

doi:10.15199/48.2023.12.11

## Wyznaczenie strat propagacji wewnątrz obiektu

**Streszczenie.** W artykule dokonano przeglądu metod stosowanych do wyznaczania strat propagacji wewnątrz obiektu oraz przeprowadzono analizę wpływu parametrów biorących udział w propagacji fali elektromagnetycznej na dokładność wyznaczenia wartości sygnału w miejscu odbioru. Przedstawiono stanowisko pomiarowe oraz uzyskane wyniki, w formie wykresów, z pomiarów tłumienności ściany dla różnych częstotliwości w budynku wydziałowym. Otrzymane wyniki zostały wykorzystane do wykonania symulacji dwóch modeli propagacyjnych.

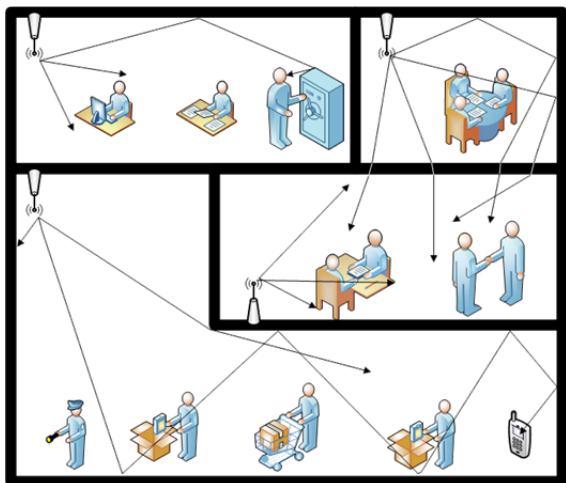
**Abstract.** The article reviews the methods used to determine propagation losses inside the facility and analyzes the influence of parameters involved in electromagnetic wave propagation on the accuracy of determining the signal value at the reception point. frequencies in the faculty building. The obtained results were used to simulate two propagation models. **“Overview of methods used to determine propagation losses inside the object”**

**Słowa kluczowe:** modele propagacji, stanowisko pomiarowe, pomiary strat propagacji, analiza porównawcza.

**Keywords:** propagation models, measuring station, measurements of propagation losses, comparative analysis.

### Wstęp

Rozplanowanie wewnętrznych systemów radiokomunikacyjnych różni się znacznie od planowania systemów w otwartej przestrzeni. W planowaniu systemów zewnętrznych głównym założeniem jest pokrycie danego obszaru dla zapewnienia odpowiedniego dostępu do sieci punkt-punkt, punkt-wielopunkt oraz także zaplanowanie pokrycia radiowego, aby wyeliminować potencjalne zakłócenia w projektowanym systemie jak i wpływu na inne systemy radiokomunikacyjne. W środowisku wewnątrz-obiektowym pokrycie jest ściśle określone przez geometrię budynku, a granice bezpośrednio wpływają na propagację. Częstym problemem jest już wykorzystywanie danej częstotliwości w danym budynku, gdyż nieodpowiedni dobór częstotliwości może spowodować zakłócenia występujące bezpośrednio na danym piętrze. Należy także zwrócić uwagę na fale radiowe które przenikają z innych kondygnacji budynku [1].



Rys. 1 Przekrój budynku z zaznaczonymi zjawiskami propagacyjnymi fal radiowych wewnątrz budynku

Kolejnym elementem, na który należy zwrócić uwagę jest wpływ bezpośredniego otoczenia na propagację fal, z pozorów nieistotne zmiany w danym pomieszczeniu takie jak większa liczba osób przebywających, szafy z urządzeniami, zmiana ustawień mebli mogą spowodować znaczące zmiany w charakterystyce propagacyjnej. Szczególną uwagę należy zwrócić na dane elementy w przypadku wykorzystywania fal milimetrovych.

Ze względu na złożony charakter wymienionych czynników przy planowaniu konkretnego systemu radiowego niezbędna jest szczegółowa wiedza o danym miejscu i określenie wymagań takich jak geometria, rodzaj wykorzystanych materiałów z jakich zbudowane jest dane pomieszczenie, ilość mebli, określony sposób użytkowania, przewidywane zmiany zagospodarowania danego pomieszczenia [2].

Częstym błędem popełnianym podczas planowania systemów wewnętrznych jest planowanie w pustych budynkach bez wiedzy o przeznaczeniu danych pomieszczeń ani o wyposażeniu jakie będzie się w nim znajdować.

W fazie wstępnego planowania konieczne jest również oszacowanie liczby stacji bazowych które mają zapewnić zasięg do rozproszonych stacji ruchomych na danym obszarze oraz ustalenie możliwych potencjalnych zakłóceń od innych usług oraz systemów radiowych już zainstalowanych. Z tego względu do planowania potrzebne są modele propagacyjne przedstawiające charakterystykę propagacji fal radiowych dla danego środowiska. Modele te nie powinny wymagać dużej ilości informacji od użytkownika w celu łatwego i szybkiego wykonania obliczeń. Dokładność przedstawianych modeli jest cały czas udoskonalana i poprawiana poprzez weryfikację w odniesieniu do danych przypadków rzeczywistych. Jest to konieczne, ponieważ w środowiskach testowych dla danego modelu nie jest możliwa pełna weryfikacja postawionych założeń i dopiero weryfikacja w rzeczywistych środowiskach daje prawidłowy obraz przydatności danego modelu propagacyjnego [3].

