



## Szacowanie tłumienia łączy bezprzewodowych w zróżnicowanych warunkach środowiskowych

TOMASZ GRASZA

Wojskowa Akademia Techniczna, Szkoła Doktorska WAT, ul. gen. S. Kaliskiego 2,  
00-908 Warszawa, tomasz.grasza@wat.edu.pl

**Streszczenie.** Artykuł poświęcony jest ocenie tłumienia w łączach bezprzewodowych w zróżnicowanych warunkach środowiskowych. Przedstawiona została uproszczona metodyka estymacji tłumienia na bazie modelu *Floating-intercept* (FI) [1]. Zastosowana metodyka umożliwia w prosty sposób oszacowanie tłumienia łączy bezprzewodowych w zróżnicowanych warunkach środowiskowych i propagacyjnych. Dokonano przeglądu modeli propagacji przyziemnej, pokazując złożoność ich struktury opisu analitycznego.

**Słowa kluczowe:** modele propagacji, skutki wielodrogowości, warunki środowiskowe, łącza bezprzewodowe, modele empiryczne, zasięg, interferencje międzykanałowe, kompatybilność wewnętrzna, kompatybilność zewnętrzna

DOI: 10.5604/01.3001.0054.7920

### 1. Wprowadzenie

Znaczący wzrost zapotrzebowania na realizację usług telekomunikacyjnych wpłynął na rozwój transmisji bezprzewodowej przy użyciu fal radiowych. Pojawiła się przy tym konieczność zastosowania w procesie projektowania sieci komórkowych nowych metod wyznaczenia tłumienia propagacyjnego. Jest to szczególnie złożony problem w terenach zurbanizowanych, zwłaszcza w tak zwanych warunkach NLOS (*non-line-of-sight*), czyli braku bezpośredniej widoczności pomiędzy antenami [1].

W terenie zurbanizowanym należy wziąć pod uwagę zjawisko propagacji wielodrogowej. Charakteryzuje się tym, że sygnał dociera do odbiornika na ogół różnymi drogami. W konsekwencji fala elektromagnetyczna ulega tłumieniu, odbiciu, rozproszeniu i dyfrakcji [1]. Sieci komórkowe składają się z wielu stacji bazowych, które obsługują dany obszar, zapewniając tym samym medium transmisyjne w postaci fal radiowych do poszczególnych użytkowników. Komunikacja pomiędzy stacją bazową a użytkownikiem jest możliwa wówczas, gdy odbiornik znajduje się w zasięgu stacji bazowych [1]. W związku z tym, że stacje bazowe obsługują niewielkie obszary zwane komórkami, operatorzy sieci komórkowych, aby zapewnić stałą łączność, tworzą sieci komórek. Rozmieszczenie poszczególnych stacji jest zależne od wielu czynników, takich jak lokalizacja instalacji, ukształtowanie terenu i potoki ludzi, a także zasięg urządzenia mobilnego [1]. Równie ważnym aspektem jest możliwość obsługi określonej liczby połączeń przez stacje bazowe. Na obszarach zurbanizowanych, w miejscach bardziej zaludnionych konieczne jest stosowanie większej liczby stacji bazowych, czyli podziału na wiele mniejszych komórek [1]. Główną przyczyną takiego podziału jest ograniczona pojemność danego podsystemu. W celu świadczenia poszczególnych usług telekomunikacyjnych operatorzy sieci wykorzystują różne zakresy częstotliwości. Celem przydziału poszczególnych częstotliwości jest uniknięcie możliwości wystąpienia wzajemnych zakłóceń pomiędzy stacjami bazowymi. Przy projektowaniu sieci komórkowych podstawą jest ocena bilansu energetycznego łącza, w tym pokrycie zapewnione przez sieć radiową, zasięg poszczególnych stacji bazowych, jakość transmisji sygnału. W tym celu stosuje się modele propagacyjne, które przedstawiają, jak zmienia się tłumienie w funkcji odległości dla różnych środowisk propagacyjnych [1].

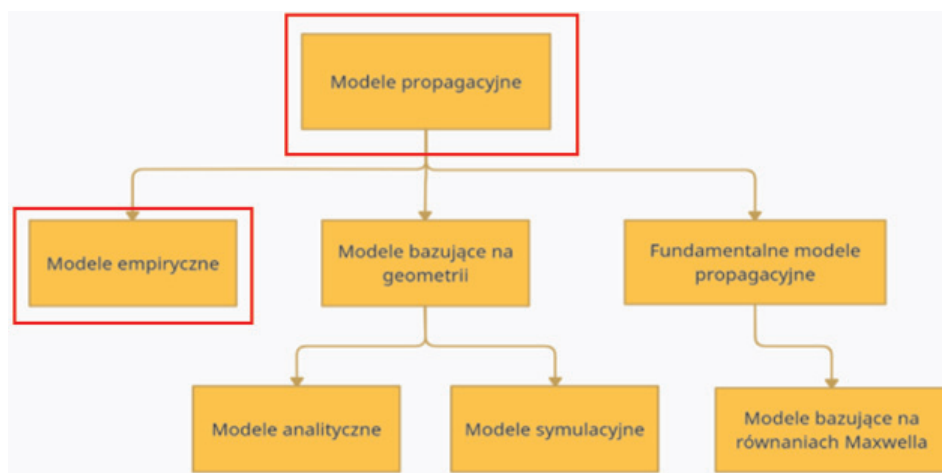
Dotychczas opracowano wiele modeli propagacyjnych, które różnią się od siebie budową. Główne różnice wynikają ze złożoności modelu, możliwości adaptacyjnych w różnych warunkach środowiskowych, a także dokładności wyników otrzymanych w wyniku analizy. Obecnie wprowadzana jest nowa generacja sieci — sieć 5G. W jej ramach następuje nowy przydział częstotliwości, co generuje konieczność modyfikacji dotychczas stosowanych modeli propagacji. Większość obecnie wykorzystywanych modeli opiera się na danych empirycznych w zróżnicowanych warunkach środowiskowych, tym samym brakuje modelu, który będzie charakteryzował się uniwersalnością. W celu odwzorowania podstawowych zjawisk fizycznych tworzy się modele empiryczne. Przykładem jest model 3GPP, powszechnie używany przez operatorów sieci, jednak ponieważ wymaga on podania wielu zmiennych, staje się bardzo złożony w budowie. Równie interesującym modelem jest Delisle-Egli, jego budowa pozwala na uwzględnienie zjawiska wietrzenia, mającego duże znaczenie w terenach zurbanizowanych. Budowa ta jest zależna od częstotliwości, odległości pomiędzy antenami, a także ich wysokościami, co sprawia, że również jest skomplikowana. Modelem, który pozwala na przeprowadzenie analiz tłumienia propagacji i nie wymaga przy tym podania wielu zmiennych, jest model *Floating-intercept* (FI) [1].

