości z prób:

- wartości średnie w próbach

$$L_{p_{LOS1}} = 115,567[dB],$$

$$L_{p_{LOS2}} = 114,696[dB],$$

- wariancje w próbach

$$S_{p_{LOS1}}^2 = 48,76,$$

$$S_{p_{LOS2}}^2 = 39,94,$$

- liczebności prób

$$N_{LOS1} = 4002 \text{ przypadków propagacyjnych w sytuacji LOS1,}$$

$$N_{LOS2} = 4554 \text{ przypadków propagacyjnych w sytuacji LOS2.}$$

Przy zakładanym w pracy 95% poziomie ufności, wartość krytyczna testu Z wynosi $Z_{\alpha} = 1,96$.

Przy tak postawionej hipotezie alternatywnej do zerowej obszar krytyczny testu jest dwustronny, a więc hipotezę zerową przyjmujemy, gdy $|Z| < Z_\alpha$, natomiast odrzucimy hipotezę zerową na korzyść hipotezy alternatywnej, gdy $|Z| \geq Z_\alpha$.

Statystykę testową Z obliczono podstawiając do wzoru (5.1) wartości z prób LOS1 i LOS2 i liczebności tych prób. Statystyka testowa $Z = 6,01$.

Zatem odrzucamy hipotezę zerową na korzyść hipotezy alternatywnej ponieważ $|Z| \geq Z_\alpha$ (gdyż $6,01 \geq 1,96$), a więc sytuacje propagacyjne LOS1 i LOS2 istotnie się różnią.

Identyczne wnioskowanie statystyczne przeprowadzono dla prób w sytuacjach NLOS1 i NLOS2. W pierwszej kolejności postawiono hipotezy:

1) *hipoteza zerowa*

$$H_0 : Lp_{NLOS1} = Lp_{NLOS2},$$

2) *hipoteza alternatywna*

$$H_1 : Lp_{NLOS1} \neq Lp_{NLOS2},$$

Obliczono następnie wartości z prób NLOS1 oraz NLOS2:

- wartości średnie w próbach

$$Lp_{NLOS1} = 126,670[dB],$$

$$Lp_{NLOS2} = 128,240[dB],$$

- wariancje w próbach

$$S_{pNLOS1}^2 = 76,671,$$

$$S_{pNLOS2}^2 = 72,068,$$

- liczebności prób

$$N_{NLOS1} = 6168 \text{ przypadków propagacyjnych w sytuacji NLOS1,}$$

$$N_{NLOS2} = 4200 \text{ przypadków propagacyjnych w sytuacji NLOS2}$$

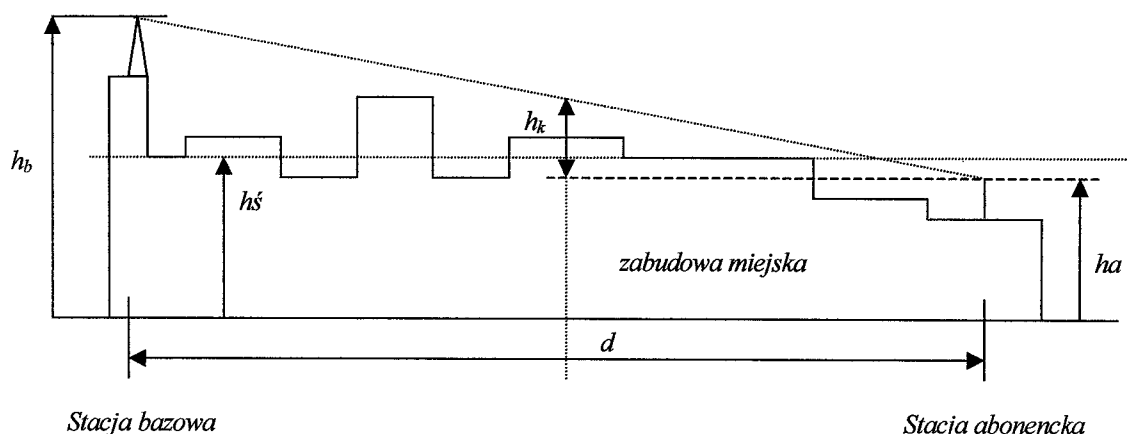
Obliczona statystyka testowa Z , wyrażenie (5.1), wynosi $Z = -7,5746$. Zatem odrzucamy hipotezę zerową na korzyść hipotezy alternatywnej ponieważ $|Z| \geq Z_\alpha$ (gdyż $|-7,5746| \geq 1,96$), a więc sytuacje propagacyjne NLOS1 i NLOS2 istotnie się różnią.

Weryfikacja pozostałych koniunkcji sytuacji LOS i NLOS, czyli LOS1 i NLOS1, LOS1 i NLOS2, LOS2 i NLOS1 oraz LOS2 i NLOS2 nie została tu przytoczona z przyczyn oczywistych w świetle obliczonych powyżej wartości z prób. Zatem, sytuacje LOS od NLOS istotnie różnią się.

5.1.1. Sytuacja LOS1

Na mechanizm propagacji sygnału radiowego w sytuacji LOS1 w radiowym łączy dostępowym mają wpływ przede wszystkim następujące czynniki – patrz rys. 5.1:

- długość d trasy propagacji oraz częstotliwość f sygnału, co jest oczywiste, chociażby w świetle uwarunkowań propagacyjnych w „wolnej przestrzeni”,
- wysokości zawieszenia obu anten łączy radiowego, tzn. wysokość h_b zawieszenia anteny stacji bazowej oraz wysokość h_a zawieszenia anteny stacji abonenckiej,
- średnia wysokość h_s zabudowy trasy propagacyjnej,
- stopień zaburzenia pierwszej strefy Fresnela w połowie trasy propagacji, oznaczone jako h_k , tzn. jest to różnica pomiędzy wysokością $h_{LOS,(1/2d)}$ - wyrażenie (4.5), a wysokością wzniesienia anteny stacji abonenckiej h_a (dla przypomnienia, w miejscu trasy propagacyjnej gdzie promień pierwszej strefy Fresnela przyjmuje największą wartość).



Rys. 5.1. Typowy przekrój trasy propagacji w sytuacji LOS1.

Na podstawie powyższego, przyjmując powszechnie stosowaną skalę logarymiczną tłumienia wyrażanego w [dB], ustalono, że w opracowywanym zapisie analitycznym nowego modelu empirycznego należy wziąć pod uwagę następujące składniki tłumienia propagacyjnego:

- jako punkt wyjścia przede wszystkim idealne warunki w „wolnej przestrzeni” propagacyjnej, wyrażone poprzez

$$20 \lg\{f[\text{MHz}]\} \text{ oraz } a \lg\{d[\text{km}]\}, \quad (5.2)$$

- położenie obu anten radiowego łącza dostępowego względem średniej wysokości zabudowy, wyrażone poprzez

$$b \lg\{(h_b - h_s)_{[m]}\} \text{ oraz } c \lg\{(h_s - h_a)_{[m]}\}, \quad (5.3)$$

- różnice w wysokościach zawieszenia obu tych anten, zakładając przy tym, że $(h_b > h_a) \cap (h_b > h_s)$, co na ogół zawsze ma miejsce w praktyce, wyrażone poprzez

$$D \lg\{h_b[m]\} - e \lg\{h_a[m]\}, \quad (5.4)$$

- stopień zaburzenia pierwszej strefy Fresnela, wyrażony poprzez

$$g \cdot \lg(h_k[m]), \quad (5.5)$$

przy czym

$$h_k[m] = \frac{h_b[m] - h_a[m]}{2}. \quad (5.6)$$

Ostateczny zapis analityczny funkcji opisującej tłumienie propagacyjne w radiowym łączu dostępowym, w warunkach opisanych powyżej, został opracowany na podstawie wszystkich zbadanych przypadków propagacyjnych, gdy $(h_a < h_s) \cap LOS$. Liczba pomiarów, która została wzięta pod uwagę wynosiła przeszło cztery tysiące. Na drodze wielowymiarowej analizy regresji zbadano następującą funkcję błędu ΔL_{LOS1} :

$$\Delta L_{LOS1} = L_p - 32,4 - 20 \lg f = a \lg d + b \lg(h_b - h_s) + c \lg(h_s - h_a) + D \lg h_b - e \lg h_a + g \lg(h_k) + C, \quad (5.7)$$

gdzie:

L_p - pomierzone wartości tłumienia propagacyjnego,

a, b, c, D, e, g - współczynniki regresji, których wartości należy wyznaczyć, poprzez analizę regresji,

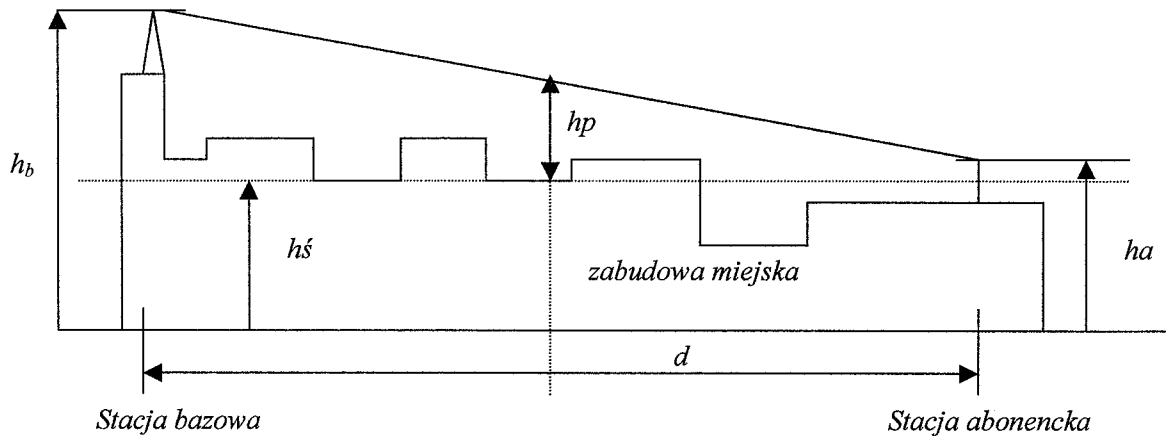
C – wielkość stała.

5.1.2. Sytuacja LOS2

Na mechanizm propagacji sygnału radiowego w sytuacji LOS2 w radiowym łączu dostępowym mają wpływ następujące czynniki (patrz rys. 5.2):

- długość d trasy propagacji oraz częstotliwość f sygnału,

- wysokości zawieszenia obu anten łącza radiowego, tzn. wysokość h_b zawieszenia anteny stacji bazowej oraz wysokość h_a zawieszenia anteny stacji abonenckiej,
- średnia wysokość h_s zabudowy trasy propagacyjnej,
- stopień zaburzenia pierwszej strefy Fresnela w połowie trasy propagacji, przy czym przyjęto, że miarą tego zaburzenia jest h_p , tzn. różnica pomiędzy wysokością $h_{LOS,(1/2d)}$ - wyrażenie (4.5), a średnią wysokością h_s zabudowy tej trasy.



Rys. 5.2. Typowy przekrój trasy propagacji w sytuacji LOS2.

Na podstawie powyższego, przyjmując skalę logarytmiczną tłumienia propagacyjnego wyrażanego w [dB], ustalono, że w opracowywanym zapisie analitycznym należy wziąć pod uwagę następujące składniki:

- jako punkt wyjścia przede wszystkim idealne warunki propagacyjne w „wolnej przestrzeni”, wyrażone poprzez

$$20 \lg\{f[\text{MHz}]\} \text{ oraz } a \lg\{d[\text{km}]\}, \quad (5.8)$$

- położenie anteny stacji bazowej radiowego łącza dostępowego względem średniej wysokości zabudowy, wyrażone poprzez

$$b \lg\{(h_b - h_s)[\text{m}]\}, \quad (5.9)$$

- różnice w wysokościach zawieszenia obu tych anten, zakładając przy tym, że $(h_b > h_a) \cap (h_b > h_s)$, co na ogół zawsze ma miejsce w praktyce, wyrażone poprzez

$$c \lg\{h_b[\text{m}]\} - D \lg\{h_a[\text{m}]\}, \quad (5.10)$$

- stopień zaburzenia pierwszej strefy Fresnela, wyrażony poprzez

$$e \cdot \lg \left(\frac{4h_p^2[m]}{\lambda[m]} \right), \quad (5.11)$$

przy czym $\lambda_{[m]}$ - długość fali radiowej w [m] oraz

$$h_p[m] = \frac{hb[m] + ha[m]}{2} - h_s[m]. \quad (5.12)$$

Składnik tłumienia propagacyjnego (5.11) został wyznaczony przy wzięciu pod uwagę, że w połowie trasy propagacji promień r pierwszej strefy Fresnela przyjmuje wartość

$$r [m] = \sqrt{\frac{\lambda_{[m]} d_{[m]}}{4}}, \quad (5.13)$$

przy czym jest to zarazem maksymalna wartość promienia tej strefy. Pierwsza strefa Fresnela nie będzie zaburzona dotąd dopóki $h_p[m] \geq r [m]$, w przeciwnym przypadku nastąpi jej zaburzenie, a tym samym częściowe jej przysłonięcie. Zatem maksymalna wartość wysokości $h_p[m]$, przy której pierwsza strefa Fresnela nie będzie zaburzona wynosi: $h_p[m] = r [m]$. Dalej proste przekształcenia matematyczne prowadzą do określenia składnika tłumienia propagacyjnego (5.11).