### Podstawowy model propagacyjny zgodny z zaleceniami International Telecommunication Union – Radiocommunication (ITU-R)

Podstawowy model zalecany przez ITU-R jest modelem empirycznym uwzględniającym podstawowe czynniki występujące podczas rozchodzenia się fali radiowej w pomieszczeniach zamkniętych [4]. Do czynników które mają dominujący wpływ na tłumienie fali radiowej, zalicza się do nich:

- długość „d” trasy propagacyjnej
- częstotliwość „f” sygnału radiowego
- tłumienie „L<sub>f</sub>” występujące podczas przenikania fal radiowych przez stropy i ściany budynków

Model podstawowy opiera się na wyznaczeniu tłumienia propagacyjnego „L<sub>ITU</sub>” z zależności:

$$(1) \quad L_{ITU} [dB] = 20 \log_{10} f [Mhz] + N \log_{10} d [m] + L_f(n) - 28$$

należy pamiętać, że długość trasy propagacji „ $d$ ” jest większa niż 1[m], z praktycznego punktu widzenia oznacza to, że odległość anteny stacji nadawczej od anteny stacji odbiorczej musi być większa niż 1[m]. W podanej zależności występuje parametr „ $N$ ” jest to współczynnik tłumienia określony eksperymentalnie przy uwzględnianiu właściwości materiałowych ścian i stropów budynków [4]. Dla danych częstotliwości oraz wykorzystania danego obiektu określone zostały wartości współczynnika przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1 Odległościowy współczynnik tłumienia  $N$ , w zależności od częstotliwości sygnału radiowego i przeznaczenia budynku [5]

Częstotliwość	Mieszkalny	Biurowy	Komercyjny
900 MHz	–	33	20
1.2-1.3 GHz	–	32	22
1.8-2 GHz	28	30	22
2.4 GHz	28	30	
3.5 GHz		27	
4 GHz	–	28	22
5.2 GHz	30 (mieszkanie) 28 (dom) <sup>(2)</sup>	31	–
5.8 GHz		24	
60 GHz <sup>(1)</sup>	–	22	17
70 GHz <sup>(1)</sup>	–	22	–

Wartości 60[GHz] i 70[GHz] zakładają propagację fali radiowej w pojedynczym pokoju w wolnej przestrzeni nie biorąc pod uwagę wpływu ścian pokoju na transmisję. Absorpcja gazowa dla częstotliwości 60[GHz] jest brana pod uwagę dla odległości ponad 100[m] wpływ absorpcji na odległość jest dokładniej opisany w specyfikacji ITU-R P.676

Mieszkanie: Parterowe lub jednopiętrowe budownictwo mieszkalne dla kilku rodzin większość ścian jest ścianami murowanymi.

Dom: Parterowe lub jednopiętrowe budownictwo mieszkalne dla jednej rodziny większość ścian jest ścianami drewnianymi

Natomiast „ $n$ ” jest to liczba pięter pomiędzy stacją nadawczą a terminalem, przy czym jest ona większa bądź równa 1. Wielkości współczynnika tłumienia  $L_f$  w zależności od „ $n$ ” została pokazana w tabeli 2.

Tabela 2 Współczynnik tłumienia  $L_f$  [dB] dla ilości pięter  $n \geq 1$  stosowany do obliczeń [5]

Częstotliwość	Mieszkalny	Biurowy	Komercyjny
900 MHz	–	9 (1 piętro) 19 (2 piętra) 24 (3 piętra)	–
1.8-2 GHz	4 $n$	15 + 4 (n – 1)	6 + 3(n – 1)
2.4 GHz	10 <sup>(1)</sup> (mieszkanie) 5 (dom)	14	
3.5 GHz		18 (1 piętro) 26 (2 piętra)	
5.2 GHz	13 <sup>(1)</sup> (mieszkanie) 7 <sup>(2)</sup> (dom)	16 (1 piętro)	–
5.8 GHz		22 (1 piętro) 28 (2 piętra)	

<sup>(1)</sup> Ściany betonowe.

<sup>(2)</sup> Ściany drewniane.

Uwzględniając dodatkowo parametry statystyczne występujących zjawisk propagacyjnych należy dodać informacje o dewiacji poziomu sygnału radiowego spowodowanymi zmianami występującymi na trasie propagacji tego sygnału (tabela 3)

Tabela 3 Współczynnik dewiacji wyrażony w [dB] do obliczeń strat propagacji wewnątrz-objektowych [5]

Częstotliwość (GHz)	Mieszkalny	Biurowy	Komercyjny
1.8-2	8	10	10
3.5		8	
5.2	–	12	–
5.8		17	

### Model jednościeżkowy (One slope model 1SM)

Model 1SM wywodzi się z modelu wielodrogowego stosowanego w otwartym terenie i stanowi jego uproszczoną wersję. Opiera się on o zjawisko wielodrogowości mówiące o różnych poziomach energetycznych oraz o różnych opóźnieniach sygnału radiowego docierającego do odbiornika radiowego. Dany model można opisać zależnością [6]

$$(2) \quad P_{oab}(d)[dB] = P_{oab}(d_0)[dB] - 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d_0}{d} \right) + X(0, \sigma)$$

gdzie:  $P_{oab}(d_0)$  – moc odniesienia pomierzona w odległości  $d_0$ ,  $\gamma$  – wykładnik o wartościach pomiędzy 2-5,5 zależny od złożoności danego środowiska propagacyjnego,  $X(0, \sigma)$  – zmienna gaussowska o wartości średnia 0 i dewiacji  $\sigma^2$

Model jest zaliczany do modeli empirycznych najczęściej używanych, opartych na wyznaczeniu rozkładu mocy w środowisku wewnętrznym. Opiera się on na wykonaniu dużych ilości pomiarów oraz określeniu na podstawie otrzymanych wyników odpowiednich zależności statystycznych. W danym modelu nie uwzględnia się szczegółów architektonicznych oraz nie są brane pod uwagę rodzaje materiałów zastosowanych do budowy pomieszczeń badanych. Prostota tego modelu tłumienia polega na obliczeniu  $L_{1SM}$  [dB] które sprowadza się do rozwiązania zależności

$$(3) \quad L_{1SM}[dB] = L(d_0) + 10n \log_{10} d$$

gdzie:  $L(d_0)$  – tłumienie mierzone w odległości umownej  $d_0$  [m] dla uproszczenia przyjmuję się  $d_0 = 1$ [m],  $n$  – określa indeks odległościowego spadku mocy mierzonego sygnału radiowego,  $d$  – długość trasy propagacyjnej

Dobór parametrów  $d_0$  i  $L(d_0)$  jest dokonywany empirycznie po wykonanych pomiarach co za tym idzie uwzględnia kategorie środowiska w jakim zostały dokonane pomiary. Można wyróżnić następujący podział kryteriów środowiskowych:

- budynki fabryczne z wyposażeniem produkcyjnym
- budynki biurowe w miastach
- budynki o charakterze centrów handlowo-usługowych
- budynki biurowe w strefie podmiejskiej
- domy mieszkalne w miastach
- domy mieszkalne w strefach podmiejskich

Przy wykorzystywaniu danego modelu pamiętać należy o jego przeznaczeniu, Czy analiza występujących łączy radiowych obejmuje jedną kondygnację budynku, oraz czy warunki sprowadzają się do środowiska zamkniętego pokoju czy też do otwartego biura.