Jego postać analityczna znacznie upraszcza szacowanie tłumienia łączy, co sprawia, że staje się dobrym modelem do zastosowania w różnych scenariuszach propagacyjnych.

Głównym celem artykułu jest pokazanie możliwości wykorzystania modelu empirycznego *Floating-intercept* do oceny predykcji. Układ dalszej części artykułu jest następujący. W rozdziale drugim dokonano przeglądu modeli propagacji przyziemnej z punktu widzenia złożoności ich analitycznego opisu. W kolejnym rozdziale opisano model 3GPP dla wybranego scenariusza propagacyjnego, a także danych wejściowych. Następnie na podstawie modelu 3GPP, który został obrany jako referencyjny, przedstawiono metodykę wyznaczania parametrów modelu FI. W ostatnim rozdziale porównano model empiryczny Delisle-Egli z modelem referencyjnym 3GPP, co pozwoliło na wskazanie różnic otrzymanych wartości tłumienia dla warunków NLOS.

## 2. Przegląd modeli propagacji przyziemnej

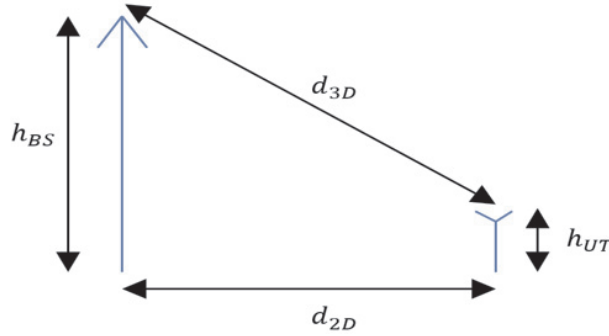
Modele propagacji są niezbędnymi narzędziami w procesie projektowania i analizy bilansu energetycznego łączy. Opisują one zależność tłumienia w funkcji odległości. W artykule skupiono się na dwóch powszechnych modelach empirycznych: 3GPP oraz FI [1]. Ze względu na rodzaj danych wejściowych modele propagacji dzielimy na modele empiryczne, deterministyczne oraz statystyczne bazujące na procedurach symulacyjnych wykorzystujących relacje geometryczne pomiędzy obiektami.



Rys. 1. Klasyfikacja modeli propagacyjnych

## 2.1. Model 3GPP

Pierwszym poddanym analizie modelem propagacji jest model empiryczny według standardu 3GPP dla scenariusza Uma – Makro miejskie [6], który był rozpatrywany dla warunków propagacyjnych LOS i NLOS. Budowa przedmiotowego modelu jest stosunkowo złożona i uzależniona od wielu zmiennych, między innymi od częstotliwości, odległości pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem, a także ich wysokościami.



Rys. 2. Definicja odległości anteny nadawczej i odbiorczej w warunkach zewnętrznych [6]

Parametry przedstawione na rysunkach to odległość  $d_{2D}$ ,  $d_{3D}$  pomiędzy anteną nadawczą i anteną odbiorczą, wysokość anteny nadawczej  $h_{BS}$  oraz wysokość anteny odbiorczej  $h_{UT}$ .

$$(h_{BS} - h_{UT})^2 + d_{2D}^2 = d_{3D}^2 \quad (1)$$

W tabeli nr 1 zostały przedstawione zależności opisujące tłumienie w funkcji parametrów  $d_{2D}$ ,  $d_{3D}$ .

TABELA 1

Założenia dla scenariuszy propagacyjnych [6]

LOS	NLOS
$PL_{UMa-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5\text{km} \end{cases}$ $PL_1 = 28.0 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 28.0 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$PL_{UMa-NLOS} = \max(PL_{UMa-LOS}, PL'_{UMa-NLOS})$ <p style="text-align: center;">for <math>10\text{m} \leq d_{2D} \leq 5\text{km}</math></p> $PL'_{UMa-NLOS} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6(h_{UT} - 1.5)$
$1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 22.5\text{m}$ $h_{BS} = 25\text{m}$	$1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 22.5\text{m}$ $h_{BS} = 25\text{m}$

## 2.2. Model Delisle–Egli

Kolejny model służący do wyznaczania tłumienia propagacyjnego w warunkach miejskich dla warunków propagacyjnych NLOS uwzględnia zjawisko propagacji wielodrogowej. Wykorzystując dany model, rozpatruje się tłumienie sygnału radiowego w wariancie, w którym od stacji głównej do stacji ruchomej docierają wyłącznie dwa promienie radiowe. Teoretyczna zależność, która pozwala na obliczenie tłumienia, przedstawia się następująco [1]:

$$PL[dB] = 40\log_{10}d_{2D} - 20\log_{10}h_{BS} - 20\log_{10}h_{UT} \quad (2)$$

Postać tego modelu nie jest uzależniona od częstotliwości, natomiast tłumienie rośnie wraz ze wzrostem odległości [1]. Na bazie licznych wyników pomiarów tłumienia propagacji przeprowadzonych przez Egli w warunkach miejskich zależność przedstawiona powyżej została zmodyfikowana [1]. Ostatecznie model uległ aproksymacji przez Delisle, co pozwoliło na otrzymanie poniższej struktury [1]:

$$PL_E[dB] = 40\log_{10}d_{2D} + 20\log_{10}f_c - 20\log_{10}h_{BS} + PL_\alpha \quad (3)$$

$$PL_\alpha [dB] = \begin{cases} 76,3 - 10\log_{10}h_{UT}, & \text{dla } h_{UT} < 10 \text{ m} \\ 76,3 - 20\log_{10}h_{UT}, & \text{dla } h_{UT} \geq 10 \text{ m} \end{cases} \quad (4)$$

## 2.3. Model ITU-R P.1411

Równie interesującym modelem, który można zastosować w warunkach NLOS, czyli braku bezpośredniej widoczności pomiędzy antenami, jest model ITU-R P.1411 [1]. Był on rozpatrywany dla terenów zurbanizowanych. W celu wyznaczenia tłumienia propagacyjnego w modelu przyjmuje się podejście dwuwymiarowe, charakteryzujące się koniecznością obliczenia dwóch granicznych wartości tłumienia  $PL_{min}$ ,  $PL_{maks}$  [dB] [1]. W każdym z wariantów przyjmuje się dwa przypadki, zależne od odległości  $d_{2D}$  pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem. Kryterium wyboru jest zależne od położenia punktu, czyli od miejsca załamania pierwszej strefy Fresnela [1]. Miejsce położenia punktu określane jest na podstawie odległości  $d_{bp}$  punktu od anteny nadawczej. Poniżej została przedstawiona postać analityczna tego modelu [1]:

$$PL(d_{2D}) = PL_{dp} + \begin{cases} 20\log_{10}\left(\frac{d_{2D}}{d_{bp}}\right) & \text{dla } d_{2D} \leq d_{bp}, \\ 40\log_{10}\left(\frac{d}{d_{bp}}\right) & \text{dla } d_{2D} > d_{bp}, \end{cases} \quad (5)$$