Ostateczny zapis analityczny funkcji opisującej tłumienie propagacyjne w radiowym łączy dostępowym, w warunkach opisanych powyżej, został opracowany na podstawie wszystkich zbadanych przypadków propagacyjnych, gdy $(h_a \geq h_s) \cap LOS$. Liczba pomiarów, która została wzięta pod uwagę wynosiła przeszło cztery i pół tysiąca. Na drodze wielowymiarowej analizy regresji zbadano następującą funkcję błędu ΔL_{LOS2}

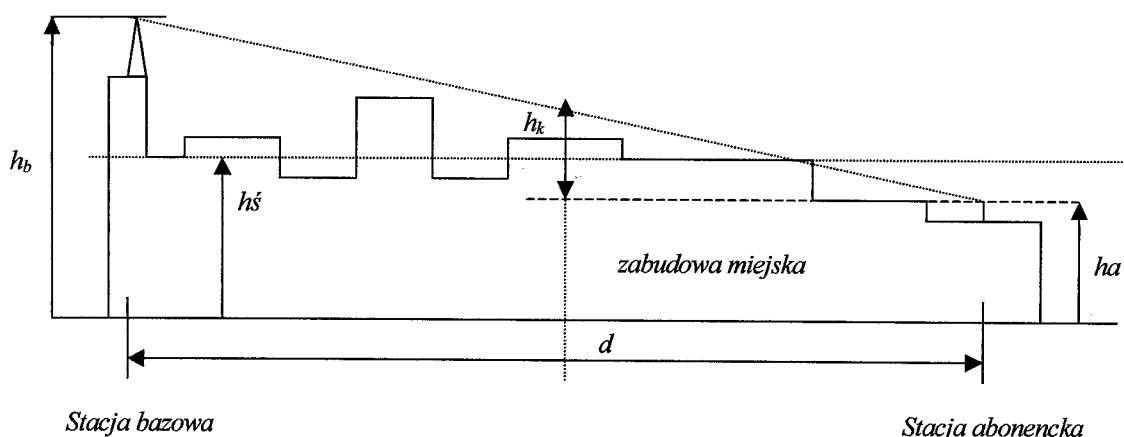
$$\begin{aligned} \Delta L_{LOS2} = L_p - 32,4 - 20 \lg f = a \lg d + b \lg(h_b - h_s) + \\ + c \lg h_b - D \lg h_a + e \lg \left(\frac{4h_p^2}{\lambda} \right) + C, \end{aligned} \quad (5.14)$$

L_p - pomierzone wartości tłumienia propagacyjnego,

a, b, c, D, e - współczynniki regresji, których wartości należy wyznaczyć, poprzez analizę regresji.

5.1.3. Sytuacja NLOS1

W sytuacji NLOS1, nie ma bezpośredniej widoczności pomiędzy antenami łącza dostępowego. Oznacza to, że co najmniej połowa pierwszej strefy Fresnela jest zasłonięta przez zabudowę miejską. Dla niniejszej sytuacji przeanalizowano wyniki badań pomiarowych i stwierdzono, że główną przyczyną powodującą przesłonięcie pierwszej strefy Fresnela jest położenie anteny stacji abonenckiej poniżej średniej zabudowy trasy propagacji. Typowy przekrój trasy propagacji przedstawiono na rys. 5.3.



Rys. 5.3. Typowy przekrój trasy propagacji w sytuacji NLOS1.

Na mechanizm propagacji sygnału radiowego w sytuacji NLOS1 w radiowym łączu dostępowym mają wpływ następujące czynniki:

- długość d trasy propagacji oraz częstotliwość f sygnału,
- wysokości zawieszenia obu anten łącza radiowego, tzn. wysokość h_b zawieszenia anteny stacji bazowej oraz wysokość h_a zawieszenia anteny stacji abonenckiej,
- średnia wysokość h_s zabudowy trasy propagacyjnej,
- stopień zaburzenia pierwszej strefy Fresnela w połowie trasy propagacji, oznaczone jako h_k , tzn. jest to różnica pomiędzy wysokością $h_{LOS,(1/2d)}$ - wyrażenie (4.5), a wysokością wzniesienia anteny stacji abonenckiej h_a .

Na podstawie powyższego, przyjmując skalę logarytmiczną tłumienia propagacyjnego wyrażanego w [dB], ustalono, że w opracowywanym zapisie analitycznym należy wziąć pod uwagę następujące składniki:

- jako punkt wyjścia przyjęto idealne warunki propagacyjne w „wolnej przestrzeni”, wyrażone poprzez

$$20 \lg\{f[\text{MHz}]\} \text{ oraz } a \lg\{d[\text{km}]\}, \quad (5.15)$$

- położenie obu anten radiowego łącza dostępowego względem średniej wysokości zabudowy, wyrażone poprzez

$$b \lg\{(h_b - h_s)_{[m]}\}, \quad c \lg\{(h_s - h_a)_{[m]}\}, \quad (5.16)$$

- różnice w wysokościach zawieszenia obu tych anten, zakładając przy tym, że $(h_b > h_a) \cap (h_b > h_s)$, co na ogół zawsze ma miejsce w praktyce, wyrażone poprzez

$$D \lg\{h_{b[m]}\} - e \lg\{h_{a[m]}\}, \quad (5.17)$$

- stopień zaburzenia pierwszej strefy Fresnela, wyrażony poprzez

$$g \cdot \lg(h_k), \quad (5.18)$$

przy czym:

$$h_k[m] = \frac{h_b[m] - h_a[m]}{2}. \quad (5.19)$$

Ostateczny zapis analityczny funkcji opisującej tłumienie propagacyjne w radiowym łączu dostępowym, w warunkach opisanych powyżej, został opracowany na podstawie wyników badań pomiarowych wykonanych w dużych aglomeracjach miejskich, na terenie całego kraju, tzn. dla wszystkich zbadanych przypadków propagacyjnych, gdy $(h_a < h_s) \cap NLOS$. Liczba pomiarów, która została wzięta pod uwagę wynosiła przeszło sześć tysięcy, na drodze wielowymiarowej analizy regresji zbadano następującą funkcję błędu ΔL_{NLOS1} :

$$\begin{aligned} \Delta L_{NLOS1} = L_p - 32,4 - 20 \lg f = a \lg d + b \lg(h_b - h_s) + c \lg(h_s - h_a) + \\ + D \lg h_b - e \lg h_a + g \lg(h_k) + C, \end{aligned} \quad (5.20)$$

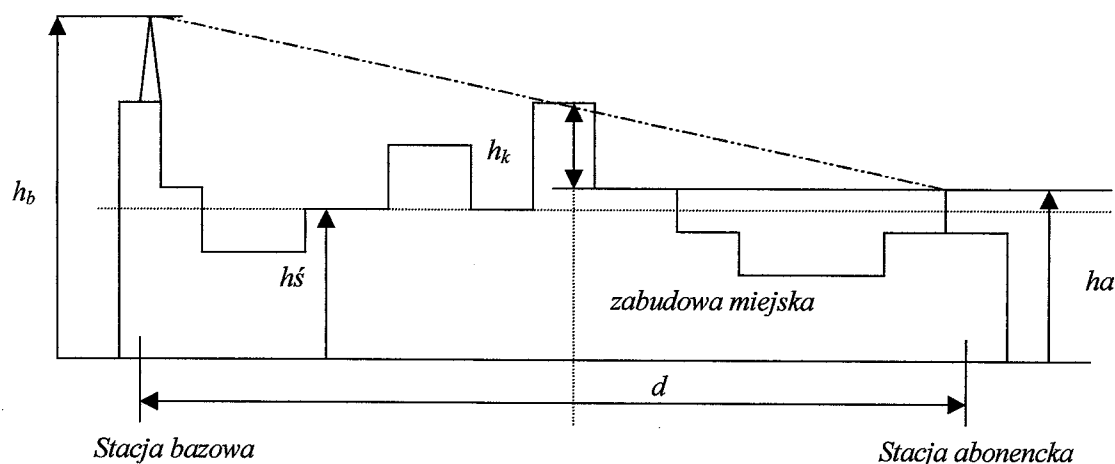
L_p - pomierzone wartości tłumienia propagacyjnego,

a, b, c, D, e, g - współczynniki regresji, których wartości należy wyznaczyć, poprzez analizę regresji.

5.1.4. Sytuacja NLOS2

W sytuacji NLOS2, również nie ma bezpośredniej widoczności pomiędzy antenami łącza dostępowego. Jednakże, przy położeniu anteny stacji abonenckiej powyżej średniej zabudowy trasy propagacji należy przyjąć, że na trasie tej występuje element zabudowy

przewyższający jej średnią wysokość, który powoduje jednocześnie przesłonięcie linii bezpośredniej widoczności. Analizując mechanizm propagacji fali radiowej, element ten usytuowano w połowie trasy propagacji, a więc w miejscu gdzie promień pierwszej strefy Fresnela przyjmuje wartość maksymalną. Przekrój trasy propagacji, dla sytuacji NLOS2 przedstawiono na rys. 5.4.



Rys.5.4.Przekrój trasy propagacji w sytuacji NLOS2

Na mechanizm propagacji sygnału radiowego w sytuacji NLOS2 w radiowym łączu dostępowym mają wpływ następujące czynniki:

- długość d trasy propagacji oraz częstotliwość f sygnału,
- wysokości zawieszenia obu anten łącza radiowego, tzn. wysokość h_b zawieszenia anteny stacji bazowej oraz wysokość h_a zawieszenia anteny stacji abonenckiej,
- średnia wysokość h_s zabudowy trasy propagacyjnej,
- stopień zaburzenia pierwszej strefy Fresnela w połowie trasy propagacji, oznaczone jako h_k , tzn. jest to różnica pomiędzy wysokością $h_{LOS,(1/2d)}$ - wyrażenie (4.5), a wysokością wzniesienia anteny stacji abonenckiej h_a .

Na podstawie powyższego, przyjmując skalę logarytmiczną tłumienia propagacyjnego wyrażanego w [dB], ustalono, że w opracowywanym zapisie analitycznym należy wziąć pod uwagę następujące składniki:

- jako punkt wyjścia przyjęto idealne warunki propagacyjne w „wolnej przestrzeni”, wyrażone poprzez

$$20 \lg\{f_{[MHz]}\} \text{ oraz } a \lg\{d_{[km]}\}, \quad (5.21)$$

- położenie anteny stacji bazowej radiowego łącza dostępowego względem średniej wysokości zabudowy, wyrażone poprzez

$$b \lg\{(h_b - h_s)_{[m]}\}, \quad (5.22)$$

- różnice w wysokościach zawieszenia obu tych anten, zakładając przy tym, że $(h_b > h_a) \cap (h_b > h_s)$, co na ogół zawsze ma miejsce w praktyce, wyrażone poprzez

$$c \lg\{h_b[m]\} - D \lg\{h_a[m]\}, \quad (5.23)$$

- stopień zaburzenia pierwszej strefy Fresnela, wyrażony poprzez

$$e \lg(h_k[m]), \quad (5.24)$$

przy czym

$$h_{k[m]} = \frac{h_{b[m]} - h_{a[m]}}{2}. \quad (5.25)$$

Ostateczny zapis analityczny funkcji opisującej tłumienie propagacyjne w radiowym łączu dostępowym, w warunkach opisanych powyżej, został opracowany na podstawie wszystkich zbadanych przypadków propagacyjnych, gdy $(h_a \geq h_s) \cap NLOS$. Liczba pomiarów, która została wzięta pod uwagę wynosiła przeszło cztery tysiące. Na drodze wielowymiarowej analizy regresji zbadano następującą funkcję błędu ΔL_{NLOS2} :

$$\Delta L_{NLOS2} = L_p - 32,4 - 20 \lg f = a \lg d + b \lg(h_b - h_s) + c \lg h_b - D \lg h_a + e \lg(h_k) + C, \quad (5.26)$$

L_p - pomierzone wartości tłumienia propagacyjnego,

a, b, c, D, e - współczynniki regresji, których wartości należy wyznaczyć, poprzez analizę regresji.

W każdej z opisanych sytuacji w łączu dostępowym uwzględniono dodatkowo wpływ uwarunkowań terenowych i związanego z tym położenia anten łącza dostępowego i zabudowy, odnosząc ich wysokości do średniego poziomu terenu pomiędzy rzędnymi posadowienie stacji bazowej i stacji abonenckiej.

Dla powyżej opisanych czterech sytuacji i związanych z nimi funkcjami błędu wyznaczono na drodze analizy wielowymiarowej regresji współczynniki regresji, co zostanie przedstawione w kolejnych podrozdziałach.

5.2. Formuła analityczna

Formuły analityczne modelu empirycznego opracowano, badając funkcje błędów określone wyrażeniami (5.7), (5.14), (5.20) oraz (5.26).

5.2.1. Warunki LOS

W warunkach LOS wyróżniono, jak wcześniej napisano, dwie sytuacje LOS1 i LOS2, uwzględniające położenie anteny stacji abonenckiej względem średniej wysokości zabudowy obszaru pracy stacji bazowej.

W sytuacji LOS1

W wyniku przeprowadzonych badań funkcji (5.7), wyznaczono wartości występujących w niej współczynników regresji. W rezultacie tego proponuje się następujący model analityczny do wyznaczania tłumienia propagacyjnego L_{LOS1} w opisanych warunkach, tzn. dla $h_a < h_s$:

$$\begin{aligned} L_{LOS1}[dB] = & 16,32 + 20 \lg f_{[MHz]} + 18,06 \lg d_{[km]} + \\ & + 11,99 \lg \left(h_{b[m]} - h_{s[m]} \right) + 0,59 \lg \left(h_{s[m]} - h_{a[m]} \right) + \\ & + (19,14 \lg h_{b[m]} - 6,72 \lg h_{a[m]}) - 16,16 \lg \left(h_{k[m]} \right) \end{aligned} \quad (5.27)$$

W sytuacji LOS1 przeprowadzona metodą najmniejszych kwadratów analiza regresji funkcji błędu określona zależnością (5.7), przy założonym poziomie ufności równym 95%, daje następujące rezultaty, które zostały zestawione w tab. 5.1. Analiza testu t i związany z nim poziom prawdopodobieństwa dla testu t wskazuje, że na poziomie ufności równym 95% wszystkie współczynniki regresji są statystycznie istotne, a więc różne od zera. Wyznaczone zaokrąglone wartości współczynników regresji są następujące:

C = - 16,08 (stała),

a = 18,06,

b = 11,99,

c = 0,59,

D = 19,14,

e = 6,72,

g = - 16,16.

Tab. 5.1. Współczynniki regresji i ich istotność dla sytuacji LOS1.