### Model liniowy (Linear Attenuation Model LAM)

Model liniowy opiera się na zależności rozchodzenia się fali w wolnej przestrzeni [4] i określa, ile razy zmaleje moc fali odebranej przez antenę izotropową w określonej odległości od izotropowego źródła, w porównaniu do mocy wypromieniowanej przez to źródło do wolnej przestrzeni propagacyjnej [7]

$$(4) \quad L_0[dB] = 32,4 + 20 \log_{10} f [MHz] + 20 \log_{10} d [km]$$

Model LAM podobnie jak model rozchodzenia się w wolnej przestrzeni nie uwzględnia szczegółów architektonicznych w przestrzeni wewnątrz obiektowej oraz nie bierze pod uwagę materiałów z jakiego została ona wykonana jedyna zmianą jest dodanie jednostkowego tłumienia  $\alpha \left[ \frac{dB}{m} \right]$  wraz z odległością  $d[m]$  mierzonej trasy propagacji [8]

$$(5) \quad L_{LAM}[dB] = L_0[dB] + \alpha \left[ \frac{dB}{m} \right] d[m]$$

gdzie:  $L_{LAM}[dB]$ - tłumienie w modelu liniowym,  $\alpha \left[ \frac{dB}{m} \right]$ - tłumienie jednostkowe,  $d[m]$ - odległość trasy propagacyjnej

#### Model Motleya-Keenana

Model Motleya-Keenana bazuje na modelu jednościeżkowym [9] i jest jego rozwinięciem o analizę propagacji pomiędzy kondygnacjami, przez uwzględnienie obecności stropów na trasie propagacji fali radiowej [10]. Jest to realizowane poprzez dodanie liczby stropów oraz ich tłumienia, które brane jest z tabel dla danego materiału, z którego strop został wykonany, przy dokładniejszych wyliczeniach wskazane jest przeprowadzanie badań empirycznych tłumienności stropu.

$$(6) \quad L_{M-K}[dB] = L_{ISM}[dB] + n_s L_s$$

gdzie:  $n_s$ - liczba stropów pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem fali radiowej.  $L_s$ - tłumienie pojedynczego stropu. Wadą opisanego modelu jest brak uwzględnienia ustawienia wyposażenia jakie znajduje się w badanych pomieszczeniach.

#### Model wielościenny (Multi Wall Model MWM)

Model MWM jest modelem rozszerzającym model jednościeżkowy [11] jak również model Motleya-Keenana [12] i wyraża szczegółowy opis tłumienia propagacyjnego występującego w przestrzeni wewnątrz obiektowej. Podobnie jak opisane wcześniej modele uwzględnia on propagację przez ściany jak i przez stropy budynku, jednakże różnicuje właściwości poszczególnych elementów na ściany nośne i działowe oraz na różne rodzaje stropów i ich parametrów [4]

$$(7) \quad L_{LWM}[dB] = L_{ISM}[dB] + \sum_{S=1}^S (n_{ws} L_{ws}) + \sum_{P=1}^P (n_{fp} L_{fp})$$

gdzie:  $S$ - liczba kategorii ścian w budynku,  $n_{ws}$ -liczba ścian kategorii  $S$  występujących na mierzonej drodze propagacyjnej sygnału radiowego,  $L_{ws}$ -tłumienie ściany o kategorii  $S$ ,  $P$  - liczba kategorii stropów w budynku,  $n_{fp}$ -liczba stropów kategorii  $P$  występujących na mierzonej drodze propagacyjnej sygnału radiowego,  $L_{fp}$  - tłumienie stropu o kategorii  $P$ .

Do prawidłowego stosowania danego modelu potrzebne są parametry techniczne danych materiałów, z których zbudowane są ściany i stropy w celach obliczeniowych można zastosować dane z tabeli 4.

#### Model COST 231

Model COST 231 powstał w ramach europejskiego projektu o tej samej nazwie miał on za zadanie doprecyzowanie modelu wielościennego. Po przeprowadzonych badaniach otrzymano model opisany następującą zależnością [13].

Tabela 4 Tłumienie fali radiowej w wybranych materiałach dla określonych częstotliwości [5]

Nr	Materiał	Częstotliwość [MHz]			
		450	900	1800	2100
1	Lekki beton o grubości 30cm, masa właściwa 600kg/m <sup>3</sup>	17,5	20	24	27
2	Cegła perforowana pionowo o grubości 36cm, masa właściwa 800kg/m <sup>3</sup>	0,5	7,5	16	41,5
3	Gazobeton o grubości 36,5cm, masa właściwa 400kg/m <sup>3</sup>	3	6	15	45
4	Cegła perforowana pionowo o grubości 24cm, otynkowana z obydwu stron, masa właściwa 1200kg/m <sup>3</sup>	3,5	8,5	18	27
5	Cegła perforowana pionowo o grubości 24cm, masa właściwa 1200kg/m <sup>3</sup>	1	3	17	19
6	Beton zbrojony o grubości 16 cm, masa właściwa 2400kg/m <sup>3</sup>	10,5	13	15	22
7	Lekki beton o grubości 11,5 cm, masa właściwa 1200kg/m <sup>3</sup>	4	6	12	13
8	Gazobeton o grubości 17,5 cm, masa właściwa 500kg/m <sup>3</sup>	3	6	10	23,5
9	Cegła wapienno-krzemowa o grubości 24 cm, masa właściwa 1800kg/m <sup>3</sup>	3	4	7	13
10	Cegła perforowana pionowo o grubości 11,5cm, masa właściwa 1200kg/m <sup>3</sup>	0	0	5	8
11	Dwu szybowy element szklany laminowany cienką drucianą siatką (AMP)	43	45	50	50
12	Thermolar plus, trój szybowy element szklany (Knoch)	40	42,5	48	48
13	Oszklenie dwu szybowe przeciwsłoneczne (Kinion-Vegla) Contrasol Cool-Lite SKN 172	34	29	29	29
14	Oszklenie dwu szybowe chroniące przed ciepłem (Kinion-Vegla) Climaplust V	35	31	28	29
15	Szkló zbrojone 6 mm cienkim drutem kratka 13x13 mm	22	16	7	5