$$PL_{maks}(d_{2D}) = PL_{dp} + 20 + \begin{cases} 20 \log_{10} \left( \frac{d_{2D}}{d_{bp}} \right) & \text{dla } d_{2D} \leq d_{bp}, \\ 40 \log_{10} \left( \frac{d_{2D}}{d_{bp}} \right) & \text{dla } d_{2D} > d_{bp}, \end{cases} \quad (6)$$

$$d_{bp} = \frac{4h_{BS} + h_t}{\lambda} \quad (7)$$

$$PL [dB] = \left| 20 \log_{10} \left( \frac{\lambda^2}{8\pi \cdot h_{BS} \cdot h_{UT}} \right) \right| \quad (8)$$

gdzie  $h_{BS}$  [m] oraz  $h_{UT}$  [m] oznaczają wysokość umiejscowienia anteny nadawczej i odbiorczej, natomiast  $\lambda$  określa długość fali [m]. Postać analityczna modelu jest zależna od wielu zmiennych oraz zależności, co sprawia, że model ten jest bardzo złożony.

#### 2.4. Model COST 231 Haty

Modelem służącym do wyznaczenia tłumienia propagacyjnego w warunkach miejskich jest model COST 231 Haty, którego postać analityczna została przedstawiona poniżej [1]:

$$PL_{COST,H} [dB] = 46,33 + \\ + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_{BS}) \cdot (\log_{10} d_{2D})^\beta + \\ + 33,9 \log_{10} f_c - \alpha(h_{UT}) - 13,82 \log_{10} h_{BS} + C \quad (9)$$

gdzie:  $C$  — charakteryzuje wielkość zabudowy miejskiej,  $C = 3$  dB dla dużych miast oraz  $C = 0$  dB w innych przypadkach [1].

Przedmiotowy model został opracowany na bazie licznych pomiarów wykonanych w warunkach zabudowy miejskiej. W wyniku programu naukowo-badawczego model można zastosować w zakresie częstotliwości do 2000 MHz. Chcąc określić tłumienie za pomocą modelu, konieczna jest znajomość częstotliwości, wysokości anteny nadawczej i odbiorczej, a także wielkości zabudowy miejskiej. Postać analityczna modelu zależy również od parametru  $\beta$ , która dla  $d_{2D} \leq 20$  km wynosi  $\beta = 1$ . Natomiast w przypadku, gdy długość trasy propagacji znacząco przewyższa 20 km  $< d_{2D} < 100$  km, należy uwzględnić poniższe warunki [1]:

$$\beta = 1 + \left( 0,14 + 0,000187 f_c + 0,00107 h_{BS} \right) \cdot \left( \log_{10} \left( \frac{d_{2D}}{20} \right) \right)^{0,8} \quad (10)$$

W celu wyznaczenia tłumienia propagacyjnego konieczne jest również wyznaczenie następującej zależności [1]:

$$\alpha(h_{UT}) = (1,1\log_{10}f_c - 0,7) \cdot h_{UT} - (1,56\log_{10}f_c - 0,8) \quad (11)$$

Niedostatek tego modelu wynika z braku możliwości zastosowania w różnych warunkach środowiskowych, co sprawia, że jest mało atrakcyjny. Szacowanie tłumienia propagacyjnego łączy z wykorzystaniem tego modelu staje się bardzo trudne.

## 2.5. Model empiryczny *Floating-intercept* (FI)

Znacząco prostszą budową charakteryzuje się model empiryczny, który również został rozpatrywany dla warunków propagacyjnych LOS i NLOS. Przedstawiony poniżej model pozwala na przeprowadzenie analiz tłumienia propagacji, nie wymuszając przy tym podania wielu zmiennych jak w przypadku modelu 3GPP. Istota tego modelu polega na dopasowaniu wykresu do zmierzonych danych, wykorzystując do tego metodę regresji liniowej, czyli metody najmniejszych kwadratów.

$$PL[\text{dB}] = \alpha + 10 \cdot \beta \log_{10}(d_{2D}) + X_\sigma \quad (12)$$

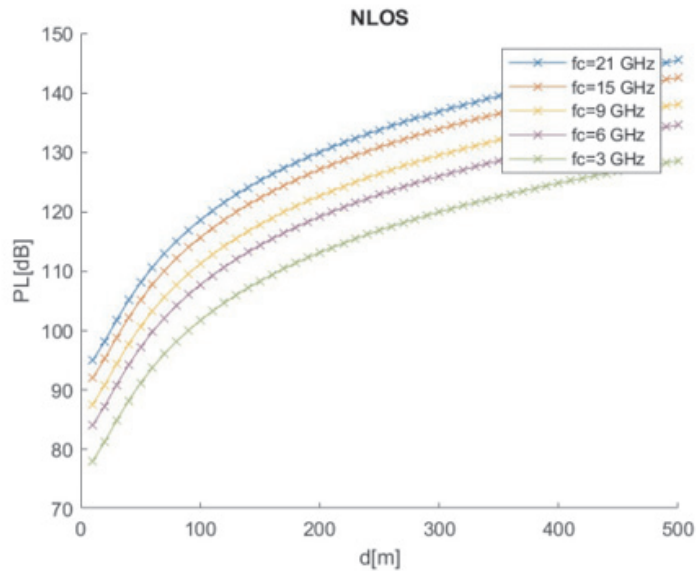
gdzie:  $\alpha$  i  $\beta$  są współczynnikami prostej regresji [1],  $X_\sigma$  to normalna zmienna losowa o zerowej wartości średniej i dewiacji równej  $\sigma$  [dB].

Przedstawiona postać analityczna tego modelu znacznie upraszcza szacowanie tłumienia łączy. Powyższe przykłady modeli empirycznych służących do wyznaczenia tłumienia propagacyjnego pokazują, jak bardzo modele różnią się od siebie budową oraz możliwością adaptacyjną w scenariuszach propagacyjnych. Przykłady modeli, których postać analityczna wymaga podania wielu zmiennych oraz uwzględnienia wielu zależności, to model COST 231 Haty oraz model ITU-R P.1411. Na uwagę zasługuje model 3GPP, mający przejrzystą strukturę, dlatego został przyjęty w kolejnym rozdziale jak model referencyjny. Spośród wszystkich przedstawionych modeli to właśnie *Floating-intercept* ma prostą budowę i pozwala na przeprowadzenie analiz tłumienia propagacji, nie wymuszając przy tym podania wielu zmiennych, co sprawia, że jest najbardziej efektywny. W kolejnych rozdziałach przedstawiono słuszność wyboru właśnie tego modelu.