Zmienne	Współczynniki regresji	Błąd standardowy	Test t	Poziom prawdopodobieństwa dla testu t
<i>Stała: C</i>	-16,0836	1,324854	-12,1399	0
<i>lgd</i>	18,0605	0,275961	65,44575	0
<i>lg(h_b-h_s)</i>	11,98984	4,745935	2,52634	0,011564
<i>lg(h_s-h_a)</i>	0,595356	0,124239	4,792039	0
<i>lgh_b</i>	19,14472	1,215053	15,75629	0
<i>lgh_a</i>	6,7193	0,734718	9,1454	0
<i>lg(h_k)</i>	-16,1564	4,943658	-3,2681	0,001092

Analizując powyższe współczynniki regresji dla funkcji tłumienia propagacyjnego, określonej zależnością (5.27), pod względem stopnia wpływu poszczególnych jego składników, należy brać pod uwagę łączne oddziaływanie wysokości zawieszenia obu anten łącza radiowego – co formalnie zaznaczono poprzez umieszczenie tych składników we wspólnym nawiasie, pomimo tego, że do każdego z nich przypisano współczynniki o różnych wartościach. Poniżej w tab. 5.2 została przedstawiona ogólna ocena przyjętego modelu regresji.

Tab. 5.2. Ogólna ocena modelu regresji.

Współczynnik korelacji R	0,90123
Współczynnik determinacji R ²	0,812216
Skorygowany współczynnik determinacji R ²	0,811934
Błąd standardowy	3,028183
Ilość obserwacji	4002
Statystyka testowa istotności regresji F	2879,91
Poziom prawdopodobieństwa dla F : p	0

Poziom prawdopodobieństwa statystyki testowej F Snecodera-Fishera jest równy zero, co potwierdza, że model regresji jest istotny, o czym świadczą przede wszystkim współczynnik determinacji oraz korelacji.

Ocena opracowanego wielowariantowego modelu empirycznego do analizowania sytuacji typu LOS1 w systemach dostępowych jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi: **81,22%**,
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi: **0,000 dB**,
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi: **3,0263 dB**.

W sytuacji LOS2

W wyniku przeprowadzonych badań funkcji (5.14), wyznaczono wartości występujących w niej współczynników regresji. W rezultacie tego proponuje się następujący model analityczny do wyznaczania tłumienia propagacyjnego L_{LOS2} w opisanych warunkach, tzn. dla $h_a \geq h_s$:

$$L_{LOS2}[dB] = 23,02 + 20 \lg f_{[MHz]} + 16,48 \lg d_{[km]} + 8,45 \lg \left(h_{b[m]} - h_{s[m]} \right) + (22,09 \lg h_{b[m]} - 10,26 \lg h_{a[m]}) - 5,27 \lg \left(\frac{4h^2 p_{[m]}}{\lambda_{[m]}} \right) \quad (5.28)$$

W sytuacji LOS2 przeprowadzona metodą najmniejszych kwadratów analiza regresji funkcji błędu określonej zależnością (5.14), przy założonym poziomie ufności równym 95%, daje następujące rezultaty, które zostały zestawione w tab. 5.3.

Analiza testu t i związany z nim poziom prawdopodobieństwa dla testu t wskazuje, że na poziomie ufności równym 95% wszystkie współczynniki regresji są statystycznie istotne, a więc różne od zera. Wyznaczone, zaokrąglone wartości współczynników regresji są następujące:

C = - 9,38 (stała),

a = 16,48,

b = 8,45,

c = 22,09,

D = 10,26,

e = - 5,27.

Tab. 5.3. Współczynniki regresji i ich istotność dla sytuacji LOS2.

Zmienne	Współczynniki regresji	Błąd standardowy	Test t	Poziom prawdopodobieństwa dla testu t
Stala: C	-9,38662	1,366057	-6,87133	0
lgd	16,48443	0,256589	64,24445	0
lg(h _b -h _s)	8,448792	1,46972	5,748573	0
lgh _b	22,09428	1,144162	19,31045	0
lgh _a	10,2641	0,754335	13,6068	0
lg $\left(\frac{4h^2 p}{\lambda} \right)$	-5,27473	0,634899	-8,30798	0

Analizując powyższe współczynniki regresji dla funkcji tłumienia propagacyjnego, określonej zależnością (5.28), pod względem stopnia wpływu poszczególnych jego

składników, należy brać pod uwagę łączne oddziaływanie wysokości zawieszenia obu anten łącza radiowego – co formalnie zaznaczono poprzez umieszczenie tych składników we wspólnym nawiasie, pomimo tego, że do każdego z nich przypisano współczynniki o różnych wartościach. Poniżej w tab. 5.4 została przedstawiona ogólna ocena przyjętego modelu regresji.

Tab. 5.4. Ogólna ocena modelu regresji.

Współczynnik korelacji R	0,877871
Współczynnik determinacji R ²	0,770657
Skorygowany współczynnik determinacji R ²	0,770405
Błąd standardowy	3,028324
Ilość obserwacji	4554
Statystyka testowa istotności regresji F	3056,511
Poziom prawdopodobieństwa dla F : p	0

Poziom prawdopodobieństwa statystyki testowej F Snecodera-Fishera jest równy zero, co potwierdza, że model regresji jest istotny, o czym świadczą przede wszystkim współczynnik determinacji oraz korelacji. Ocena opracowanego wielowariantowego modelu empirycznego do analizowania sytuacji typu LOS2 w systemach dostępowych jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi: **77,065%**,
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi: **0,000 dB**,
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi: **3,027 dB**.

Poniżej przedstawiono również ogólną ocenę wielowariantowego modelu empirycznego we wszystkich przypadkach LOS, a więc dla wszystkich przypadków pomiarowych spełniających warunek LOS (N=8556). Ogólna ocena modelu w sytuacji LOS (LOS1∩LOS2) jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4) wynosi: **79,31%**,
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi: **0,000 dB**,
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi: **3,0261 dB**.

Wielowariantowy model empiryczny przeznaczony do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w radiowych systemach dostępowych w warunkach LOS wyjaśnia zjawisko w **79,30%**, ze standardowym błędem estymacji wynoszącym **3,0261 dB** w typowym krajowym środowisku miejskim. Tylko **20,69%** zmienności badanego zjawiska nie jest wyjaśniana przez przyjęty model empiryczny.

Zakres stosowalności tego modelu, wynikający z warunków w jakich przeprowadzono badania pomiarowe, jest następujący:

- długości tras propagacyjnych od 200 do 8310 m,
- wysokości zawieszenia anteny stacji bazowych od 30 do 120 m n.p.t. (nad poziomem terenu),
- wysokości zawieszenia anten stacji abonenckich od 3 do 48 m n.p.t.,
- średnie wysokości zabudowy obszarów pracy stacji bazowych od 10,9 do 15,1 m,

przy czym różnica pomiędzy rzędnymi miejsc posadowienia anten stacji abonenckiej i bazowej, wynosiła od -21 do +73 m.

5.2.2. Warunki NLOS

W warunkach NLOS wyróżniono, jak wcześniej napisano dwie sytuacje NLOS1 i NLOS2 uwzględniające położenie anteny stacji abonenckiej względem średniej wysokości zabudowy obszaru pracy stacji bazowej.

W sytuacji NLOS1

W wyniku przeprowadzonych badań funkcji (5.20), wyznaczono wartości występujących w niej współczynników regresji. W rezultacie tego proponuje się następujący model analityczny do wyznaczania tłumienia propagacyjnego L_{NLOS1} w opisanych warunkach, tzn. dla $h_a < h_s$:

$$L_{NLOS1} [dB] = 83,07 + 20 \lg f_{[MHz]} + 15,8 \lg d_{[km]} - 47,16 \lg (h_{b[m]} - h_{s[m]}) + 0,33 \lg (h_{s[m]} - h_{a[m]}) + (19,08 \lg h_{b[m]} - 20,05 \lg h_{a[m]}) + 34,43 \lg (h_{k[m]}) \quad (5.29)$$

W sytuacji NLOS1 przeprowadzona metodą najmniejszych kwadratów, analiza regresji funkcji błędu określonej zależnością (5.20), przy założonym poziomie ufności równym 95%, daje rezultaty, które zostały zebrane w tab. 5.5. Analiza testu t i związany z nim poziom prawdopodobieństwa dla testu t wskazuje, że na poziomie ufności równym 95% wszystkie współczynniki regresji są statystycznie istotne, a więc różne od zera. Wyznaczone, zaokrąglone wartości współczynników regresji są następujące:

C = 50,67 (stała),

a = 15,8,

b = - 47,16,

c = 0,33,

D = 19,08,

e = 20,05,

$g = 34,43$.

Tab. 5.5. Współczynniki regresji i ich istotność dla sytuacji NLOS1.

Zmienne	Współczynniki regresji	Błąd standardowy	Test t	Poziom prawdopodobieństwa dla testu t
Stała: C	50,67149	1,49916	33,79992	0
lgd	15,79878	0,340154	46,44593	0
$lg(h_b-h_s)$	-47,1622	3,918636	-12,0353	0
$lg(h_s-h_a)$	0,331325	0,184706	3,0188493	0
lgh_b	19,07744	1,97118	9,678181	0
lgh_a	20,0514	1,269393	15,7961	0
$lg(h_k)$	34,43139	4,082297	8,434317	0

Analizując powyższe współczynniki regresji dla funkcji tłumienia propagacyjnego, określonej zależnością (5.29), pod względem stopnia wpływu poszczególnych jego składników, należy brać pod uwagę łączne oddziaływanie wysokości zawieszenia obu anten łącza – co formalnie zaznaczono poprzez umieszczenie tych składników we wspólnym nawiasie, pomimo tego, że do każdego z nich przypisano współczynniki o różnych wartościach. Poniżej, w tab. 5.6 została przedstawiona ogólna ocena przyjętego modelu regresji.

Tab. 5.6. Ogólna ocena modelu regresji.

Współczynnik korelacji R	0,690605
Współczynnik determinacji R^2	0,476936
Skorygowany współczynnik determinacji R^2	0,476426
Błąd standardowy	6,335847
Ilość obserwacji	6168
Statystyka testowa istotności regresji F	936,28
Poziom prawdopodobieństwa dla F : p	0

Poziom prawdopodobieństwa statystyki testowej F Snecodera-Fishera jest równy zero, co potwierdza, że model regresji jest istotny.

Ocena wielowariantowego modelu empirycznego do analizowania sytuacji typu NLOS1 w systemach dostępowych jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi: **47,69%**,
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi: **0,000 dB**,
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi: **6,332 dB**.

W sytuacji NLOS2

W wyniku przeprowadzonych badań funkcji (5.26), wyznaczono wartości występujących w niej współczynników regresji. W rezultacie tego proponuje się następujący model analityczny do wyznaczania tłumienia propagacyjnego L_{NLOS2} w opisanych warunkach, tzn. dla $h_a \geq h_s$:

$$L_{NLOS2} [dB] = 108,6 + 20 \lg f_{[MHz]} + 21,83 \lg d_{[km]} - 26,35 \lg (h_{b[m]} - h_{s[m]}) + (-35,03 \lg h_{b[m]} + 16,61 \lg h_{a[m]}) + 23,86 \lg (h_{k[m]}) \quad (5.30)$$

W sytuacji NLOS2 przeprowadzona metodą najmniejszych kwadratów analiza regresji funkcji błędu określonej zależnością (5.26), przy założonym poziomie ufności równym 95%, daje rezultaty, które zostały zestawione w tab. 5.7.

Analiza testu t i związany z nim poziom prawdopodobieństwa dla testu t wskazuje, że na poziomie ufności równym 95% wszystkie współczynniki regresji są statystycznie istotne, a więc różne od zera. Wyznaczone zaokrąglone wartości współczynników regresji są następujące:

C = 76,2 (stała),

a = 21,83,

b = - 26,35,

c = - 35,03,

D = - 16,61,

e = 23,86.

Tab. 5.7. Współczynniki regresji i ich istotność dla sytuacji NLOS2.

Zmienne	Współczynniki regresji	Błąd standardowy	Test t	Poziom prawdopodobieństwa dla testu t
Stała: C	76,20276	2,368814	32,16916	0
$\lg d$	21,82749	0,324463	67,2726	0
$\lg(h_b - h_s)$	-26,35	2,679917	-9,83239	0
$\lg h_b$	-35,0276	2,153223	-16,2675	0
$\lg h_a$	-16,60684	1,406359	-11,8084	0
$\lg(h_k)$	23,86403	2,430349	9,819178	0

Analizując powyższe współczynniki regresji dla funkcji tłumienia propagacyjnego, określonej zależnością (5.30), pod względem stopnia wpływu poszczególnych jego składników, należy brać pod uwagę łączne oddziaływanie wysokości zawieszenia obu anten

łącza – co formalnie zaznaczono poprzez umieszczenie tych składników we wspólnym nawiasie, pomimo tego, że do każdego z nich przypisano współczynniki o różnych wartościach.

Poniżej, w tab. 5.8 została przedstawiona ogólna ocena przyjętego modelu regresji.

Tab. 5.8. Ogólna ocena modelu regresji.

Współczynnik korelacji R	0,732873
Współczynnik determinacji R ²	0,537102
Skorygowany współczynnik determinacji R ²	0,53655
Błąd standardowy	5,779274
Ilość obserwacji	4200
Statystyka testowa istotności regresji F	973,263
Poziom prawdopodobieństwa dla F : p	0

Poziom prawdopodobieństwa statystyki testowej F Snecodera-Fishera jest równy zero, co potwierdza, że model regresji jest istotny.

Ocena wielowariantowego modelu empirycznego do analizowania sytuacji typu NLOS2 w systemach dostępowych jest następująca :

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi: **53,71%**,
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi: **0,000 dB**,
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2) wynosi: **5,776 dB**.

Poniżej przedstawiono ogólną ocenę wielowariantowego modelu empirycznego dla wszystkich przypadków NLOS, a więc dla wszystkich przypadków pomiarowych spełniających warunek NLOS (N=10368).

Ogólna ocena wielowariantowego modelu empirycznego w sytuacji NLOS (NLOS1∩NLOS2) jest następująca:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi: **50,435%**,
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi: **0,000 dB**,
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi: **6,110 dB**.

Wielowariantowy model empiryczny przeznaczony do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w radiowych systemach dostępowych w warunkach NLOS wyjaśnia zjawisko tłumienia propagacyjnego w **50,435%**, ze standardowym błędem estymacji wynoszącym **6,110 dB** w typowym krajowym środowisku miejskim. Natomiast **49,565%** zmienności badanego zjawiska nie jest wyjaśniana przez przyjęty wielowariantowym modelem empirycznym.