$$(8) \quad L_{Cost\ 231}[dB] = L(d_0) + L_s + \sum_{S=1}^S (n_{ws} L_{ws}) + n_f \left( \frac{n_f+2}{n_f-1} b \right) L_f$$

$$(9) \quad L_{Cost\ 231}[dB] = 32,4 + 20 \log_{10} f [Mhz] + 20 \log_{10} d [km] + L_s + \sum_{S=1}^S (n_{ws} L_{ws}) + n_f \left( \frac{n_f+2}{n_f-1} b \right) L_f$$

gdzie:  $S$ - liczba kategorii ścian w budynku,  $n_{ws}$ -liczba ścian kategorii  $S$  występujących na mierzonej drodze propagacyjnej sygnału radiowego,  $L_{ws}$ -tłumienie ściany o

kategorii  $S$ ,  $L_s$ - empiryczny współczynnik tłumienia z powodu małych wartości uznawany za równy 0 i pomijany,  $n_f$ - liczba stropów występujących na mierzonej drodze propagacyjnej sygnału radiowego,  $L_f$  - tłumienie stropu  $b$ - współczynnik wyznaczony empirycznie,  $d$ - odległość trasy propagacyjnej,  $Ld_0$ - tłumienie mierzone w odległości umownej  $d_0$  [m] dla uproszczenia przyjmują się  $d_0 = 1$  [m]  $n$ - określa indeks odległościowego spadku mocy mierzonego sygnału radiowego

### Model Winner II

Model Winner II jest uniwersalnym modelem do wyliczania tłumienia zarówno propagacji wewnątrz obiektowej jak i na zewnątrz. Jest to też model do obliczania tłumienia jakie występuje podczas przenikania fali radiowych z przestrzeni wewnątrz obiektowej na zewnątrz i odwrotnie. Model został podzielony dla dwóch wariantów w pierwszym jest zachowana widzialność nadajnika i odbiornika [14]

$$(10) L_{Winter II(LOS)}[dB] = 18,7 \log_{10} d + 46,8 + 20 \log_{10} \frac{f}{5}$$

gdzie:  $d$ -odległość trasy propagacyjnej,  $f$ - częstotliwość w [GHz]

W drugim wariancie na drodze pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem znajdują się przeszkody w rozważaniach wewnątrz obiektowych takimi przeszkodami są ściany [15]

$$(11) L_{Winter II(NLOS)}[dB] = 20 \log_{10} d + 46,4 + 20 \log_{10} \frac{f}{5} + 12n_w + 17 + 4(n_f - 1)$$

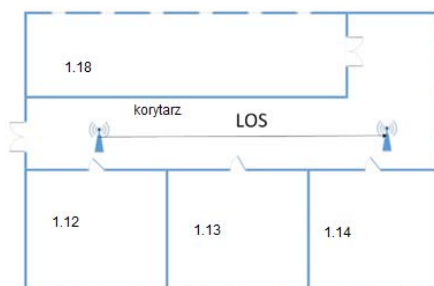
gdzie:  $d$ -odległość trasy propagacyjnej,  $f$ - częstotliwość w [GHz],  $n_w$ -liczba ścian na drodze propagacji,  $n_f$ -liczba stropów na drodze propagacji

### Model wewnątrz pojazdu

Model ten jest stosowany do wyznaczania tłumienia sygnału GSM wewnątrz pojazdu z wyliczeń empirycznych tłumienie to ma poziom od 2 do 5 [dB] a oszacowanie tej wartości oblicza się z zależności

$$(12) L_{MWP}[dB] = 40(1 - 4 \cdot 10^{-3} \Delta h_t) \log_{10} r - 18 \log_{10} \Delta h_t + 21 \log_{10} f + 80$$

gdzie:  $r$ - odległość w [km] między stacją bazową a odbiornikiem,  $f$ - częstotliwość w [MHz],  $\Delta h_t$ -odległość anteny stacji bazowej[m] wyznaczona ponad średnim poziomem dachów [16]



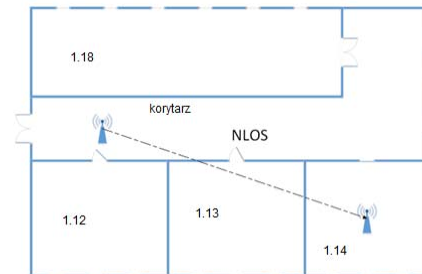
Rys. 2 Rysunek przedstawiający bezpośrednią widoczność anteny nadawczej z odbiorczą (LOS)

### Bezpośrednia widoczność anteny nadawczej z odbiorczą Line of Signal (LOS)

Bezpośrednia widoczność anteny nadawczej w obiektach zamkniętych może być różnie interpretowana jest to związane z różnorodnością obiektów. Obiekty jakie wchodzi w skład są zarówno duże hale magazynowe, biura zabudowane boksami z wolną przestrzenią, hale

produkcyjne jak również obiekty mieszkalne z małymi pomieszczeniami i dużą ilością klatek schodowych. Uwzględniając tę różnorodność przy zastosowaniu modeli propagacyjnych które opierają się na propagacji w wolnej przestrzeni zostały wydzielone parametry które mają największy wpływ na wyznaczenie wartości sygnału w miejscu odbioru.