## 3. Charakterystyki tłumienia na bazie modelu 3GPP

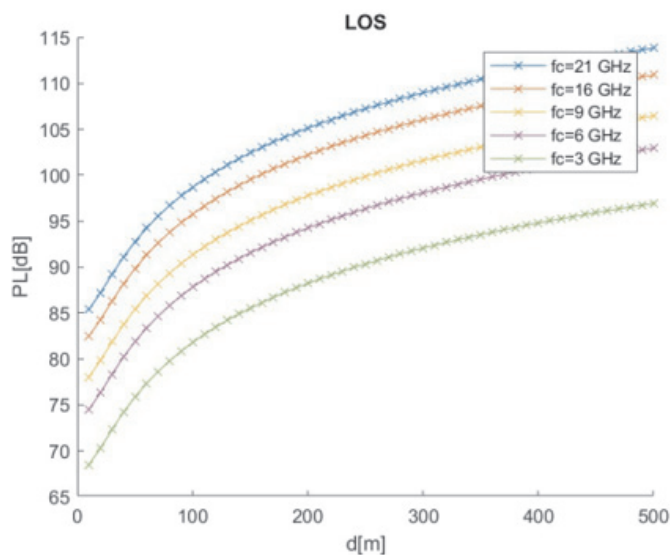
W tej części artykułu przedstawiono analizę modelu według standardu 3GPP na podstawie scenariusza Uma – Makro miejskie dla wybranych parametrów [6]. Jest to scenariusz, w którym stacje nadawcze montowane są nad poziomami dachów i okolicznych budynków. Zasadniczą różnicą charakteryzującą dany model propagacji

jest złożoność jego budowy, która w stosunku do modelu FI wymaga podania wielu zmiennych. Przedstawiona poniżej analiza opiera się na częstotliwościach wykorzystywanych w sieci 5G, stąd przyjęto częstotliwości w zakresie od 3 do 21 GHz. W pierwszym etapie zdefiniowano parametry wejściowe do analizy i przyjęto następujące wartości parametrów: wysokość anteny nadawczej  $h_{BS} = 25$  m, wysokość anteny odbiorczej  $h_{UT} = 1,5$  m, przy założeniu, że odległość pomiędzy anteną odbiorczą a nadawczą wynosi 500 m. Przeprowadzone obliczenia numeryczne dla różnych częstotliwości nośnych  $f_c$  w warunkach propagacyjnych LOS i NLOS pozwoliły na określenie tłumienia. Wyniki otrzymane dla wybranego modelu propagacji oraz różnych częstotliwości nośnych zostały zestawione na wykresach 3 i 4 zarówno dla warunków propagacyjnych LOS, jak i NLOS.



Rys. 3. Zestawienie wyników z modelu 3GPP na podstawie różnych częstotliwości nośnych dla warunków propagacyjnych LOS



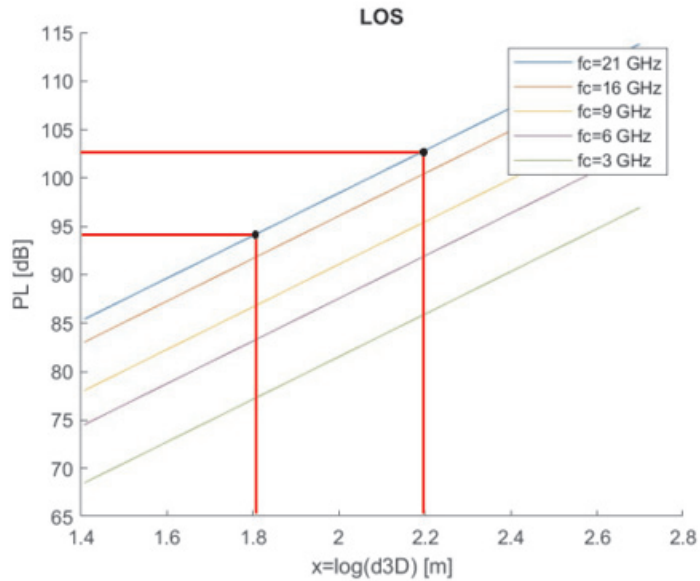


Rys. 4. Zestawienie wyników z modelu 3GPP na podstawie różnych częstotliwości nośnych dla warunków propagacyjnych NLOS

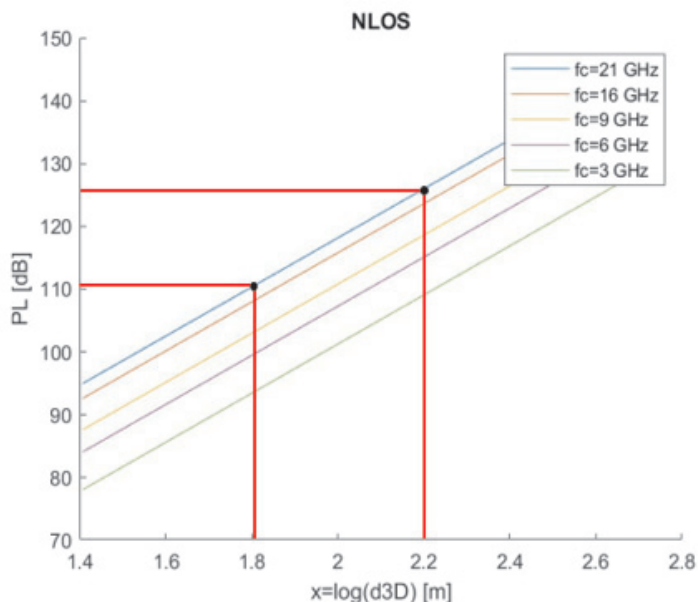
Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawione na powyższych wykresach dla warunków propagacyjnych LOS i NLOS oraz różnych częstotliwości nośnych, a także zmieniającej się odległości pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem wskazują, że wraz ze wzrostem częstotliwości tłumienia znacząco rosną. W przypadku warunków LOS tłumienie zmienia się w zakresie od 68 do 114 dB, natomiast w przypadku NLOS tłumienie jest znacząco większe i waha się od 78 do 145 dB. Uzyskane wyniki potwierdzają prawidłowe założenia modelu dla warunków miejskich, gdyż warunki propagacyjne NLOS charakteryzują się większym zróżnicowaniem terenu, na którym istnieje wiele przeszkód, co powoduje znaczny wzrost tłumienia. Należy pamiętać, że zarówno model 3GPP, jak i FI mają liniowy charakter ze względu na występujący w zależnościach logarytm z odległości. W następnym rozdziale na podstawie analizy dla modelu referencyjnego 3GPP zostanie pokazana metoda wyznaczania parametrów modelu FI, która ma potwierdzić, jak w prosty sposób można przeprowadzić analizę tłumienia, wykorzystując do tego model o prostej budowie.