Zakres stosowalności tego modelu, wynikający z warunków w jakich przeprowadzono badania pomiarowe, jest następujący:

- długości tras propagacyjnych od 200 do 8310 m,
- wysokości zawieszenia anten stacji bazowych od 30 do 120 m n.p.t.,
- wysokości zawieszenia anten stacji abonenckich od 3 do 48 m n.p.t.,
- średniej wysokości zabudowy obszarów pracy stacji bazowych od 10,9 do 15,1 m,

przy czym różnica pomiędzy rzędnymi miejsc posadowienia anten stacji: abonenckiej i bazowej, wynosiła od -21 do +73 m.

Podsumowując, dla wszystkich danych pomiarowych (N = 18924) nowa formuła analityczna przyjmuje więc postać:

1) dla $(h_a < h_s) \cap (h_b > h_a)$

jeżeli spełnione są warunki LOS

$$L_{LOS1}[dB] = 16,32 + 20 \lg f_{[MHz]} + 18,06 \lg d_{[km]} + 11,99 \lg(h_{b[m]} - h_{s[m]}) + 0,59 \lg(h_{s[m]} - h_{a[m]}) + (19,14 \lg h_{b[m]} - 6,72 \lg h_{a[m]}) - 16,16 \lg(h_{k[m]}), \quad (5.31a)$$

w przeciwnym wypadku

$$L_{NLOS1}[dB] = 83,07 + 20 \lg f_{[MHz]} + 15,8 \lg d_{[km]} - 47,16 \lg(h_{b[m]} - h_{s[m]}) + 0,33 \lg(h_{s[m]} - h_{a[m]}) + (19,08 \lg h_{b[m]} - 20,05 \lg h_{a[m]}) + 34,43 \lg(h_{k[m]}), \quad (5.31b)$$

2) dla $(h_a \geq h_s) \cap (h_b > h_a)$

jeżeli spełnione są warunki LOS

$$L_{LOS2}[dB] = 23,02 + 20 \lg f_{[MHz]} + 16,48 \lg d_{[km]} + 8,45 \lg(h_{b[m]} - h_{s[m]}) + (22,09 \lg h_{b[m]} - 10,26 \lg h_{a[m]}) - 5,27 \lg \left(\frac{4h^2 P_{[m]}}{\lambda_{[m]}} \right), \quad (5.32a)$$

w przeciwnym wypadku

$$L_{NLOS2}[dB] = 108,6 + 20 \lg f_{[MHz]} + 21,83 \lg d_{[km]} - 26,35 \lg(h_{b[m]} - h_{s[m]}) + (-35,03 \lg h_{b[m]} + 16,61 \lg h_{a[m]}) + 23,86 \lg(h_{k[m]}), \quad (5.32b)$$

przy czym

$$h_{k[m]} = \frac{h_{b[m]} - h_{a[m]}}{2} \text{ oraz } h_{p[m]} = \frac{h_{b[m]} + h_{a[m]}}{2} - h_{s[m]}.$$

Powyższe podejście wymaga sprawdzenia czy spełnione są warunki LOS. Z pomocą przychodzi tutaj metoda statystyczna służąca do określania warunków LOS, zaprezentowana w rozdziale pierwszym niniejszej rozprawy. Szeroko są również rozpowszechnione mapy cyfrowe, pozwalające na dokładne sprawdzenie warunków LOS i NLOS.

W dalszej części pracy tłumienie propagacyjne obliczane za pomocą wyrażeń (5.31)-(5.32), dla uproszczenia zapisu, na rysunkach będzie oznaczane ogólnie jako L_{emp} .

Parametry oceny ogólnej modelu (LOS∩NLOS), gdy znana jest informacja o warunkach LOS i NLOS, a więc dla wszystkich przypadków pomiarowych $N=18924$, zależności (5.31) oraz (5.32), są następujące:

1. współczynnik determinacji, zależność (2.4), wynosi: **74,94%**,
2. błąd średni, zależność (2.1), wynosi: **0,000 dB**,
3. błąd standardowy estymacji, zależność (2.2), wynosi: **4,961 dB**.

Wielowariantowy model empiryczny przeznaczony do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w radiowych systemach dostępowych w warunku łącznym LOS i NLOS, wyjaśnia zjawisko tłumienia propagacyjnego w **74,94%**, ze standardowym błędem estymacji wynoszącym **4,961 dB** w typowym krajowym środowisku miejskim. Tylko **25,06%** zmienności badanego zjawiska nie jest wyjaśniana przez przyjęty model.

Zakres stosowalności tego modelu, wynikający z warunków w jakich przeprowadzono badania pomiarowe, jest następujący:

- długości tras propagacyjnych od 200 do 8310 m,
- wysokości zawieszenia anten stacji bazowych od 30 do 120 m n.p.t.,
- wysokości zawieszenia anten stacji abonenckich od 3 do 48 m n.p.t.,
- średniej wysokości zabudowy obszarów pracy stacji bazowych od 10,9 do 15,1 m,

przy czym różnica pomiędzy rzędnymi miejsc posadowienia anten stacji abonenckiej i bazowej, wynosiła od -21 do +73 m.

Powyższe parametry oceny ogólnej wielowariantowego modelu empirycznego dowodzą, że celowe jest odmienne podejście do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w radiowym łączu dostępowym, co stwierdzono na wstępie niniejszego rozdziału.

5.3. Analiza porównawcza z uwzględnieniem wpływu zabudowy

5.3.1. Warunki LOS

Dla wielowariantowego modelu empirycznego określonego wyrażeniami (5.31a) oraz (5.32a), zostały wykonane porównania wyników teoretycznych z pomiarowymi zebranymi na obszarach obsługiwanych przez poszczególne stacje bazowe. Rezultaty tych porównań zebrano w tab. 5.9.

Tab. 5.9. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla wielowariantowego modelu empirycznego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z podziałem na stacje bazowe – warunki LOS.

Obszar stacji bazowej	W.Model empiryczny, wyrażenia (5.31a) i (5.32a)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SSE [dB]	
GDA01	0,423	2,694	2068
GDY01	-0,552	3,371	265
GDY02	-0,639	3,621	466
GDY03	-0,242	2,846	499
KRA01	0,229	2,332	1392
KRA02	-0,253	2,477	961
KRA03	0,116	2,367	716
POZ01	0,166	3,749	1358
POZ02	-0,244	3,947	831

Na podstawie analizy wyników zawartych w tej tabeli można stwierdzić, że wartości błędu średniego są niewielkie i co do wartości bezwzględnej mniejsze od 1 dB. Natomiast błąd standardowy estymacji nie przekracza wartości 4 dB. Świadczy to o dużej przystawalności wartości obliczonych tłumienia propagacyjnego, przy użyciu opracowanego wielowariantowego modelu empirycznego do wartości pomierzonych w rzeczywistych warunkach pracy radiowego systemu dostępowego.

Dodatkowo przy sklasyfikowaniu danych pomiarowych ze względu na typ obszaru dla poszczególnych stacji bazowych (tab. 5.10 i tab. 5.11) wielowariantowy model empiryczny wykazuje również bardzo dużą przydatność projektową. Na podstawie uzyskanych rezultatów można stwierdzić, że występuje niewielkie zróżnicowanie w przystawalności wyników obliczonych przy użyciu opracowanego modelu do wartości pomiarowych, odzwierciedlających rzeczywiste warunki propagacyjne.

Tab. 5.10. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla wielowariantowego modelu empirycznego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z podziałem na stacje bazowe – warunki LOS - obszar typu I.

Obszar stacji bazowej	W.Model empiryczny, wyrażenia (5.31a) i (5.32a)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SSE [dB]	
GDA01	0,425	2,869	987
GDY01	-0,899	3,638	112
KRA01	0,704	3,437	144
KRA02	-0,203	2,367	822
KRA03	0,159	2,291	712
POZ01	0,271	3,662	1098
POZ02	-0,177	3,928	806

Tab. 5.11. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla wielowariantowego modelu empirycznego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z podziałem na stacje bazowe – warunki LOS - obszar typu II.

Obszar stacji bazowej	W.Model empiryczny, wyrażenia (5.31a) i (5.32a)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SSE [dB]	
GDA01	0,422	2,525	1081
GDY01	0,485	3,174	153
GDY02	-0,639	3,621	466
GDY03	-0,938	2,866	471
KRA01	0,059	2,171	1248
KRA02	-0,551	3,058	139
POZ01	-0,279	3,988	260

Dla zbadanych przypadków środowiska o zabudowie typu I – śródmieścia dużych miast, bezwzględne wartości błędu średniego zawierają się w przedziale od 0,159 do 0,899 dB. Natomiast dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu II – osiedla mieszkaniowe i obrzeża dużych miast, bezwzględne wartości tego błędu zawierają się w przedziale od 0,059 do 0,938 dB. Analizując rozrzut wartości błędu standardowego estymacji można zauważyć podobną tendencję, tzn. w warunkach obszaru typu I i typu II błąd ten jest mniejszy od 4,0 dB.

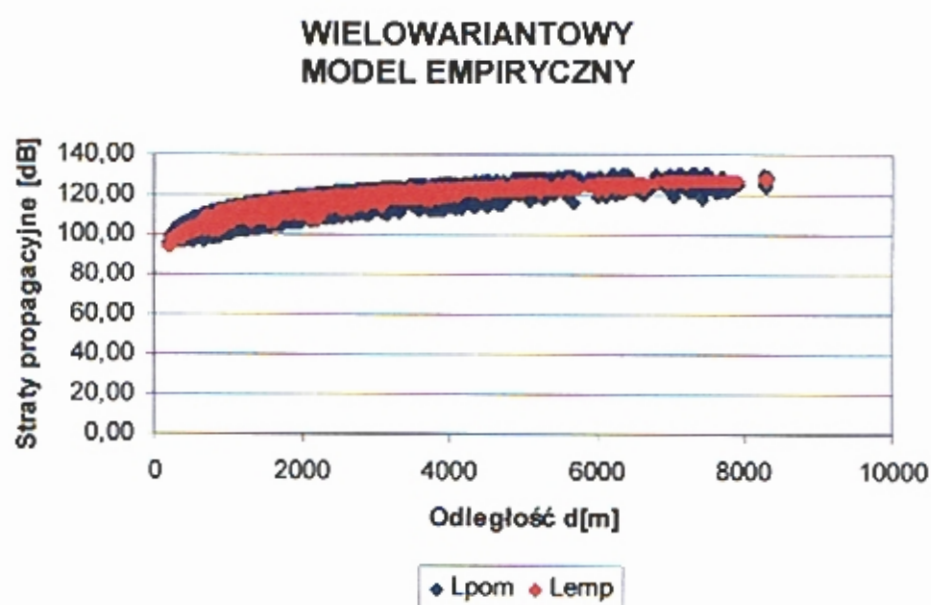
Podsumowując, w warunkach LOS wielowariantowy model empiryczny umożliwia dokładne wyznaczenie wartości tłumienia propagacyjnego, bez względu na typ obszaru, na którym zlokalizowane były stacje abonenckie, o czym mogą również świadczyć, stosunkowo niewielkie wartości błędów średniego i standardowego estymacji dla całej próby:

- na obszarze typu I błąd średni wynosi $ME = 0,123$ dB, natomiast błąd standardowy estymacji $SSE = 2,857$ dB,

- na obszarze typu II błąd średni wynosi $ME = -0,150$ dB, natomiast błąd standardowy estymacji $SSE = 3,158$ dB.

W przeprowadzonych analizach przydatności opracowanego modelu do zastosowań projektowych oceniono także przystawalność tego modelu do danych pomiarowych w funkcji długości trasy propagacyjnej. Problem ten zilustrowano na rysunkach od rys. 5.5 do rys. 5.7, gdzie przedstawiono obliczone i pomierzone wartości tłumienia propagacyjnego w funkcji długości trasy propagacyjnej, dla trzech grup zebranych wyników, tzn.:

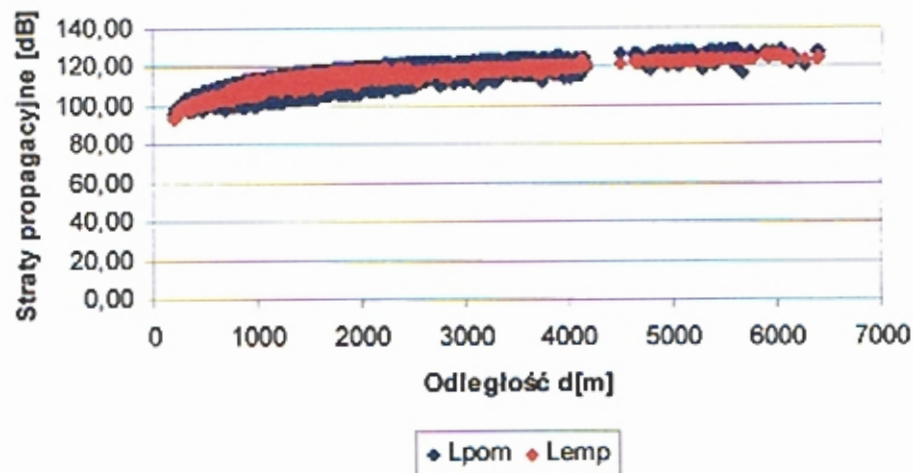
- dla wszystkich zebranych danych pomiarowych, nie uwzględniając typu środowiska propagacyjnego związanego z rodzajem zabudowy – rys. 5.5,
- dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu I – rys. 5.6,
- dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu II – rys. 5.7.



Rys. 5.5. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych dla wielowariantowego modelu empirycznego – dla wszystkich zbadanych przypadków w warunkach LOS.

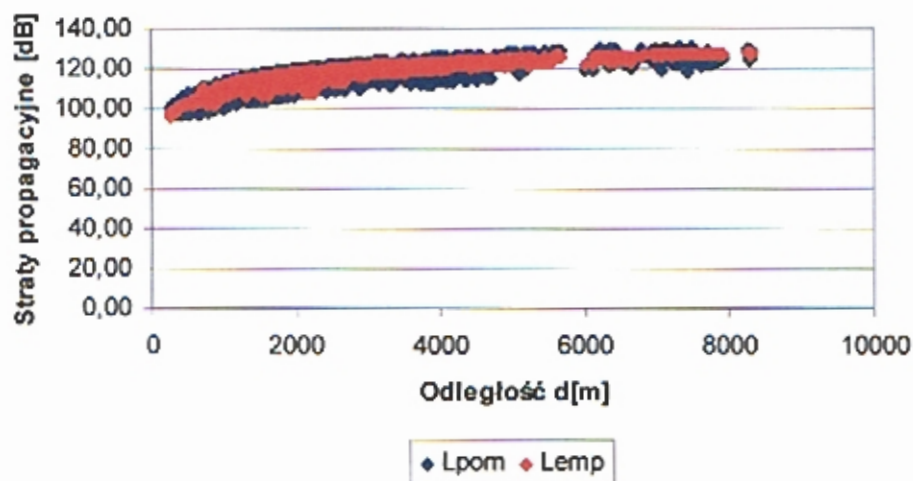
Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; L_{emp} – wartości tłumienia obliczone wg zależności (5.31a) – (5.32a).