### Brak bezpośrednia widoczności anteny nadawczej z odbiorczą Non Line of Signal (NLOS)



Rys. 3 Rysunek przedstawiający brak bezpośredniej widoczności anteny nadawczej z odbiorczą (NLOS)

Sytuacja przedstawiona na rysunku 3 jest sytuacją najczęściej występującą w pomieszczeniach zamkniętych z jakimi mamy do czynienia w budynkach mieszkalnych, urzędach administracji publicznej, szpitalach, w biurach, akademikach, szkołach, uczelniach wyższych itp. Brak widoczności jest jednym z głównych problemów z jakim borykają się projektanci bezprzewodowych sieci radiowych. W przypadkach, gdy widoczność anteny nadawczej z odbiorczą nie jest zapewniona parametrami które mają największy wpływ na odczyt sygnału w miejscu odbioru są:

- częstotliwość fali elektromagnetycznej
- ilość przeszkód pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem
- moc sygnału

Częstotliwość jest ważnym parametrem mającym wpływ na propagację w środowiskach NLOS, zgodnie z tabelą 4 wraz ze zmianami częstotliwości tłumienie fal elektromagnetycznych w danym materiale ulega zmianom. Bardzo dobrze widać to na przykładzie ściany wykonanej z cegły perforowanej.

Tabela 5 (fragment tabeli 4)

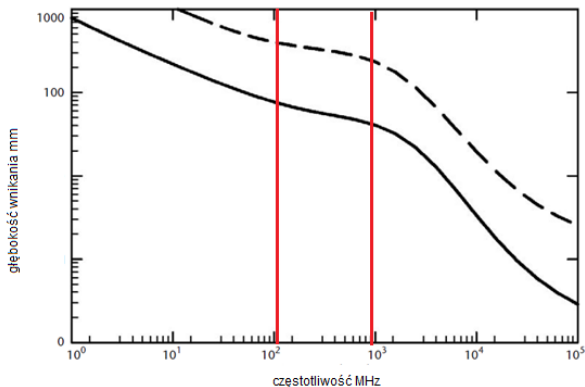
Nr	Materiał	Częstotliwość [MHz]			
		450	900	1800	2100
2	Cegła perforowana pionowo o grubości 36cm, masa właściwa 800kg/m <sup>3</sup>	0,5	7,5	16	41,5

Jak widać na załączonym fragmencie tabeli podwojenie częstotliwości z 450[MHz] na 900[MHz] powoduje wzrost tłumienia o 7[dB] czyli aż o 1500% co bezpośrednio świadczy o wpływie wyboru częstotliwości na wyznaczenie wartości sygnału w miejscu odbioru. Przedstawione w tabeli częstotliwości są z zakresu fal decymetrowych i długości ich fal znajdują się w przedziale od 10 do 100 [cm] jest to zakres Ultra High Frequency (UHF) [17].

### Wpływ przeszkód pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem

W rozpatrywaniu rozchodzenia się sygnału radiowego w pomieszczeniach zamkniętych ważną rolę odgrywa ilość przeszkód jakie na swojej drodze napotyka sygnał. Jak opisane zostało we wcześniejszym podpunkcie tłumienie ścian ma duży wpływ na pomiar sygnału, ponieważ nie są to wartości małe każdorazowa konieczność pokonania

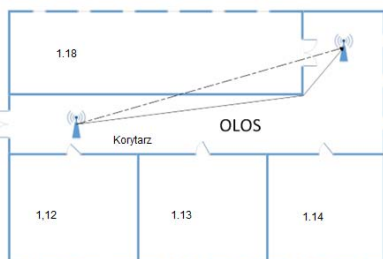
przeszkody przez fale radiową powoduje dodawanie tłumienia. Dość ciekawym przykładem przeszkody, która powoduje tłumienie sygnału jest człowiek. Nie jest możliwe jednoznaczne wyznaczenie ilości osób, które będą stały na przeszkodzie danej fali radiowej. Na rysunku 4 przedstawione jest wnikanie fali w osobę o sylwetce umięśnionej, zaznaczone linią ciągłą oraz osoby otyłej zaznaczone linią przerywaną [18].



Rys. 4 Wykres przedstawiający zależność wnikania fali elektromagnetycznej w ciało człowieka w odniesieniu do częstotliwości [18]

Aby porównać zaprezentowany wykres z częstotliwościami przedstawionymi przy przenikaniu przez ściany budynków należy zwrócić uwagę na fragment wykresu od  $10^2$  do  $10^3$  [MHz], człowiek o umięśnionej posturze będzie tłumił całkowicie sygnał w zadanych częstotliwościach natomiast przez człowieka o posturze masywnej fala będzie przenikać, lecz będzie już dość mocno wytłumiona. Jak widać przewidywanie obecności ludzi w danym pomieszczeniu ma bardzo duży wpływ na modelowanie rozkładu urządzeń nadawczych, pominięcie elementu ludzkiego powodować będzie niepoprawne działanie zaprojektowanego systemu.

### Brak bezpośredniej widoczności anteny nadawczej z anteną odbiorczą znajdującą się za przeszkodą (Obstacle Line of Signal (OLOS))



Rys. 5 Rysunek przedstawiający brak bezpośredniej widoczności anteny nadawczej z odbiorczą, antena odbiorcza jest za przeszkodą (OLOS)

Przypadek przedstawiony na rysunku powyżej jest najczęściej spotykanym przypadkiem w pomieszczeniach zamkniętych. Dzieje się tak dlatego że użytkowana przestrzeń budynku jest ciągle zmieniana poprzez dodawanie nowych urządzeń mebli, przestawiania układu pracy w danym pomieszczeniu czy pojawianiu się chwilowych przeszkód na drodze propagacji fali elektromagnetycznej. Właśnie w takich przypadkach fala radiowa docierająca do odbiornika w linii prostej nadajnik odbiornik posiada mniejszą moc niż fale załamane, [19] rozproszone, odbite od elementów pomieszczenia.

Głównymi zjawiskami, które należy rozpatrzeć w omawianym przypadku są

- Wielodrogowość
- Dyfrakcja
- Rozproszenie

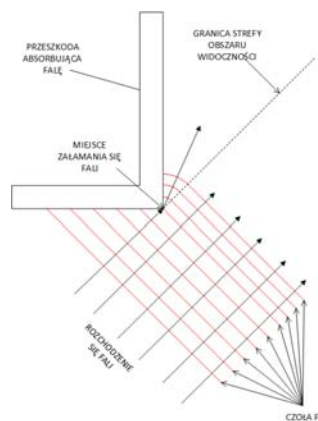
### Wielodrogowość

Jest to zjawisko polegające na docieraniu fali elektromagnetycznej do odbiornika różnymi drogami. Zgodnie z [20] wielodrogowość jest szczególnie istotna w środowiskach wewnętrznych, gdzie ściany budynków wraz z elementami wyposażenia zapewniają silne odbicia.