#### 4. Metodyka wyznaczania parametrów modelu FI

W tym rozdziale została przedstawiona metodyka wyznaczania parametrów modelu FI, który charakteryzuje się dość prostą budową w porównaniu do innych empirycznych modeli propagacji. Przedstawiona metodyka opiera się na założeniach modelu 3GPP, który został przedstawiony w rozdziale 2.1. Model propagacyjny 3GPP jest wykorzystywany powszechnie przez operatorów do obliczenia tłumienia łączy. W związku z tym dany model został obrany jako referencyjny. Aby wyznaczyć tłumienie z wykorzystaniem modelu FI, należało w pierwszej kolejności dokonać transformacji wykresów przedstawionych na rysunku 3 i 4 przez wprowadzenie zależności  $x = \log_{10}(d3D)$ . W kolejnym kroku, obierając dowolne dwa punkty, otrzymujemy dane wyjściowe w celu określenia wartości współczynników  $\alpha$  i  $\beta$ , przy założeniu, że odległość pomiędzy anteną nadawczą a anteną odbiorczą wynosi 500 m.



Rys. 5. Zestawienie wyników z modelu 3GPP na podstawie różnych częstotliwości nośnych dla warunków propagacyjnych LOS



Rys. 6. Zestawienie wyników z modelu 3GPP na podstawie różnych częstotliwości nośnych dla warunków propagacyjnych NLOS

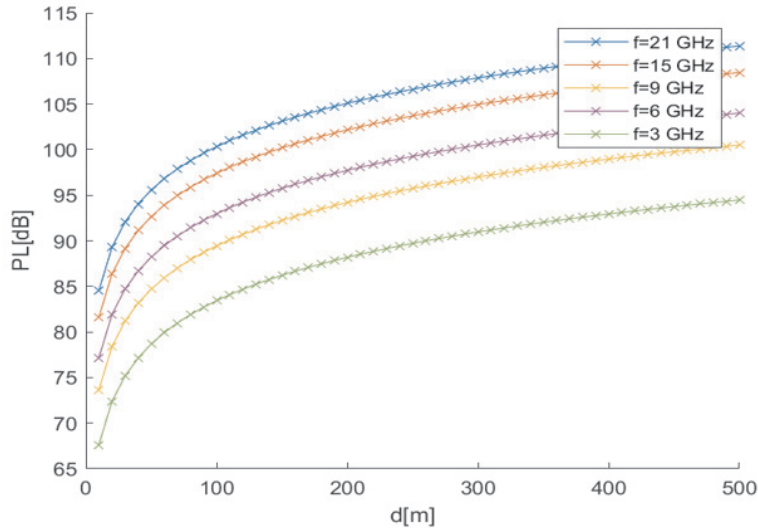
Następnie, wykorzystując zależność (12) i przekształcając ją do poniższej postaci, otrzymujemy równania pozwalające określić wartości  $\alpha$  i  $\beta$  [6]. Do celów obliczeniowych przyjęto, że  $X_\sigma = 0$ .

$$\beta = \frac{(PL_1 - PL_2)}{(-10 \cdot \log_{10}(d_{2D1}) + 10 \cdot \log_{10}(d_{2D2}))} \quad (13)$$

$$\alpha = PL_1 - 10 \cdot \log_{10}(d_{2D1}) \cdot \frac{(PL_1 - PL_2)}{(-10 \cdot \log_{10}(d_{2D1}) + 10 \cdot \log_{10}(d_{2D2}))} \quad (14)$$

gdzie:  $d_{2D1}, d_{2D2}$  — wartości odległości pomiędzy anteną nadawczą a anteną odbiorczą określone w sposób losowy z wykresu 3GPP;  
 $PL_1, PL_2$  — wartość tłumienia dla odległości  $d_{2D1}$  oraz wartość tłumienia dla odległości  $d_{2D2}$  określone w sposób losowy z wykresu 3GPP.

W kolejnym kroku na bazie powyższych danych wyjściowych przeprowadzono obliczenia numeryczne dla różnych częstotliwości nośnych  $f_c$  w zakresie od 21 do 3 GHz. W efekcie otrzymujemy wyniki tłumienia przedstawione na rysunku 7 dla różnych częstotliwości nośnych.

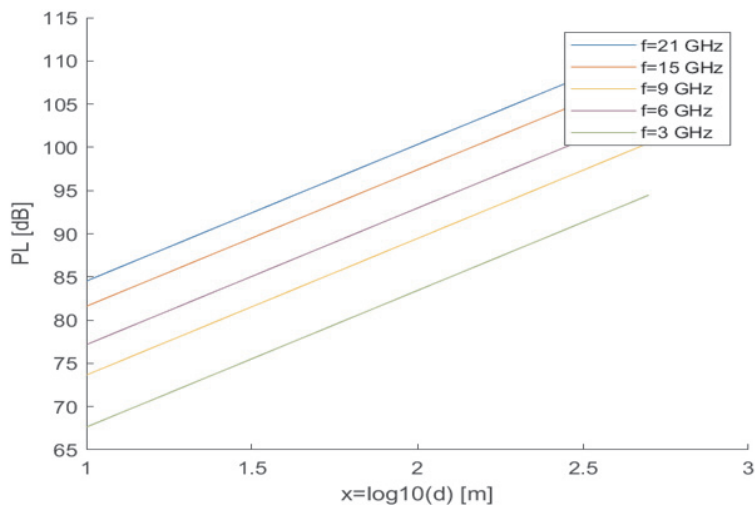


Rys. 7. Zestawienie wyników tłumienia dla różnych częstotliwości nośnych na bazie założeń modelu FI

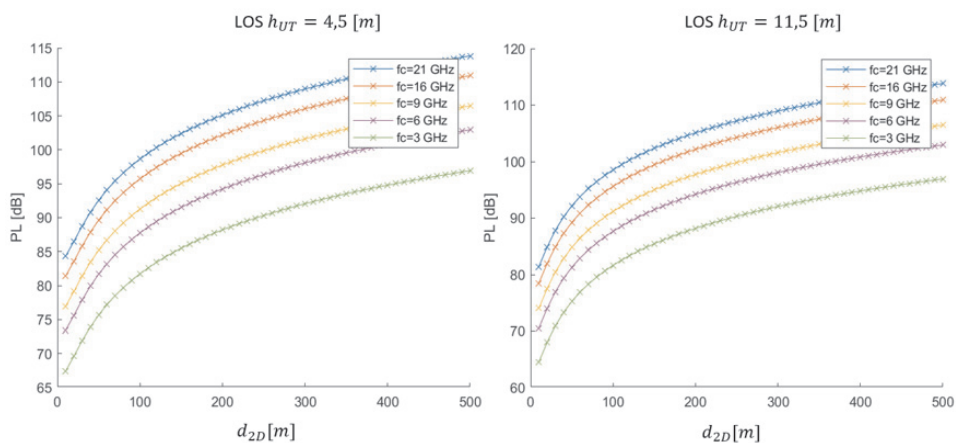
Przedstawiony wyżej wykres pokazuje bardzo duże podobieństwo do zależności otrzymanych z modelu 3GPP wartości tłumienia dla różnych częstotliwości zmieniających się w przedziale od 67 do 112 dB. Cechą charakterystyczną modelu FI jest jego brak uzależnienia od warunków środowiskowych, co sprawia, że wyróżnia się na tle innych modeli propagacji. Zasadniczym problemem, jaki stwarza postać modelu FI, jest dobór współczynników  $\alpha$  i  $\beta$ . Chcąc lepiej zobrazować otrzymane wyniki przedstawione na rysunku 7, w celu ich analizy zastosowano procedurę regresji prostoliniowej. W efekcie otrzymujemy wykres w postaci liniowej przedstawiony na rysunku 8.