WIELOWARIANTOWY MODEL EMPIRYCZNY



Rys. 5.6. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych dla wielowariantowego modelu empirycznego – dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu I, w warunkach LOS.
Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; L_{emp} – wartości tłumienia obliczone wg zależności (5.31a) – (5.32a).

WIELOWARIANTOWY MODEL EMPIRYCZNY



Rys. 5.7. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych dla wielowariantowego modelu empirycznego – dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu II, w warunkach LOS.
Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; L_{emp} – wartości tłumienia obliczone wg zależności (5.31a) – (5.32a).

Jak widać na powyższych rysunkach, wartości tłumienia propagacyjnego obliczone na podstawie zależności empirycznych bardzo dobrze przystają do danych pomiarowych, bez względu na długość trasy propagacyjnej.

5.3.2. Warunki NLOS

Podobnie jak poprzednio, tak i dla warunków NLOS, dla modelu empirycznego określonego wyrażeniami (5.31b) oraz (5.32b), w pierwszej kolejności dokonano porównania wyników pomiarowych zebranych na obszarach obsługiwanych przez poszczególne stacje bazowe. Rezultaty tych porównań zebrano w tab. 5.12. Wynika z nich, że wartości błędu średniego są większe aniżeli w warunkach LOS. Wartość bezwzględna błędu średniego nie przekracza wartości 4,587 dB, zaś najmniejsza wartość tego błędu wynosi 0,098 dB. Z kolei błąd standardowy estymacji dochodzi do wartości 10,838 dB, przy czym dotyczy to wyłącznie jednej stacji bazowej. W pozostałych przypadkach obserwujemy zdecydowanie mniejsze wartości błędów. Dla skrajnego przypadku błąd standardowy estymacji wynosi 3,09 dB. Na podstawie analizy wyników zawartych w tab. 5.12 można stwierdzić dużą przystawalność wartości tłumienia propagacyjnego obliczonych przy użyciu opracowanego modelu empirycznego z wartościami pomierzonymi w rzeczywistych warunkach pracy radiowego systemu dostępowego – dla przypadku NLOS. Różnice występujące pomiędzy wartościami błędów dla poszczególnych stacji bazowych wskazują na silny wpływ rodzaju zabudowy na wartości tłumienia propagacyjnego.

Tab. 5.12. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych wielowariantowego modelu empirycznego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z podziałem na stacje bazowe – warunki NLOS.

Obszar stacji bazowej	W.Model empiryczny, wyrażenia (5.31b) i (5.332b)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SSE [dB]	
GDA01	-0,098	7,234	1373
GDY01	-0,534	8,076	355
GDY02	3,946	10,838	430
GDY03	4,587	7,672	125
KRA01	-0,666	3,090	2422
KRA02	1,849	6,892	2219
KRA03	-2,538	4,778	1058
POZ01	-0,365	6,110	1229
POZ02	-0,511	5,753	605
POZ03	-1,797	5,452	552

Uwzględniając uwarunkowania związane z typem obszaru, na którym zlokalizowane są anteny stacji abonenckich wykonano analizę porównawczą uwzględniając dodatkową

klasyfikację podziału na stacje bazowe. Wyniki takiego porównania zebrano w tab. 5.13 i tab. 5.14. Dla zbadanych przypadków środowiska o zabudowie typu I – śródmieścia dużych miast, bezwzględne wartości błędu średniego zawierają się w przedziale od 0,117 do 2,778 dB. Natomiast dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu II – osiedla mieszkalne i obrzeża dużych miast, bezwzględne wartości tego błędu zawierają się w przedziale od 0,194 do 4,428 dB. Analizując rozrzut wartości błędu standardowego estymacji można zauważyć podobną tendencję, tzn. w warunkach obszaru typu I błąd ten jest mniejszy od 7,392 dB, zaś w przypadku obszaru typu II błąd ten nie przekracza 10,838 dB.

Tab. 5.13. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla wielowariantowego modelu empirycznego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście z podziałem na stacje bazowe – warunki NLOS, obszar typu I.

Obszar stacji bazowej	W.Model empiryczny, wyrażenia (5.31b) i (5.32b)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SSE [dB]	
GDA01	-0,695	7,392	714
KRA01	0,117	3,396	1065
KRA02	1,977	6,943	2161
KRA03	-2,538	4,778	1058
POZ01	-0,328	6,110	1083
POZ02	-0,487	5,765	588
POZ03	-2,777	5,079	318

Tab. 5.14. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla modelu empirycznego w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z podziałem na stacje bazowe – warunki NLOS, obszar typu II.

Obszar stacji bazowej	W.Model empiryczny, wyrażenia (5.31b) i (5.32b)		Liczebność próby N
	ME [dB]	SSE [dB]	
GDA01	0,548	7,065	659
GDY01	-0,194	8,502	267
GDY02	3,946	10,838	430
GDY03	4,428	7,559	106
KRA01	-1,281	2,829	1357
POZ01	-0,635	6,133	146
POZ03	-0,455	5,936	233

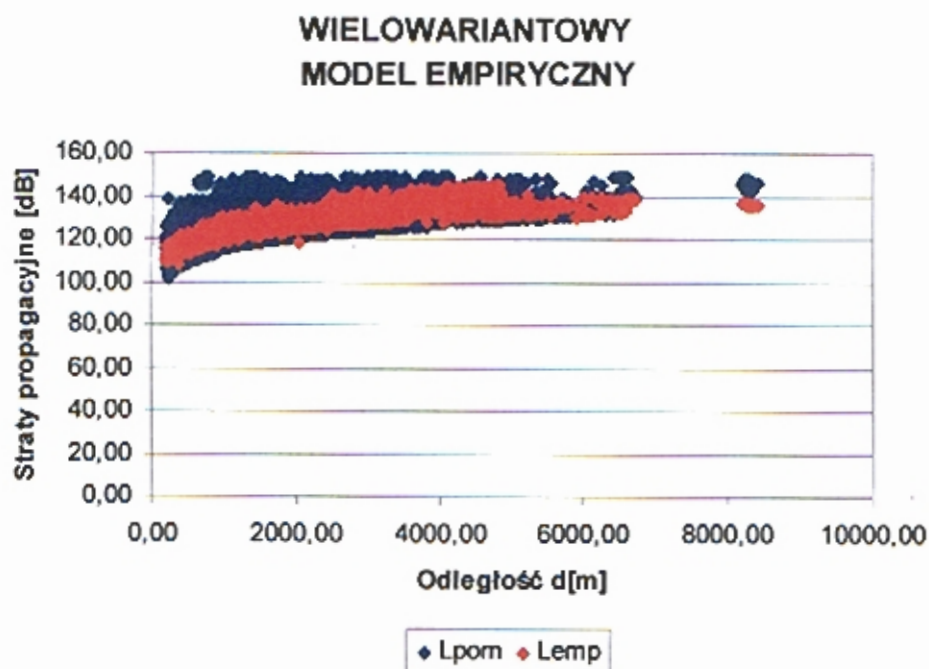
W warunkach NLOS wielowariantowy model empiryczny również pozwala wyznaczać tłumienie propagacyjne z dobrą dokładnością, o czym mogą świadczyć także wartości błędów średniego i standardowego estymacji dla całej próby, uzyskanych na obszarach, na których zlokalizowane były anteny stacji abonenckich, tzn:

- na obszarze typu I błąd średni wynosi $ME = -0,049$ dB, natomiast błąd standardowy estymacji $SSE = 5,969$ dB,

- w obszarze typu II błąd średni wynosi $ME = 0,106$ dB, natomiast błąd standardowy estymacji $SSE = 6,415$ dB.

W przeprowadzonych analizach przydatności opracowanego modelu do zastosowań użytkowych, związanych z projektowaniem systemów dostępowych w warunkach miejskich, oceniono także przystawalność tłumienia propagacyjnego, obliczonego za pomocą tego modelu, do danych pomiarowych, w zależności od długości tras propagacyjnych. Problem ten zilustrowano na rysunkach od rys. 5.8 do rys. 5.10, gdzie przedstawiono obliczone i pomierzone wartości tłumienia propagacyjnego w funkcji długości trasy propagacyjnej, dla trzech grup zebranych danych, tzn.:

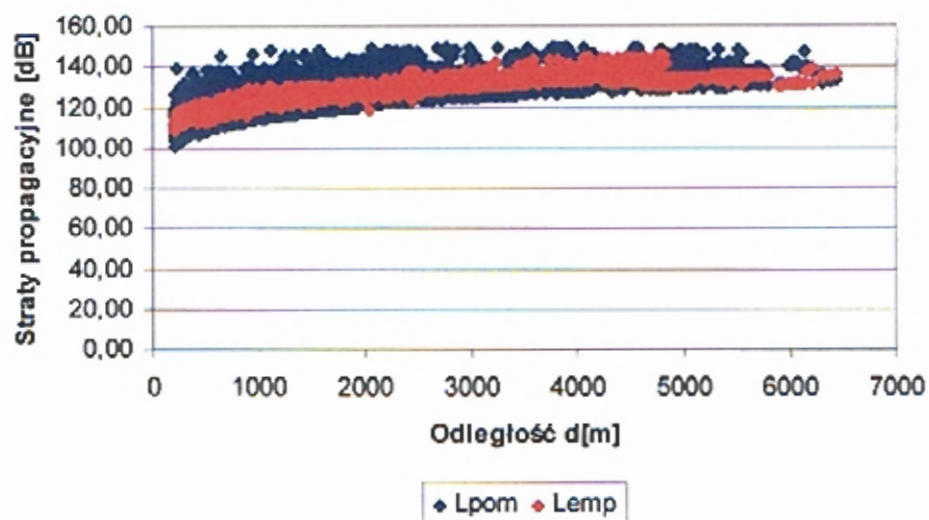
- dla wszystkich zebranych danych pomiarowych, nie uwzględniając typu środowiska propagacyjnego związanego z rodzajem zabudowy – rys. 5.8,
- dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu I – rys. 5.9,
- dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu II – rys. 5.10.



Rys. 5.8. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych dla wielowariantowego modelu empirycznego – dla wszystkich danych pomiarowych w warunkach NLOS.

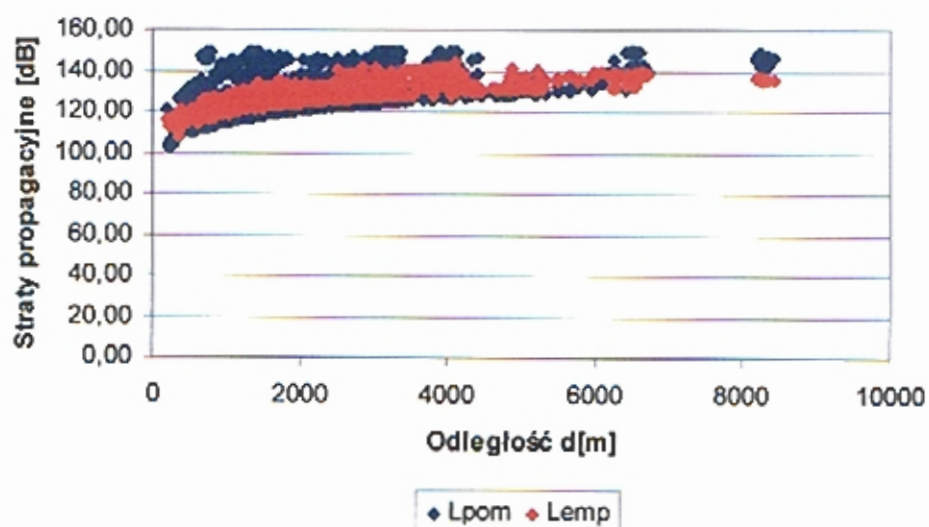
Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; L_{emp} – wartości tłumienia obliczone wg zależności (5.31b) i (5.32b).

WIELOWARIANTOWY MODEL EMPIRYCZNY



Rys. 5.9. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych dla wielowariantowego modelu empirycznego – dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu I, w warunkach NLOS.
Oznaczenia: Lpom – wartości pomierzone; Lemp – wartości tłumienia obliczone wg zależności (5.31b) i (5.32b).

WIELOWARIANTOWY MODEL EMPIRYCZNY



Rys. 5.10. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych dla wielowariantowego modelu empirycznego – dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu II, w warunkach NLOS.
Oznaczenia: Lpom – wartości pomierzone; Lemp – wartości tłumienia obliczone wg zależności (5.31b) i (5.32b).

Na zakończenie analizy porównawczej zostaną przedstawione wyniki błędów średniego i standardowego estymacji z uwzględnieniem uwarunkowań środowiska propagacyjnego, dla wszystkich danych pomiarowych. W tych warunkach wartości tłumienia propagacyjnego obliczano według zależności (5.31) oraz (5.32). Na wstępie zostały wykonane porównania wyników pomiarowych zebranych na obszarach obsługiwanych przez poszczególne stacje bazowe w stosunku do wartości obliczonych. Rezultaty tych porównań przedstawiono w tab. 5.15. Na podstawie ich analizy można stwierdzić, że wartości błędu średniego są większe aniżeli w warunkach LOS. Wartość bezwzględna błędu średniego nie przekracza wartości 1,797 dB, zaś najmniejsza wartość tego błędu wynosi 0,086 dB. Natomiast błąd standardowy estymacji waha się od 2,836 dB do 7,944 dB.

Na podstawie analizy wyników zawartych w tab. 5.15 można również stwierdzić dużą przystawalność wartości tłumienia propagacyjnego obliczonych przy użyciu opracowanego modelu empirycznego do wartościami pomierzonymi w rzeczywistych warunkach pracy radiowego systemu dostępowego.

Tab. 5.15. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla wielowariantowego modelu empirycznego, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z podziałem na stacje bazowe – wszystkie pomiary.