W wyniku czego, sygnał odebrany zostaje zsumowany z kilku składników o różnych amplitudach, kątach fazowych i kierunkach padania.

### Dyfrakcja

Dyfrakcja jest to zjawisko załamania się fali na przeszkodzie dzięki czemu możliwe jest dotarcie fali w miejsca o braku bezpośredniej widoczności z nadajnikiem. Zjawisko to można wyjaśnić za pomocą zasady Huygensa według której każdy punkt, do którego dochodzi powierzchnia fazowa (nazywana często czołem fali), można uważać za źródło rozchodzącej się na wszystkie strony kulistej fali cząstkowej.



Rys. 6 Załamanie się fali zgodnie z zasadą Huygensa

### Rozpraszanie

Rozpraszaniem promieniowania nazywamy losowe odchylenie drogi rozchodzenia się fal radiowych w niejednorodnym środowisku. Rozpraszanie jest złożonym procesem na które wpływ ma wiele czynników jednym z nich jest powierzchnia odbijająca. Dla fal metrowych i decymetrowych, gdzie współczynnik odbicia od powierzchni zależy głównie od nierówności powierzchni im większa nierównomierność terenu w stosunku do długości fali, tym bardziej odbicie nabiera charakteru rozpraszania. Zgodnie z kryterium Rayleigh'a mówiącym, że powierzchnię odbijającą można uważać za gładką dla fali o długości  $\lambda$ , gdy [21]

$$(13) \quad \lambda [m] > 16 \times H [m] \times \sin \gamma$$

gdzie:  $H$  - jest średnią wartością różnicy wysokości nierówności powierzchni,  $\gamma$  - jest kątem elewacji kierunku nadchodzenia fali.

### Stanowisko do wyznaczania wartości sygnału w miejscu odbioru i przeprowadzenie pomiarów

Zaproponowana metoda pomiaru wartości sygnału w miejscu odbioru proponowana przeze mnie jest podstawową metodą porównawczą. Wyliczoną wartość będzie tłumienie elementów wewnątrz budynkowych takich jak ściany, stropy. Opisywana metoda musi spełniać następujące założenia:



Antena nadawcza i odbiorcza muszą być oddalone od badanej przeszkody na odległość spełniającą założenia strefy dalekiej to znaczy, że fala padająca na przeszkodę powinna mieć charakter fali płaskiej

W celu prawidłowych pomiarów anteny powinny mieć takie same charakterystyki promieniowania

Pierwszym pomiarem jest pomiar odniesienia, mierzony jest sygnał w wolnej przestrzeni z zachowaniem warunków strefy dalekiej dla zadanych częstotliwości odniesienia



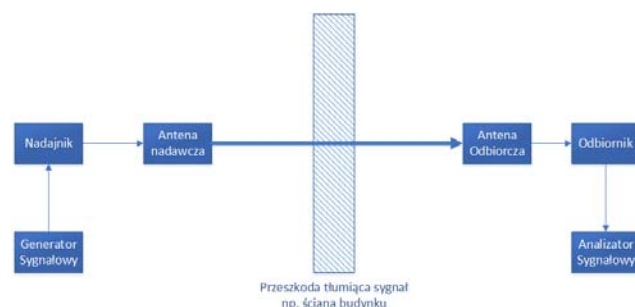
Rys. 7 Schemat przedstawiający pomiar wartości sygnału w miejscu odbioru w wolnej przestrzeni

Otrzymane wyniki w strefie dalekiej pozwalają na obliczenie tłumienia elementów wewnątrz obiektowych

Dla poprawnej interpretacji wyników warunki pomiaru w wolnej przestrzeni jak i z elementem tłumiącym powinny być takie same

W trakcie pomiarów w torze propagacyjnym nie mogą znajdować się żadne elementy niepożądane zwiększające tłumienność

Szumy zewnętrzne powinny być takie same dla każdego z pomiarów



Rys. 8 Schemat przedstawiający pomiar wartości sygnału w miejscu odbioru w warunkach braku widoczności anten (NLOS)

Mierzonym parametrem jest natężenie pola elektrycznego  $E$  [ $\text{dB}(\frac{\mu\text{V}}{\text{m}})$ ] przy antenie odbiorczej. Aby wliczyć tłumienność należy skorzystać ze wzoru:

$$(14) \quad L[\text{dB}] = 139,3 - E + 20 \log_{10} f[\text{MHz}]$$

gdzie:  $L$  - tłumienie w torze pomiarowym,  $E$  - natężenie pola elektrycznego przy antenie odbiorczej.

W celu obliczenia tłumienia sygnału przez ścianę należy odjąć wartości otrzymane w wyniku pomiaru w przypadku wyznaczenia tłumienia dla wolnej przestrzeni od wyznaczonego tłumienia dla przypadku z występującą przeszkodą w torze propagacyjnym

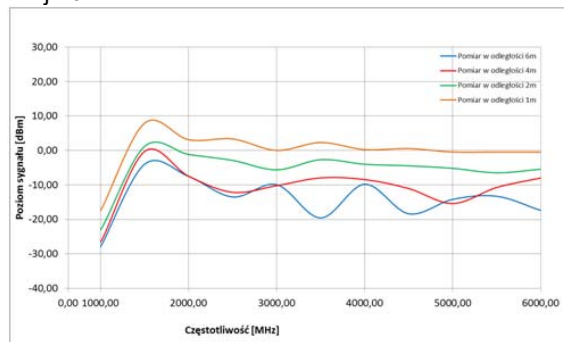
Schemat blokowy stanowiska do pomiaru tłumienności ścian w pomieszczeniach zamkniętych przedstawiono na rys.8. Stanowisko składa się z dwóch anten, anteny nadawczej i anteny odbiorczej. Anteny te zostały dobrane zgodnie z zakresem pomiarowym jaki dana antena obsługuje, dla wykonywanych pomiarów odpowiednie anteny pracują w zakresie od 1000[MHz] do 6000[MHz].