Jak można zauważyć na powyższym wykresie, wraz ze wzrostem częstotliwości nośnej tłumienie znacząco rośnie, co jest zjawiskiem prawidłowym i potwierdza przyjęte w artykule założenia. Przedstawiona metodyka wyznaczania parametrów modelu FI pozwala w prosty sposób określić wartości tłumienia dla różnych wysokości anteny nadawczej oraz anteny odbiorczej z uwzględnieniem różnych częstotliwości nośnych. W celu szerszego zobrazowania przedstawionej powyżej metody wyznaczania współczynników modelu FI, mając na uwadze, że postać modelu 3GPP

jest uzależniona od warunków środowiskowych, przeprowadzono obliczenia dla warunków środowiskowych LOS i NLOS dla różnych wysokości anteny odbiorczej. Zestawienie wyników zostało przedstawione na wykresie 9 i 10.

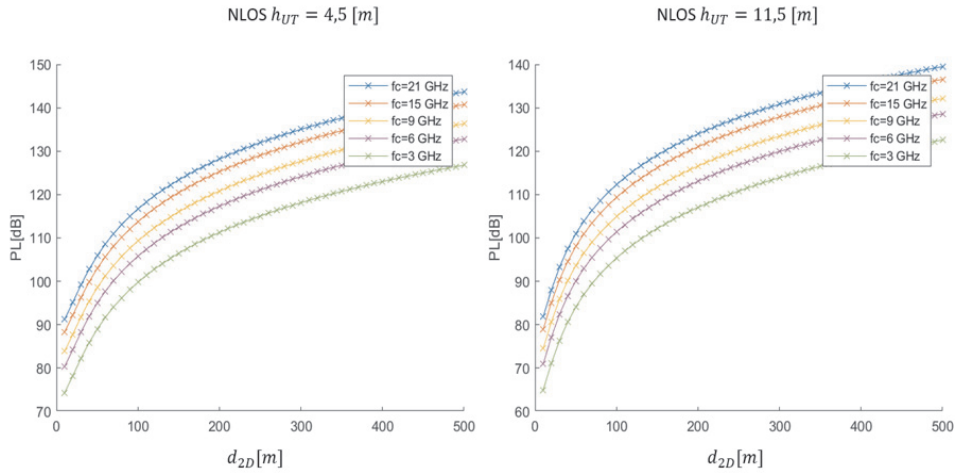


Rys. 8. Zestawienie wyników tłumienia dla różnych częstotliwości nośnych na bazie założeń modelu FI oraz zależności  $x = \log_{10}(d)$



Rys. 9. Zestawienie wyników z modelu 3GPP dla różnych wysokości anteny odbiorczej oraz warunków propagacyjnych LOS

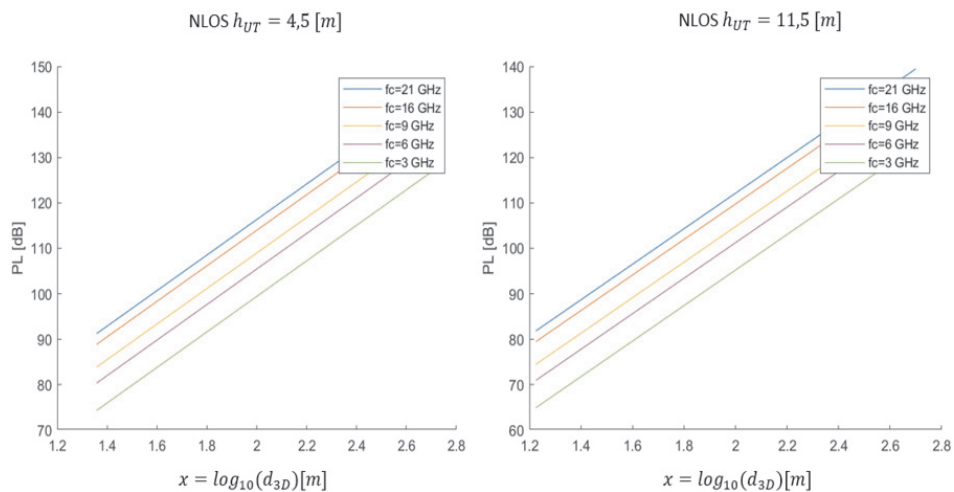
Jak można zauważyć, dla warunków propagacyjnych LOS przy wysokości anteny odbiorczej  $h_{UT} = 4,5$  m wraz ze wzrostem częstotliwości nośnej tłumienie nieznacznie maleje i zmienia się od 67 do 115 dB. Natomiast przy wysokości  $h_{UT} = 11,5$  m jest stosunkowo mniejsze i mieści się w przedziale od 64 do 112 dB.



Rys. 10. Zestawienie wyników z modelu 3GPP dla różnych wysokości anteny odbiorczej oraz warunków propagacyjnych NLOS

Dla warunków propagacyjnych NLOS zachodzi identyczna zależność potwierdzająca, że wraz ze wzrostem anteny odbiorczej tłumienie maleje. Dla wysokości  $h_{UT} = 4,5$  m tłumienie zmienia się w zakresie od 74 do 145 dB, natomiast dla  $h_{UT} = 11,5$  m waha się w przedziale od 65 do 140 dB. Powyższe wyniki pokazują prawidłowe założenia modelu 3GPP dla warunków propagacyjnych NLOS, gdyż tego typu środowisko charakteryzuje się większym zróżnicowaniem terenu, wpływającym tym samym na wyższe wartości tłumienia. W celu dokładnej analizy otrzymanych wyników dla różnych wysokości anteny odbiorczej oraz warunków propagacyjnych NLOS wykresy zostały przedstawione w skali logarytmicznej.

Jak widać, wraz ze wzrostem wysokości anteny odbiorczej zmniejsza się wartość tłumienia, co potwierdza powyższe założenia. Na podstawie zależności (13) i (14) przedstawionych dla różnych warunków środowiskowych oraz przyjętych danych otrzymano zbiór optymalnych wartości  $\alpha$  i  $\beta$ , które zawarto w tabeli 2 i 3. Mając na uwadze częstotliwości, które będą wykorzystywane przez sieci 5G, opracowano tabele z zestawieniem parametrów dla dwóch częstotliwości nośnych: 3 GHz oraz 21 GHz.