Obszar stacji bazowej	W.Model empiryczny, wyrażenia (5.31) i (5.32)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SSE [dB]	
GDA01	0,215	5,023	3441
GDY01	-0,528	6,492	620
GDY02	1,562	7,944	896
GDY03	-0,073	4,401	624
KRA01	-0,339	2,836	3814
KRA02	1,214	5,915	3180
KRA03	-1,466	3,984	1774
POZ01	-0,086	5,010	2587
POZ02	-0,356	4,789	1436
POZ03	-1,797	5,452	552

Uwzględniając uwarunkowania związane z typem obszaru, na którym zlokalizowane były anteny stacji abonenckich porównano oddzielnie wyniki pomiarów zebrane na obszarach działania stacji bazowych zgodnie z przyjętym kryterium klasyfikacyjnym. Wyniki takiego porównania zebrano w tab. 5.16 i tab. 5.17.

Analizując dane pomiarowe zebrane na obszarach o zabudowie typu I – śródmieścia dużych miast, można stwierdzić, że bezwzględne wartości błędu średniego zawierają się w przedziale od 0,026 do 2,778 dB. Natomiast dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu II – osiedla mieszkalne i obrzeża dużych miast, bezwzględne wartości tego błędu

zawierają się w przedziale od 0,053 do 1,561 dB. Analizując rozrzut wartości błędu standardowego estymacji można zauważyć, że w środowisku propagacji o zabudowie typu I błąd ten maksymalnie wynosi 6,038 dB, natomiast w środowisku propagacyjnym o zabudowie typu II błąd ten jest nieco większy i maksymalnie osiąga wartość 7,945 dB.

Tab. 5.16. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla wielowariantowego modelu empirycznego, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z podziałem na stacje bazowe – obszar typu I.

Obszar stacji bazowej	W.Model empiryczny, wyrażenia (5.31) i (5.32)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SSE [dB]	
GDA01	-0,045	5,262	1701
GDY01	-1,751	5,175	200
KRA01	0,306	3,399	1209
KRA02	1,376	6,038	2983
KRA03	-1,453	3,969	1770
POZ01	-0,026	5,027	2181
POZ02	-0,307	4,788	1394
POZ03	-2,778	5,079	319

Tab. 5.17. Zestawienie błędów: średniego (ME) i standardowego estymacji (SSE), obliczonych dla wielowariantowego modelu empirycznego, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, z podziałem na stacje bazowe – obszar typu II.

Obszar stacji bazowej	Model empiryczny, wyrażenia (5.31) i (5.32)		Liczebność próby (N)
	ME [dB]	SSE [dB]	
GDA01	0,467	4,779	1740
GDY01	0,053	7,039	420
GDY02	1,561	7,945	896
GDY03	-0,301	4,283	577
KRA01	-0,639	2,534	2604
KRA02	-1,245	3,577	197
POZ01	-0,407	4,923	406
POZ03	-0,455	5,936	233

Wielowariantowy model empiryczny, jak widać przystaje bardzo dobrze do danych pomiarowych niezależnie od typu obszaru na którym są zlokalizowane anteny stacji abonenckich, o czym mogą świadczyć również obliczone błędy średni i standardowy estymacji dla całej próby dla obszarów, na których zlokalizowane były anteny stacji abonenckich, tzn.:

- na obszarze typu I błąd średni wynosi $ME = 0,019$ dB, natomiast błąd standardowy estymacji $SSE = 4,829$ dB,

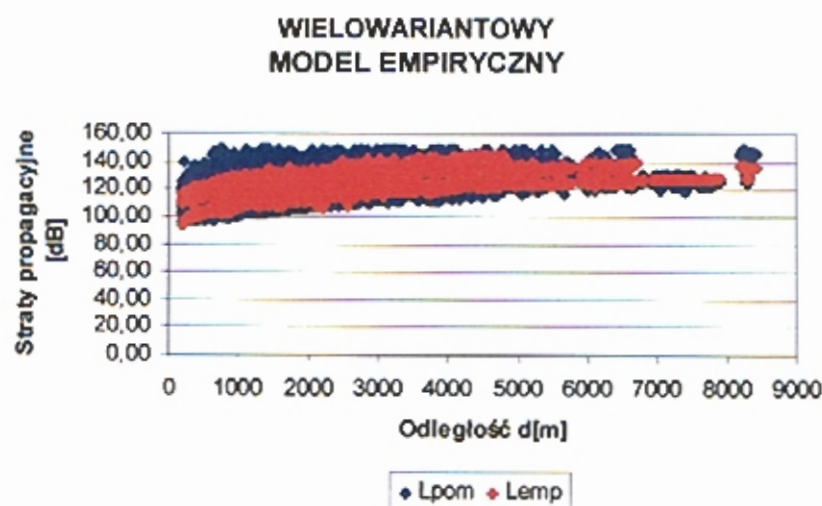
- w obszarze typu II błąd średni wynosi $ME = -0,032$ dB, natomiast błąd standardowy estymacji $SSE = 5,039$ dB.

W przeprowadzonych badaniach przydatności opracowanego wielowariantowego modelu empirycznego do zastosowań użytkowych, związanych z projektowaniem systemów dostępowych w warunkach miejskich, oceniono także przystawalność tego modelu do danych pomiarowych, mając przy tym także na uwadze długości analizowanych tras propagacyjnych. Problem ten zilustrowano na rysunkach od rys. 5.11 do rys. 5.13, na których przedstawiono obliczone i pomierzone wartości tłumienia propagacyjnego w funkcji długości trasy propagacyjnej, dla trzech grup zebranych danych, tzn.:

- dla wszystkich zebranych danych, nie uwzględniając typu środowiska propagacyjnego związanego z rodzajem zabudowy – rys. 5.11,
- dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu I – rys. 5.12,
- dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu II – rys. 5.13.

Jak widać na tych rysunkach, wielowariantowy model empiryczny określony zależnościami (5.31) oraz (5.32), czyli dla wszystkich danych pomiarowych w zależności od odległości trasy propagacyjnej również bardzo dobrze przystaje do danych pomiarowych.

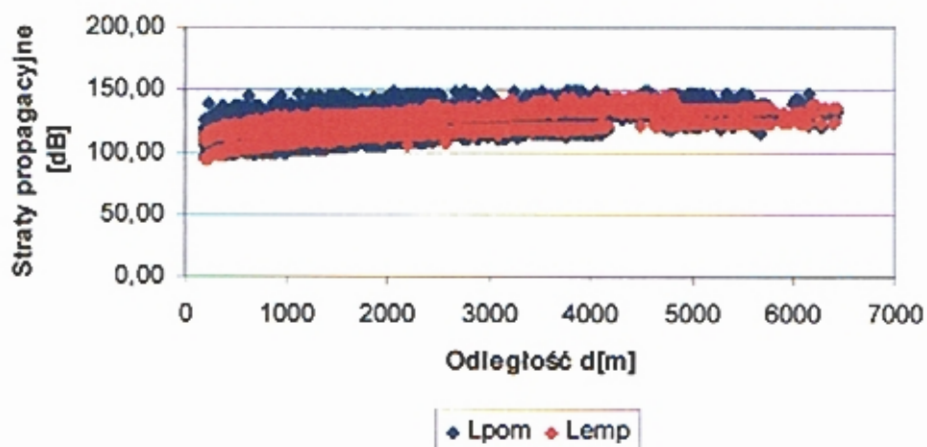
Na zakończenie dla załączonego fragmentu mapy cyfrowej terenu, znajdującego się w Załączniku nr 2, została wykonana analiza zasięgowa dla stacji bazowej niezwiązanej z prowadzonymi badaniami (obszar zakreskowany na czerwono), dając bardzo dobre rezultaty przy błędzie średnim ME równym $-0,837$ dB i błędzie standardowym estymacji SEE równym $3,804$ dB.



Rys. 5.11. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych dla wielowariantowego modelu empirycznego – dla wszystkich zbadanych przypadków.

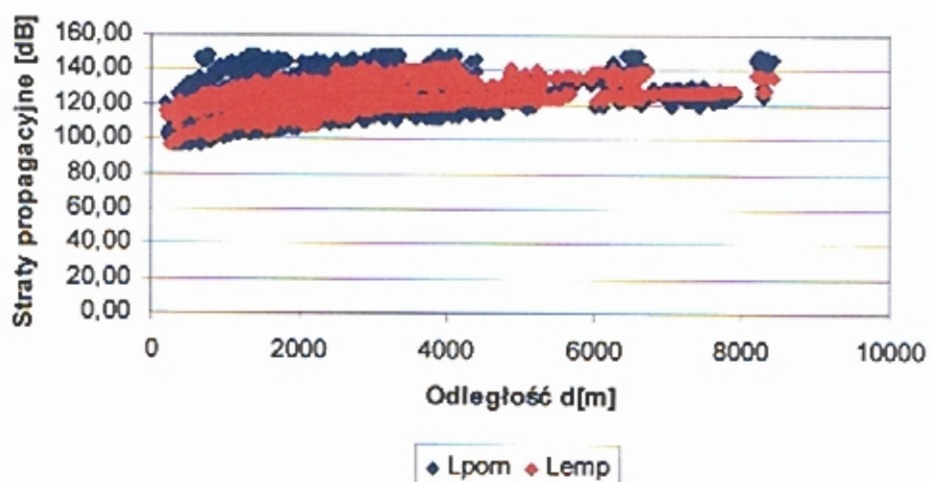
Oznaczenia: Lpom – wartości pomierzone; Lemp – wartości tłumienia obliczone wg zależności (5.31) i (5.32).

WIELOWARIANTOWY MODEL EMPIRYCZNY



Rys. 5.12. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych dla wielowariantowego modelu empirycznego – dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu I.
Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; L_{emp} – wartości tłumienia obliczone wg zależności (5.31) i (5.32).

WIELOWARIANTOWY MODEL EMPIRYCZNY



Rys. 5.13. Rozrzut pomierzonych i obliczonych wartości tłumienia propagacyjnego w zależności od długości tras propagacyjnych dla wielowariantowego modelu empirycznego – dla środowiska propagacyjnego o zabudowie typu II.
Oznaczenia: L_{pom} – wartości pomierzone; L_{emp} – wartości tłumienia obliczone wg zależności (5.31) i (5.32).

5.4. Ocena przydatności modelu empirycznego

Przedstawiona analiza miar dopasowania wyników obliczeń tłumienia propagacyjnego uzyskanych przy użyciu proponowanej nowej empirycznej metody wyznaczania tego tłumienia do rzeczywistych pomierzonych jego wartości pozwala stwierdzić, że spośród wszystkich przebadanych modeli propagacyjnych jest to metoda **najdokładniejsza zarówno w warunkach LOS jak i NLOS, a więc najlepiej przystaje do wszystkich przeanalizowanych przypadków propagacyjnych.**

Porównanie jakościowe nowego modelu z wybranymi dla warunków LOS i NLOS dotychczas stosowanymi modelami propagacyjnymi przedstawia się następująco.

Badania przeprowadzone w warunkach LOS wykazały, że dotychczas względnie najdokładniejszego oszacowania tłumienia propagacyjnego możliwe było za pomocą modelu ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$. W badaniach tych błąd standardowy estymacji dla tego modelu wyniósł 3,472 dB, przy niewielkim bo wynoszącym 0,373 dB błędzie średnim. Natomiast współczynnik determinacji dla tego modelu wyniósł 73,1% co oznacza, że ponad 73% zmienności tłumienia propagacyjnego jest wyjaśniana przez ten model. Zmodyfikowanie tego modelu, wykonane w trakcie niniejszej rozprawy, pozwoliło zmniejszyć wartość błędu standardowego estymacji do wartości 3,318 dB, przy jednoczesnym zwiększeniu współczynnika determinacji do wartości 75,11%. W tych samych warunkach, proponowany wielowariantowy model empiryczny okazuje się najdokładniejszy. Błąd standardowy estymacji wyznaczania tłumienia propagacyjnego za jego pomocą wynosi 3,026 dB. Natomiast współczynnik determinacji wynosi aż 79,31%. Przy czym dla zdefiniowanej w rozprawie sytuacji LOS1 dochodzi on do 81,22%. Zaś szczególną zaletą wielowariantowego modelu empirycznego jest znacznie dokładniejsze, w porównaniu z modelem ITU-R P.1411 $L_{LOS,U}$, wyznaczanie tłumienia propagacyjnego dla poszczególnych stacji bazowych. W tym przypadku wahania błędów są dużo mniejsze, co świadczy o dużej niezależności wielowariantowego modelu empirycznego od lokalnego charakteru środowiska propagacyjnego, związanego z daną stacją bazową.

Natomiast w sytuacjach NLOS względnie najlepsze wyniki otrzymano przy użyciu modelu COST 231 Walfisha-Ikegami, co poniekąd wynika z przeznaczenia tego modelu. W tym przypadku błąd standardowy estymacji wyniósł 6,788 dB, zaś współczynnik determinacji był równy 40,98%. W takich samych warunkach pracy łącza dostępowego wielowariantowy model tłumienia propagacyjnego pozwala wyznaczać tłumienie propagacyjne z błędem standardowym estymacji równym 6,110 dB, przy współczynniku

determinacji wynoszącym 50,43%. Przedstawiona w rozprawie nowa formuła pozwala więc zwiększyć wyjaśnialność zmienności tłumienia propagacyjnego o prawie 10%.

Jak wykazały badania przeprowadzone dla wszystkich przypadków propagacyjnych - a więc w ocenie najbardziej uogólnionej z praktycznego punktu widzenia, dotychczas najdokładniejszym modelem do szacowania tłumienia propagacyjnego był model COST 231 Walfisha – Ikegamiego dla warunków NLOS. Model ten szacuje tłumienie propagacyjne z błędem standardowym estymacji wynoszącym 11,147 dB, przy błędzie średnim wynoszącym 1,044 dB. Natomiast zmodyfikowanie modelu COST 231 Haty oraz Okumury-Haty pozwoliło uzyskać następującą poprawę dokładności szacowania tłumienia propagacyjnego. Dla każdego z tych modeli błąd standardowy estymacji wyniósł w tym przypadku ok. 7,963 dB, przy współczynniku determinacji wynoszącym ok. 35,4%. Jednakże w opisywanej sytuacji najlepszą metodą wyznaczania tłumienia propagacyjnego okazuje się być również wielowariantowy model empiryczny, dla którego błąd standardowy estymacji wynosi 4,961 dB, a więc jest to o około 3 dB lepiej aniżeli dla modeli opartych na zależnościach Haty. Ponadto, w przypadku nowego modelu empirycznego radykalnie zwiększył się współczynnik determinacji, który wynosi aż 74,94%, a więc uzyskano dodatkowe 39 procentowe zwiększenie wyjaśnialności zmienności tłumienia propagacyjnego. Stosując ten model uzyskano także znacznie dokładniejsze wyniki tłumienia propagacyjnego obliczonego dla poszczególnych stacji bazowych, zarówno w przypadku warunków LOS jak i również NLOS.