### Wykonanie i opracowanie pomiarów

Pomiary tak jak było to omówione są realizowane w dwóch etapach. Pierwszym jest zestawienie stanowiska

pomiarowego dla przypadku propagacji w wolnej przestrzeni. Anteny zostały ustawiane w odległościach 1[m], 2[m], 4[m], 6[m]. Pomiar został dokonany w korytarzu, w którym będą później dokonywane pomiary tłumienności poszczególnych ścian.

Warunki dla obydwu pomiarów były zbliżone do siebie jednak nie można wykluczyć błędów wynikających ze zmiany ustawienia anten. Wyniki pomiarów zmierzonego poziomu sygnałów dla przedziału częstotliwości od 1000[MHz] do 6000[MHz] zostały odczytane z analizatora widma i zobrazowane za pomocą wykresu na rysunku poniżej 10



Rys. 9 Poziom sygnału odczytany z analizatora widma dla różnych częstotliwości.

Łatwo można zauważyć, że wraz z oddaleniem anten od siebie charakter otrzymanych przebiegów coraz bardziej odbiega od liniowego. W dalszym etapie wykonywania pomiarów anteny zostały ustawione tak aby pomiędzy nimi znajdowała się przeszkoda w postaci ściany działowej budynku. W celu otrzymania tłumienności ściany należy skorzystać z równania bilansu energetycznego łącza radiowego

$$(15) P_{odbm\min}[\text{dBm}] = P_{nad}[\text{dBW}] + G_{nad}[\text{dB}] - L_{prop}[\text{dBm}] + G_{odb}[\text{dB}]$$

Po przekształceniach otrzymuje się zależność na tłumienie

$$(16) L_{prop}[\text{dBm}] = P_{nad}[\text{dBW}] - P_{odbm\min}[\text{dBW}] + G_{nad}[\text{dB}] + G_{odb}[\text{dB}]$$

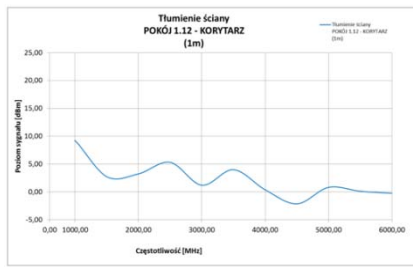
gdzie:  $P_{odbm\min}[\text{dBW}]$ -minimalna moc sygnału odbierana na wyjściu anteny odbiorczej, wyrażona względem jednego wata, konieczna do prawidłowego odbioru sygnału radiowego,  $P_{nad}[\text{dBW}]$ -moc sygnału nadawanego na wejściu anteny nadawczej wyrażona względem jednego wata,  $G_{nad}[\text{dB}]$ -zysk anteny nadawczej,  $L_{prop}[\text{dBm}]$ -tłumienie fali radiowej w środowisku propagacyjnym,  $G_{odb}[\text{dB}]$ -zysk anteny odbiorczej, Zgodnie z zależnością na tłumienie do wyliczenia tłumienności ściany należy użyć równania

$$(17) \quad L_2[\text{dBm}] - L_1[\text{dBm}] = L_{ściany}[\text{dBm}]$$

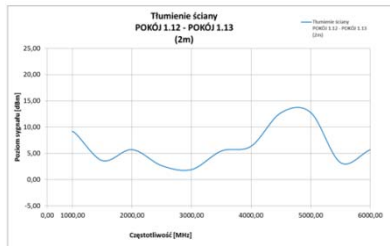
gdzie:  $L_1[\text{dBm}]$ - tłumienie otrzymane z badania w wolnej przestrzeni,  $L_{ściany}[\text{dBm}]$ - Tłumienie ściany,  $L_2[\text{dBm}]$ - Tłumienie otrzymane z pomiaru ze ścianą

Po wykonaniu kolejnych pomiarów i przeliczeniu otrzymanych wyników tłumienności ściany, wyniki dla różnych miejsc przeprowadzenia pomiarów przedstawione zostały poniżej. Jak można zauważyć przedstawione wykresy różnią się od siebie jest to spowodowane niejednorodnością danej ściany działowej. Można zauważyć, że do częstotliwości około 1500[MHz] tłumienność spada a następnie nieznacznie wzrasta takie zmiany można zaobserwować też na wyższych częstotliwościach

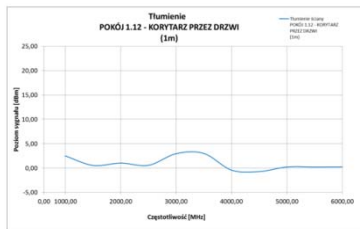
Pomiary dokonane zostały także przez drzwi w celu sprawdzenia metody pomiaru tłumienia.



Rys. 10 Tłumienność ściany w relacji pokój 1.12- korytarz



Rys.11 Tłumienność ściany w relacji pokój 1.12- pokój 1.13

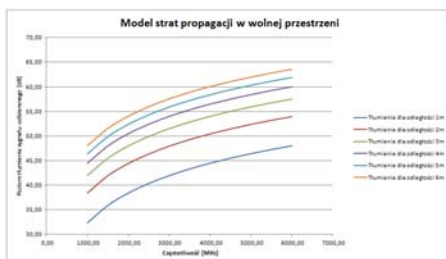


Rys.12 Tłumienność drzwi w relacji pokój 1.12- korytarz przez drzwi

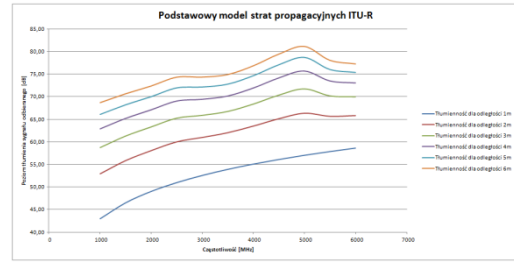
Jak widać tłumienność dla drzwi waha się w okolicy zera co świadczyć może o znikomym wpływie, materiału z jakiego zostały one wykonane, na propagację fal wewnątrz budynkową.