Rys. 11. Zmiany tłumienia wyznaczone dla modelu 3GPP dla różnych wysokości anteny odbiorczej i warunków środowiskowych NLOS

TABELA 2

Zestawienie wyników dla warunków propagacyjnych LOS i NLOS dla częstotliwości 21 GHz

$h_{UT}$ [m]	LOS		NLOS	
	$\alpha$ [dB]	$\beta$	$\alpha$ [dB]	$\beta$
1,5	69,73	1,58	67,44	2,81
3	68,56	1,63	64,16	2,90
4,5	67,64	1,67	62,47	2,94
6	66,67	1,71	59,00	3,03
7,5	66,01	1,73	57,21	3,08
9	64,61	1,79	53,52	3,18
11,5	63,13	1,85	49,69	3,29
13	61,59	1,91	45,74	3,40

TABELA 3

Zestawienie wyników dla warunków propagacyjnych LOS i NLOS dla częstotliwości 3 GHz

$h_{UT}$ [m]	LOS		NLOS	
	$\alpha$ [dB]	$\beta$	$\alpha$ [dB]	$\beta$
1,5	52,83	1,58	50,54	2,81
3	51,66	1,63	47,26	2,90
4,5	51,05	1,66	45,57	2,94
6	49,77	1,71	42,09	3,03
7,5	49,10	1,73	40,30	3,08
9	47,71	1,79	36,62	3,18
11,5	46,23	1,85	32,79	3,29
13	44,68	1,91	28,84	3,40

W powyższych tabelach znajdują się parametry, które w prosty sposób umożliwiają oszacowanie wartości tłumienia propagacyjnego łącza niezależnie od warunków środowiskowych. Obecnie wiele modeli propagacji jest tworzonych na bazie licznych pomiarów dla określonych środowisk propagacji, co szczególnie ogranicza zastosowanie w każdych warunkach środowiskowych. Analiza, która została przedstawiona powyżej, pokazuje, że zastosowanie modelu FI stanowi narzędzie, dzięki któremu w prosty sposób można oszacować wartości tłumienia łącza, nie wymagając przy tym podania wielu zmiennych, co sprawia, że model ten jest wyjątkowy w zastosowaniu. Charakteryzuje się uniwersalnością oraz bardzo dużą dokładnością, co zostało przedstawione w powyższej analizie.

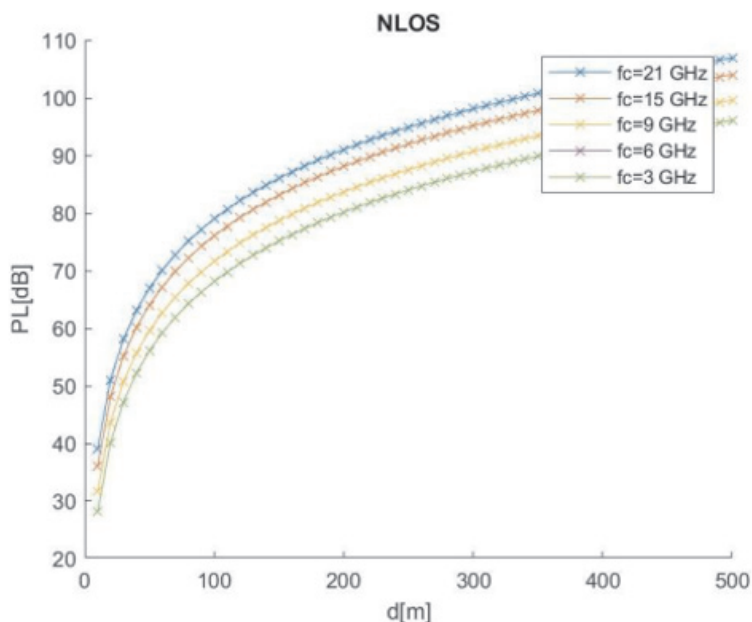
## 5. Analiza porównawcza modeli propagacji

Model Delisle-Egli, służący do wyznaczenia tłumienia propagacyjnego w warunkach miejskich, jest interesujący pod względem budowy [1]. Rozpatruje on tłumienie sygnału w wariacie, w którym od stacji głównej do stacji ruchomej docierają wyłącznie dwa promienie radiowe. Budowa tego modelu jest uzależniona od częstotliwości, a tłumienie rośnie wraz ze wzrostem odległości [1]. W przedstawionej analizie wykorzystana zostanie postać otrzymana przez Delisle [1]. Znaczącą wadą tego modelu jest brak uniwersalności jego struktury wobec zmieniających się warunków środowiskowych, gdyż przedstawiony model nie rozpatruje warunków LOS, a wyłącznie warunki NLOS. W tym celu w dalszej analizie otrzymane wyniki tłumienia na bazie zależności (3), (4) zostaną porównane z wynikami przedstawionymi na rysunku 3 dla modelu 3GPP. Do przeprowadzenia analizy przyjęto, że



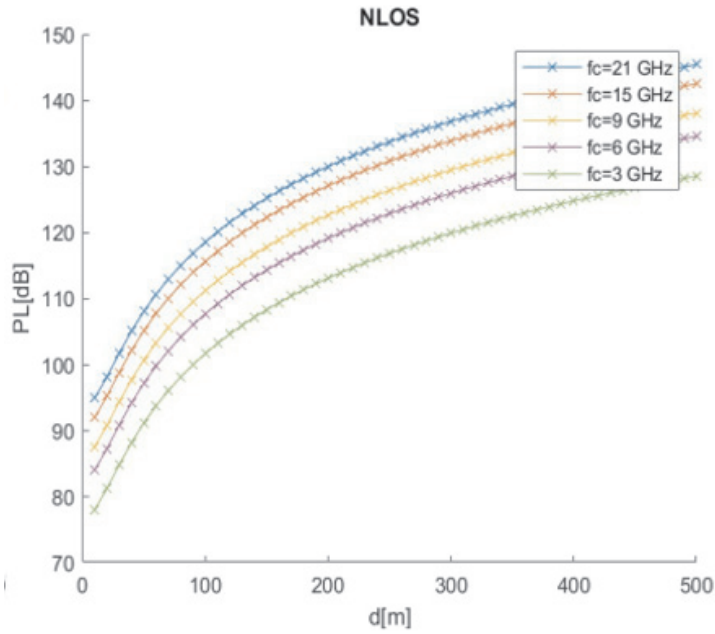
antena nadawcza znajduje się na wysokości 25 m, wysokość anteny odbiorczej to 1,5 m, a odległość pomiędzy antenami wynosi 500 m.

Na podstawie powyższych założeń przeprowadzono obliczenia numeryczne dla różnych częstotliwości nośnych  $f_c$  w zakresie od 3 do 21 GHz w celu określenia tłumienia propagacyjnego.