Podsumowując, można stwierdzić, że opracowany wielowariantowy model empiryczny jest najdokładniejszym sposobem wyznaczania tłumienia propagacyjnego w warunkach pracy radiowego łącza dostępowego w terenie zabudowanym, dzięki pełnemu uwzględnieniu w nim miejskiej specyfiki środowiska propagacyjnego. Wynikiem tego jest bardzo duża przydatność użytkowa tego modelu do projektowania i analizowania radiowych systemów dostępowych, w tym także do badania ich stanu kompatybilności elektromagnetycznej.

PODSUMOWANIE

Modelowanie tłumienia propagacyjnego w środowisku miejskim jest procesem bardzo złożonym, uwarunkowanym wieloma czynnikami. Przede wszystkim wpływ na jego wartość ma charakter tego środowiska, a w tym takie czynniki jak spełnienie warunków LOS, wysokość zabudowy obszaru pracy stacji bazowej, gęstość tej zabudowy oraz inne.

W warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście, szczególnie istotnym czynnikiem wpływającym na wielkość tłumienia propagacyjnego jest warunek zachowania widoczności pomiędzy antenami łącza radiowego (LOS). Ponadto na wielkość tego tłumienia istotny wpływ mają także następujące okoliczności:

- długość trasy propagacji fali radiowej,
- częstotliwość pracy łącza radiowego,
- usytuowanie anteny stacji abonenckiej względem średniej wysokości zabudowy obszaru obsługiwanego przez stację bazową,
- stopień zaburzenia I strefy Fresnela, oraz także
- bezwzględne wysokości wzniesienia anten stacji bazowej i abonenckiej.

W pracy wykonano badania porównawcze wyników obliczeń otrzymanych przy użyciu reprezentatywnych modeli propagacyjnych z danymi pomiarowymi tłumienia propagacyjnego wykonanymi w rzeczywistych warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście. Przeprowadzona analiza przydatności projektowej znanych i zalecanych przez ITU-R do stosowania modeli propagacyjnych dowiodła, że w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście modele te nie wyjaśniają w zadawalającym stopniu zjawiska tłumienia propagacyjnego. Jest to spowodowane przede wszystkim tym, że modele te opracowane zostały dla potrzeb projektowania sieci radiokomunikacji ruchomej lądowej. Natomiast ITU-R jak dotąd nie precyzuje zaleceń odnośnie projektowania radiowych sieci dostępowych.

Na podstawie powyższego, podczas przeprowadzonych badań w ramach niniejszej rozprawy wyróżniono dwa przypadki szczególnie istotne z punktu widzenia projektowania radiowych systemów dostępowych w mieście:

1. propagacja fal radiowych w warunkach LOS, oraz
2. propagacja fal radiowych w warunkach NLOS.

Dodatkowo wykazano, że czynnikiem istotnie wpływającym na wartość tłumienia propagacyjnego w obu powyższych przypadkach jest usytuowanie anteny stacji abonenckiej względem średniej wysokości zabudowy obszaru pracy stacji bazowej.

Na podstawie tego sklasyfikowano środowisko propagacyjne w radiowych systemach dostępowych na cztery charakterystyczne jego rodzaje, dla których opracowano nowe wielowariantowe ujęcie analityczne do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w radiowym łączu dostępowym w mieście.

W trakcie niniejszej rozprawy doktorskiej wykazano, że we wszystkich zbadanych i przeanalizowanych sytuacjach propagacyjnych najlepiej wyjaśniającym zjawisko tłumienia propagacyjnego jest zaproponowany wielowariantowy model empiryczny. Współczynnik determinacji, czyli stopień wyjaśnienia badanego zjawiska – w tym przypadku tłumienia propagacyjnego w łączu radiowym wyznaczanego przy użyciu tego modelu, dla wszystkich zbadanych przypadków (LOS i NLOS) wynosi 74,94%, przy czym w sytuacjach LOS1 dochodzi aż do 81,22%.

Tym samym osiągnięty został główny cel rozprawy polegający na opracowaniu nowego bardziej dokładnego modelu przeznaczonego do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w rzeczywistym środowisku miejskim, w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego.

Dowodzi to słuszności postawionej głównej tezy rozprawy, która dotyczyła wykazania, że poprzez zastosowanie tego modelu można uzyskać znaczącą poprawę wyznaczania tego tłumienia.

Świadczą o tym przede wszystkim wyżej prezentowane wartości miar dopasowania dla wielowariantowego modelu empirycznego oraz przedstawiona w pracy analiza błędów średniego i błędu standardowego estymacji. Poprzez opracowanie nowego wielowariantowego modelu empirycznego opisanego nowymi formułami analitycznymi uzyskano znaczne, omówione w rozdziale 5.4., zmniejszenie błędów wyznaczania tłumienia propagacyjnego w łączu dostępowym w mieście, także w stosunku do zmodyfikowanych modeli propagacyjnych przeznaczonych do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w systemach radiokomunikacji ruchomej lądowej.

Udowodniona została także słuszność tezy pomocniczej, która dotyczyła wykazania, że dla wybranych modeli propagacyjnych przeznaczonych do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w systemach radiokomunikacji ruchomej lądowej można poprzez ich modyfikację uzyskać poprawę szacowania tego tłumienia dla potrzeb projektowania radiowych systemów dostępowych w warunkach miejskich.

Wówczas to, dla przypadków występowania warunków LOS, na uwagę zasługuje zmodyfikowany model ITU-R P.1411 L_{LOS,U}, który wyjaśnia tłumienie propagacyjne w radiowych systemach dostępowych w 75,12% takich przypadków – dla przypomnienia nowy model empiryczny w takich sytuacjach wyjaśnia tłumienie propagacyjne w 81,22% przypadków.

Wykazano także, że modyfikacja modelu COST 231 Walfisha – Ikegamiego do szacowania tłumienia propagacyjnego w warunkach LOS, o dodatkowy funkcyjny współczynnik korekcyjny pozwala wyjaśnić badane zjawisko w 74,63%. Natomiast zmodyfikowany o współczynniki liczbowe model wolnej przestrzeni w tych samych warunkach łącza dostępowego wyjaśnia zjawisko w 73,7%.

W drugiej grupie zbadanych przypadków, tj. w warunkach NLOS, najlepszym modelem do wyznaczania tłumienia propagacyjnego, poza wielowariantowym modelem empirycznym, jest skorygowany o współczynniki liczbowe model COST 231 Haty. Wyjaśnia on zjawisko tłumienia propagacyjnego w 35,42% i również dotyczy to wszystkich zbadanych przypadków.

Wszystkie te modele najlepiej jest stosować w następującym zakresie parametrów łącza radiowego:

1. długość trasy propagacji d : 200 – 8310 m,
2. wysokość wzniesienia anteny stacji bazowej h_b : od 30 do 120 m n.p.t,
3. wysokość wzniesienia anteny stacji abonenckiej h_a : od 3 do 48 m n.p.t.,
4. średnia wysokość zabudowy terenu h_g : od 10,9 do 15,1 m.

Na koniec należy zaznaczyć, że opracowany model empiryczny oraz opisane zmodyfikowane modele propagacyjne w naturalny sposób nadają się do wykorzystania przy projektowaniu radiowych systemów dostępowych, z zastosowaniem map cyfrowych w technologii projektowej wspomaganą techniką komputerową.

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
BIBLIOTEKA NAUKOWA

Nr 5-10288

LITERATURA

- [1] Amanowicz M., Gajewski P., Kołosowski W., Wnuk M., *Komputerowe wspomaganie analizy rozkładu natężenia pola elektrycznego urządzeń radiokomunikacji z uwzględnieniem profilu terenu*, Polanica 1996.
- [2] Balicki A., Makać W., *Metody wnioskowania statystycznego*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 1997.
- [3] Bem D.J., *Anteny i rozchodzenie się fal radiowych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
- [4] Bem D.J., Janiszewski J.M., Więckowski T.W., Zieliński R.J., *Nowoczesne Systemy Radiokomunikacyjne*, Politechnika Wroclawska Instytut Telekomunikacji i Akustyki (materiały szkoleniowe), 1997.
- [5] Benjamin J.R., Cornell C.A., *Rachunek prawdopodobieństwa statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
- [6] Bertoni H.L., Honcharenko W., Maciel L.R., Xia H.H., *UHF Propagation Prediction for Wireless Personal Communications*, Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 9, 1994.
- [7] Bogucka H., *Projektowanie i obliczenia w radiokomunikacji- wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [8] Cardona N., Möller P., Alonso F., *Applicability of Walfisch-Type Urban Propagation Models*, Electronics Letters, vol. 31, no. 23, November 1995.
- [9] Charatoniuk A., Kołosowski W., Ziółkowski C., *Problematyka określania liczebności próby i czasowej dyskretyzacji w pomiarach natężenia pola fali przyziemnej*, Materiały konferencyjne Krajowego Sympozjum Telekomunikacji, Bydgoszcz 1996.
- [10] Cheung J.C.S., Beach M.A., Chard S., *Propagation Measurements to Support Third Generation Mobile Radio Network Planning*, Proc of VTC'93, 1993.
- [11] Cichon D.J., Kürner T., Wiesbeck W., (in German) *Modellierung der Wellenausbreitung in urbanem Gelände*, (Wave Propagation Modelling in Urban Area), FREQUENZ, vol. 47, no. 1-2, 1993.
- [12] COST 231 TD (90) 119 Rev. 1, *Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900- and 1800- MHz Bands*, Florence, 1991.
- [13] Czarnecki M., Hausman S., Korbel P., Lewicki M., Piaścik T., *Porównanie wyników modelowania rozkładu natężenia pola w terenie zurbanizowanym z wykorzystaniem metod Okumury i Andersona*, Materiały konferencyjne Krajowej Konferencji Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Poznań, maj 2002.

- [14] Damosso E., *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems*, COST 231 Final Report.
- [15] Dersch U., Zollinger E., *Physical Characteristics of Urban Micro-cellular Propagation*, IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol. 42, no. 11, Nov. 1994.
- [16] Dobosz M., *Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*, Exit, 2001.
- [17] Dołuchanow M. P., *Rozchodzenie się fal radiowych*, PWN, Warszawa, 1965.
- [18] Draper N.R., Smith H., *Analiza regresji stosowana*, PWN, Warszawa 1973.
- [19] Gobson J.P., *The Mobile Communications Handbook*, CRC Press with IEEE Press, 1996.
- [20] Hata M., *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Services*, IEEE Trans. On Vehicular Technology, vol. VT-29, no. 3, 1980.
- [21] Hata M., Kinoshita K., Hirade K., *Radio Link Design of Cellular Land Mobile Communication Systems*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-31, no.1, February 1982.
- [22] Hołejko K., *Radiokomunikacja ruchoma. Charakterystyka kanału radiowego*, Przegląd Telekomunikacyjny, nr 5-6, 1995.
- [23] Ikegami F., *Mobile Radio Communication in Japan*, IEEE Trans. On Commun, 1972.
- [24] Ikegami F., Yoshida S., *Analysis of Multipath Propagation Structure in Urban Mobile Radio Environments*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-28, no.4, July 1980.
- [25] Ikegami F., Yoshida S., Takeuchi T., Umehira M., *Propagation Factors Controlling Mean Field Strength on Urban Streets*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-32, no. 8, August 1984.
- [26] InnoWave Tadiran Telecommunications, Wireless Systems Ltd., *Network Planning Course* (materiały szkoleniowe), 1999.
- [27] InnoWave, *MultiGain Wireless HFIT-100 – User's Manual*, March 1999.
- [28] Instytut Łączności, *Aktualizacja opracowań dotyczących metodyki planowania i projektowania sieci radiokomunikacji ruchomej lądowej*, 1983.
- [29] ITU, Rec. P.1411, *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 100GHz*.
- [30] ITU-R Doc.3K/15-E, *Propagation Prediction Methods for Sharing Between a Land Mobile Access System and Fixed Wireless Access System*, 1998.
- [31] ITU-R Rec. PN.525-2, *Calculation of Free-Space Attenuation*, 1994.
- [32] ITU-R, Rec. P.1410-1, *Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Broadband Milimetric Radio Access Systems Operating in a Frequency Range of About 20-50 GHz*, 2001.
- [33] ITU-R, Rec. P.341-5, *The Concept of Transmission Loss for Radio Links*, 1999.
- [34] ITU-R, Rec. P.370-7, *VHF and UHF Propagation Curves for Frequencies Range from 30 to 1000 MHz*.