Rys. 12. Zestawienie wyników z modelu Delisle-Egli na podstawie różnych częstotliwości nośnych dla warunków propagacyjnych NLOS

Uzyskane wyniki pokazują różnice zmian tłumienia w funkcji odległości anteny odbiorczej od anteny nadawczej przy różnych częstotliwościach nośnych. Wraz ze wzrostem odległości tłumienie znacząco rośnie. Wyniki tłumienia dla modelu Delisle-Egli zmieniają się w zakresie od 30 do 105 dB, natomiast dla modelu 3GPP wartości tłumienia wahają się w zakresie od 78 do 145 dB. Różnice w wynikach są znaczące względem modelu 3GPP, co sprawia, że model ten nie cechuje się dużą dokładnością.



Rys. 13. Zestawienie wyników z modelu 3GPP na podstawie różnych częstotliwości nośnych dla warunków propagacyjnych NLOS

## 6. Podsumowanie

W pierwszej części artykułu przedstawiono przegląd modeli propagacji przyziemnej z punktu widzenia ich złożoności oraz analitycznego opisu. Następnie przeprowadzona została analiza z wykorzystaniem modelu 3GPP dla różnych częstotliwości nośnych oraz wysokości anteny odbiorczej. Wyniki analizy pokazują, że wraz ze wzrostem częstotliwości tłumienie dla warunków LOS oraz NLOS maleje, co zostało potwierdzone w rozdziale trzecim. W kolejnej części artykułu została przedstawiona metodyka wyznaczania parametrów  $\alpha$  i  $\beta$  modelu FI. W tym artykule jako model referencyjny tłumienia wykorzystano model 3GPP, na bazie którego dokonano oceny tych parametrów dla różnych środowisk i warunków propagacyjnych. Parametry  $\alpha$  i  $\beta$  wyznaczono z uwzględnieniem zróżnicowania wartości częstotliwości. Uzyskane

parametry pozwalają w prosty sposób oszacować wartości tłumienia w zależności od różnych wysokości anteny odbiorczej. Przedstawiona analiza tłumienia na bazie modelu FI w znacznym stopniu upraszcza szacowanie tłumienia łączy, tym samym nadaje się do zastosowania w różnych scenariuszach propagacyjnych. W ostatniej części artykułu przeprowadzono analizę porównawczą modelu Delisle–Egli dla warunków propagacyjnych NLOS. Uzyskane wyniki obliczeń zostały porównane z wynikami tłumienia dla modelu 3GPP, które pokazały znaczące różnice w poziomach wartości tłumienia względem zmieniającej się odległości. Wskazana w artykule procedura pozwala na otrzymanie parametrów  $\alpha$  i  $\beta$  również w przypadku wyboru modelu Delisle–Egli jako referencyjnego. Dzięki temu podejściu uzyskujemy istotne uproszczenie analitycznego opisu modeli propagacji.

Źródło finansowania pracy — środki własne autora.

Artykuł wpłynął do redakcji 19.12.2023. Zatwierdzono do publikacji 18.04.2024.

Tomasz Graszka <https://orcid.org/0000-0002-5567-3590>

#### LITERATURA

- [1] KATULSKI R.J., *Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014.
- [2] KATULSKI R.J., *Propagacja fal radiowych w sieciach 5G/IoT*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2020.
- [3] Ministerstwo Cyfryzacji, *Strategia 5G dla Polski*, Warszawa 2018, Polska.
- [4] LOS vs NLOS | *Difference Between LOS and NLOS Wireless Channels*, RF Wireless World, <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LOS-vs-NLOS-wireless-channel.html>, dostęp [19.12.2023].
- [5] RAPPAPORT T.S. et al., *Wideband Millimeter-wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design*, IEEE Trans. Commun., vol. 63, no 9, September 2015.
- [6] 3GPP TR 38.901 V17.0.0, *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 17)*, March 2022.
- [7] SZÓSTKA J., *Fale i anteny*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 2023.
- [8] ZIÓŁKOWSKI C., KELNER J.M., *Antenna Pattern in Three-dimensional Modelling of the Arrival Angle in Simulation Studies of Wireless Channels*, IET Microw. Antennas Propag., 11, 2017, 898–906.
- [9] LEE W.C.Y., *Mobile Communication Design Fundamentals*, Second Edition, John Wiley & Sons, 2003.
- [10] PARSONS D.J., *The Mobile Radio Propagation Channel*. Second Edition, John Wiley & Sons, 2000.
- [11] WNUK M., *Rotaring Polarization Microstrip Antenna for DSRC System*, Przegląd Elektrotechniczny, 98, nr 5, 2022, 55–161.
- [12] GAJEWSKI S., PERSKA G., STEFAŃSKI J., *Model kanału radiokomunikacyjnego do badań symulacyjnych interfejsu WCDMA*, KKRRiTv, Gdańsk 2002.

- [13] HATA M., *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services*, IEEE Trans. on Vehicular Technology, 29, 3, 1980, 317-325.
- [14] PAWŁOWSKI W., *Krajowe badania propagacji fal radiowych w systemach radiokomunikacyjnych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 7, 2009, 243-245.
- [15] HAUSMAN S., *Modelowanie propagacji fal radiowych do projektowania naziemnych systemów łączności bezprzewodowej*, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, z. 363 nr 1009, 2007.
- [16] PAWŁAK D., *Tłumienie łącza radiowego w funkcji kierunku anteny odbiorczej dla wybranego zakresu częstotliwości systemu 5G*, praca dyplomowa, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2022.
- [17] AHAMED M.M., FARUQUE S., *5G Network Coverage Planning and Analysis of the Deployment Challenges*, Sensors, 21, 19, 2021, 6608.
- [18] KELNER J.M., ZIÓŁKOWSKI C., *Multi-Elliptical Geometry of Scatterers in Modeling Propagation Effect at Receiver*, [in:] P. Pinho (ed.), *Antennas and Wave Propagation*, IntechOpen: London, UK, 2018.
- [19] BECHTA K., ZIÓŁKOWSKI C., KELNER J.M., NOWOSIELSKI L., *Modeling of downlink interference in massive MIMO 5G macro-cell*, Sensors, 21, 2, 2021, 597.
- [20] BUSARI, S.A., HUQ K.M.S., MUMTAZ S., DAI L., RODRIGUEZ J., *Millimeter-wave Massive MIMO Communication for Future Wireless Systems: A Survey*, IEEE Commun. Surv. Tutor., 20, 2, 2018, 836–869.
- [21] GUPTA A., JHA R.K., *A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies*, IEEE Access, 3, 2015, 1206–1232.

## T. GRASZA

### **Estimation of attenuation of wireless links in various environmental conditions**

**Abstract.** The article is devoted to the assessment of attenuation in wireless links in various environmental conditions. A simplified damping estimation methodology based on the Floating-intercept (FI) model is presented [1]. The methodology used makes it possible easily estimate the attenuation of wireless links in various environmental and propagation conditions. A review of ground propagation models was made, showing their complexity and the structure of their analytical description.

**Keywords:** propagation propagation models, multipath effects, environmental conditions, wireless links, empirical models, range, inter-channel interference, internal compatibility, external compatibility

**DOI:** 10.5604/01.3001.0054.7920