- [35] Jakes W.C., *Microwave Mobile Communications*, John Wiley & Sons, 1974.
- [36] Józwiak J., Podgórski J., *Statystyka od podstaw*, PWE, Warszawa 2000.
- [37] Katulski R.J., Pawłowski W., **Kiedrowski A.**, *Testing of Selected Propagation Models for Radio Access Systems EMC Analysis*. Materiały konferencyjne International Wrocław Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Wrocław 2002.
- [38] Katulski R. J., *Technika dostępu do kanału radiowego – nowoczesne rozwiązanie systemu łączności bezprzewodowej*, IV-te Międzynarodowe Sympozjum – Rozwój Techniki Wojskowej, Gdynia 1996.
- [39] Katulski R.J., **Kiedrowski A.**, *Analiza projektowa radiowej stacji dostępowej w terenie zabudowanym*, Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej, Seria: Technologie Informacyjne, Gdańsk 2003.
- [40] Katulski R.J., **Kiedrowski A.**, *Empiryczny model tłumienia propagacyjnego w systemie dostępowym*, Materiały konferencyjne Krajowego Sympozjum Telekomunikacji, Bydgoszcz 2004 – referat przyjęty do publikacji.
- [41] Katulski R.J., **Kiedrowski A.**, *Model COST 231 Haty w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście*, Materiały konferencyjne Krajowej Konferencji Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Wrocław 2003.
- [42] Katulski R.J., **Kiedrowski A.**, *Model COST 231 Walfisha-Ikegamiego w warunkach systemu dostępowego*, Materiały konferencyjne Krajowej Konferencji Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Warszawa 2004.
- [43] Katulski R.J., **Kiedrowski A.**, *Wyznaczanie tłumienia propagacyjnego w systemie dostępowym w warunkach miejskich*, Przegląd Telekomunikacyjny, nr 11, 2003.
- [44] Katulski R.J., **Kiedrowski A.**, *Wyznaczanie tłumienia propagacyjnego w warunkach miejskich*, Materiały konferencyjne Krajowego Sympozjum Telekomunikacji, Bydgoszcz 2003.
- [45] Katulski R.J., **Kiedrowski A.**, *Zmodyfikowany model COST 231 Haty do projektowania systemów dostępowych*, Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej, Seria: Technologie Informacyjne, Gdańsk 2004.
- [46] Katulski R.J., Kopciuszuk M., *System ekspertowy do projektowania radiowej stacji bazowej*, Materiały konferencyjne Krajowego Sympozjum Telekomunikacji, Bydgoszcz 2002.
- [47] Katulski R.J., Pawłowski W., **Kiedrowski A.**, *Modele propagacyjne w radiowych systemach dostępowych*, Materiały konferencyjne VIII Krajowej Konferencji: Automatyzacja i Eksploatacja Systemów Sterowania i Łączności, Gdynia 2001.
- [48] Katulski R.J., *Projektowanie stacji radiokomunikacyjnej*, Przegląd Telekomunikacyjny, nr 10, 2002.
- [49] Keller J.B., *Geometrical Theory of Diffraction*, *Jurnal Opt. Soc. Am.*, vol. 52, 1962.
- [50] **Kiedrowski A.**, *Badania pomiarowe warunków propagacji w radiowych systemach dostępowych*, Materiały konferencyjne VIII Krajowej Konferencji: Automatyzacja i Eksploatacja Systemów Sterowania i Łączności, Gdynia 2001.

- [51] Kołosowski W., Orliński B., *Propozycja rozszerzenia zależności Haty dla terenu otwartego uwzględniająca zmiany w typie pokrycia terenu*, Materiały konferencyjne Krajowego Sympozjum Telekomunikacji, Bydgoszcz 2002.
- [52] Laiho J. I. inni, *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*, John Wiley & Sons, 2002.
- [53] Leberherz M., Wiesbeck W., Krank W., *A Versatile Wave Propagation Model for the VHF/UHF Range Considering Three Dimensional Terrain*, IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol. 40, no. 10, October 1992.
- [54] Lee W.C.Y., *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, Mc Graw-Hill, 1989.
- [55] Lee W.C.Y., *Mobile Communications Design Fundamentals*, John Wiley & Sons, 2002.
- [56] Löw K., *Comparison of Urban Propagation Models with CW-Measurements*, Proc. Vehicular Technology Conference, 1992.
- [57] Luszniwicz A., *Statystyka ogólna*, PWE, Warszawa 1980.
- [58] Makać W., Urbanek-Krzysztofiak D., *Metody opisu statystycznego*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2000.
- [59] Malaga A., *An Empirical Path Loss Model for HF/VHF Propagation in Urban Areas*, Radio Science, vol. 16, no. 3, May-June 1981.
- [60] Microsoft Press, *Microsoft Exel 97 wersja polska*, Wydawnictwo RM Sp. z o.o., Warszawa 1997.
- [61] Möller P., *Urban Area Radio Propagation Measurements and Comparison to a New Semi-deterministic Model*, Diplomarbeit, Universidad Politécnica de Valencia and Universität Karlsruhe, Spain and Germany, 1994.
- [62] MultiGain Wireless – manual description, 1998.
- [63] Okumura Y. et al., *Field Strength and its Variability in VHF and UHF Mobile Service*, Rev. Elec. Lab., vol. 16, 1968.
- [64] Pahlavan K., Levesque A.H., *Wireless Information Networks*, John Wiley & Sons, 1995.
- [65] Parsons D., *The Mobile Radio Propagation Channel*, Pentech Press, 1994.
- [66] Pawłowski W., *Analiza metody ITU-R przewidywania wartości natężenia pola w systemach „point-to-area”*, Materiały konferencyjne X Krajowego Sympozjum Nauk Radiowych – URSI, Poznań 2002.
- [67] Pawłowski W., *Analiza uwarunkowań propagacyjnych w środowisku około-budynkowym*, Materiały konferencyjne Krajowego Sympozjum Telekomunikacji, Bydgoszcz 2002.
- [68] Pawłowski W., *Field Strength Calculations for Cellular Mobile Services*, Proc. Of VII Polish National Symposium on Radio Science, Gdańsk 1993.
- [69] Pawłowski W., *Kompatybilność elektromagnetyczna w radiokomunikacji ruchomej lądowej*, Przegląd Telekomunikacyjny, nr 5-6, 1995.
- [70] Pawłowski W., *Modele propagacyjne w telekomunikacji bezprzewodowej*, Przegląd Telekomunikacyjny, nr 9, 1997.

- [71] Pawłowski W., *Warunki propagacji fal radiowych na trasach krótkich w terenie miejskim*, Materiały konferencyjne Krajowego Sympozjum Telekomunikacji, Bydgoszcz 1999.
- [72] Podgórski J., *Statystyka z komputerem, Statgraphics, wersja 5 i 6*, MIKOM, Warszawa 1995.
- [73] Prasad N., Prasad A., *WLAN Systems and Wireless IP for Next Generation Communications*, Artech House, 2002.
- [74] Proakis J. G., *Digital Communications*, McGraw-Hill, second edition, 1989.
- [75] Proakis J.G., Salehi M., *Communication Systems Engineering*, Prentice Hall, 1994.
- [76] Rappaport T.S., *Wireless Communications, Principle and Practice*, Prentice Hall, 1996.
- [77] Rasiukiewicz M., Leśnicki A., *Podstawy systemów horyzontowych linii radiowych*, WKŁ, Warszawa 1983.
- [78] Rutkowski D., *Podstawy sieci komórkowych i perspektywy ich rozwoju*, Przegląd Telekomunikacyjny, nr 4, 1996.
- [79] Saunders S. R., *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, Wiley & Sons, 1999.
- [80] Saunders S.R., Bonar F.R., *Prediction of Mobile Radio Wave Propagation over Buildings of Irregular Heights and Spacings*, IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol. 42, no. 2, 1994.
- [81] Smirnow N.W., Dunin-Barkowski, *Krótki kurs statystyki matematycznej dla zastosowań technicznych*, PWN, 1966.
- [82] Steele R., *Mobile Radio Communication*, Pentech Press, 1992.
- [83] Stojmenović I. (ed.), *Handbook of Wireless Networks and Mobile Computing*, John Wiley & Sons, 2002.
- [84] Telekomunikacja Polska S.A., *Program MAPA – instrukcja obsługi*, Warszawa 1993.
- [85] Viterbi A. J., *CDMA Principles of Spread Spectrum Communication*, Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [86] Vogler L., *An Attenuation Function for Multiple Knife Edge Diffraction*, Radio Science, 17, 1982.
- [87] Walfish J., Bertoni H.L., *A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-28, no.12, 1980.
- [88] Weisbrodt R., Zieliński R. J., *Architektura sieci dostępowych*, Materiały konferencyjne KST, Bydgoszcz, 1997.
- [89] Wesołowski K., *Systemy radiokomunikacji ruchomej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2003.
- [90] Więckowski T.W., *Wymagania stawiane systemom radiowego dostępu abonenckiego*, Materiały konferencyjne Krajowego Sympozjum Telekomunikacji, Bydgoszcz 1996.
- [91] Więckowski T.W., *Radiowe systemy dostępowe*, Przegląd Telekomunikacyjny, nr 8-9, 2000.

- [92] Wojnar A., *Systemy radiokomunikacji ruchomej lądowej*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1989.
- [93] Zalecenie ETSI, ETR 139, *Radio Equipment and Systems (RES): Radio in the Local Loop*, November 1994.

ZAŁĄCZNIK 1

Tab. Z1.1. Analiza przydatności projektowej modeli : zestawienie błędów: średnich i standardowych estymacji dla form klasycznych modeli propagacyjnych zastosowanych w warunkach pracy radiowego systemu dostępowego w mieście.

MODEL	WOLNEJ PRZESTRZENI		ITU-R P.1411 (LOS) - L _{Los,L}		ITU-R P.1411 (LOS)- L _{Los,U}		COST 231 WOLFISH-IKEGAMI (LOS)		COST 231 WOLFISH-IKEGAMI		COST 231 HATA		OKUMURA-HATA		EGLI	
	ME [dB]	SSE [dB]	ME [dB]	SSE [dB]	ME [dB]	SSE [dB]	ME [dB]	SSE [dB]	ME [dB]	SSE [dB]	ME [dB]	SSE [dB]	ME [dB]	SSE [dB]	ME [dB]	SSE [dB]
WARUNKI BADAŃ	16,330	18,424	22,309	23,309	7,412	11,311	4,499	9,990	1,044	11,147	7,974	16,178	12,760	19,242	14,514	17,099
	9,135	9,752	15,114	15,495	0,373	3,472	-2,854	4,704	-4,238	9,589	3,768	15,723	8,332	17,654	7,343	8,646
WSZYSTKIE POMIARY N=18924	22,239	23,241	28,218	29,015	13,194	14,938	10,539	12,791	5,383	12,281	11,652	17,829	16,586	20,811	20,403	21,707
	17,078	19,017	23,057	24,528	8,283	11,720	5,428	10,214	1,424	10,679	9,899	15,524	15,812	19,825	16,190	18,128
TYP OBSZARU	15,086	17,394	21,065	22,775	5,964	10,599	2,954	9,607	0,412	11,886	5,137	17,887	8,050	18,930	11,725	15,237
	9,185	9,830	15,164	15,564	0,738	3,576	-2,409	4,480	-3,576	9,161	5,883	12,993	11,796	16,535	8,891	9,691
LOS	9,074	9,657	15,053	15,413	-0,074	3,341	-3,399	4,967	-5,049	10,088	1,180	18,526	4,092	18,936	5,449	7,156
	22,283	23,162	28,262	28,961	13,259	14,816	10,597	12,645	4,722	11,572	12,547	16,988	18,460	21,725	21,004	21,987
NLOS	22,143	23,417	28,122	29,137	13,051	15,203	10,412	13,105	6,822	13,700	9,725	17,119	12,637	18,927	19,092	21,087
													-6,603	10,929		

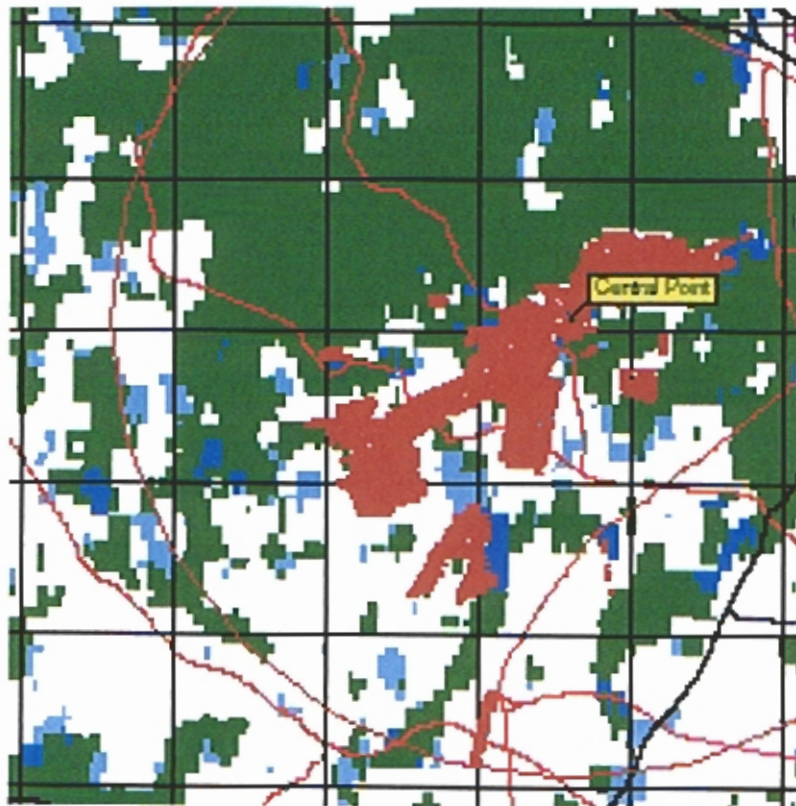
Oznaczenia: N – liczebność próby, czcionką podkreśloną dla modelu Okumura-Hata podano wartości błędów z uwzględnieniem poprawki: duże miasta $f \geq 400$ MHz, czcionka bez podkreślenia oznacza wartości błędów szacowania tłumienia propagacyjnego z uwzględnieniem poprawki opisanej zależnością (3.10).

Tab. Z1.2. Zestawienie współczynników determinacji R^2 [%]; i współczynników indeterminacji φ^2 - [%] dla zmodyfikowanych modeli propagacyjnych oraz wielowariantowego modelu empirycznego.

MODEL	WOLNEJ PRZESTRZENI		ITU-R P.1411 (LOS)- $L_{LOS,U}$		COST 231 Walfisha - Ikegamię (LOS)		COST 231 HATY		OKUMURA-HATY		EGLI		WIELOWARIANTOWY MODEL EMPIRYCZNY	
	φ^2	R^2	φ^2	R^2	φ^2	R^2	φ^2	R^2	φ^2	R^2	φ^2	R^2	φ^2	R^2
WARUNKI BADAŃ														
CAŁA PRÓBA N=18924	72,6	27,4	-	-	-	-	64,58	35,42	64,88	35,12	81,72	18,28	25,06	74,94
LOS N=8556	26,3	73,7	24,88	75,12	26,3	74,63	-	-	-	-	-	-	20,7	79,3

Dla modelu Okumury-Haty uwzględniono poprawkę $a(f_{0,9})$: duże miasta $f \geq 400$ MHz

ZAŁĄCZNIK 2



Rys. Z2.1. Przykład analizy zasięgowej wykonanej za pomocą wielowariantowego modelu empirycznego z wykorzystaniem mapy cyfrowej.

Biblioteka

IL

S-10288