Dla porównania otrzymanych wyników z symulacjami w modelach, poniżej przedstawiono symulacje tłumienia dla różnych modeli propagacyjnych w funkcji częstotliwości.

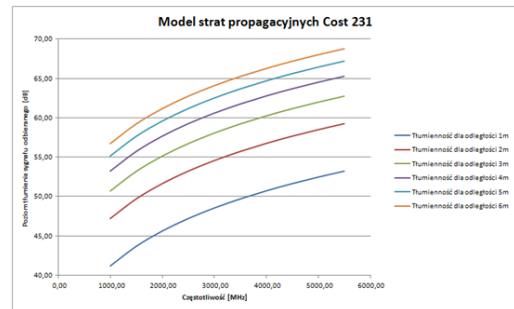
Porównując rysunek 10 z 14 można zauważyć, że pomierzone wielkości charakteryzują się porównywanymi spadkami poziomu sygnału pomiędzy kolejnymi oddaleniami od anteny nadawczej dla przebiegów z symulacji i pomiaru. Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono wyniki tłumienności trasy dla różnych modeli przy takich samych założeniach początkowych otrzymaliśmy różne wyniki można z tego wnioskować, że nie istnieje model uniwersalny pozwalający na wyznaczenie trasy propagacyjnej w środowisku wewnątrz obiektowym.



Rys.13 Wykres przedstawiający zmiany tłumienności dla modelu w wolnej przestrzeni



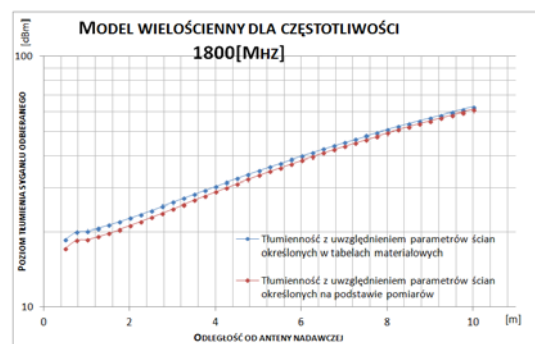
Rys. 14 Wykres przedstawiający zmiany tłumienności dla modelu ITU-R



Rys. 15 Wykres przedstawiający zmiany tłumienności dla modelu COST 231

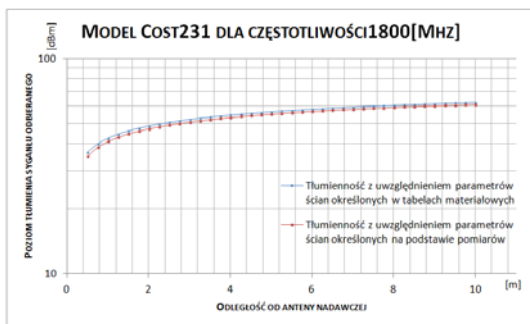
### Wykorzystanie otrzymanych wyników pomiarów w modelach propagacyjnych.

Dzięki wyznaczeniu tłumienności dla ścian działowych można uśrednione wyniki dla danej częstotliwości zastosować w modelach propagacyjnych przedstawionych powyżej. Posiadanie takich danych umożliwia wykonanie dokładniejszych symulacji przez co proponowany model jest bliższy rzeczywistości środowisku propagacyjnemu. Modelami które zostały przedstawione dla wyliczonych wartości tłumienia badanej ściany są „Model wielościenny” oraz „Model COST231” z opisanych wyżej modeli tylko te dwa posiadają w równaniach zależność na tłumienność materiału z jakiego wykonane są ściany a który to parametr może być wyznaczany empirycznie. Symulacje strat propagacyjnych zostały wykonane dla częstotliwości 1800[MHz] częstotliwość ta została wybrana ze względu na bardzo dobre opisanie w literaturze przez co nie ma żadnych problemów z doбором odpowiednich współczynników. Średnia tłumienność otrzymana z obliczeń dla częstotliwości 1800 MHz wyniosła 3,5 [dBm], dokładnie taka wartość została wykorzystana do symulacji w modelu wielościennym jak i COST 231. Materiałem doboranym najczęściej w rozpatrywaniu propagacji wewnątrz budynkowej dla ścian działowych jest cegła perforowana pionowo o grubości 11,5cm z masą właściwą 1200kg/m<sup>3</sup>, dokładne parametry dla takiej budowy ściany zostały odczytane dla potrzeb symulacji.



Rys. 16 Wykres tłumienia wraz ze wzrostem odległości dla modelu wielościennego

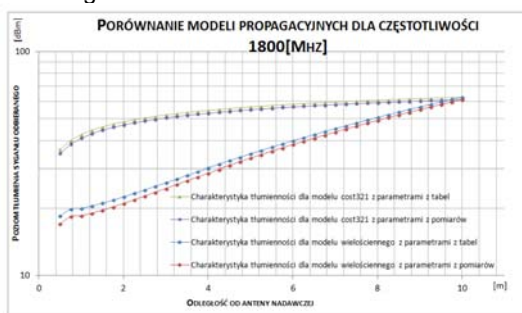
Na rysunku 16 zaprezentowano wykres obrazujący wyniki przeprowadzonej symulacji dla założonego tłumienia ściany jak i dla tłumienia określonego na podstawie przeprowadzonych badań. Analizując otrzymany wykres zauważamy, iż dla symulacji z parametrem empirycznym przebieg tłumienności wraz z oddalaniem się od źródła promieniowania jest na mniejszym poziomie tłumienia sygnału.



Rys. 17 Wykres tłumienia wraz ze wzrostem odległości dla modelu COST 231

Mniejsza tłumienność dla modelu z elementami empirycznymi wskazują różnicę pomiędzy danymi zawartymi w tabelach a rzeczywistym środowiskiem propagacyjnym. Dla takich samych parametrów wykonane zostały obliczenia dla modelu COST 231 z tym, że model uwzględnia także przenikanie fal elektromagnetycznych przez stropy. Za materiał z jakiego został wykonany strop przyjęto beton zbrojony o grubości 16 cm z masą właściwą  $2400\text{kg/m}^3$  tłumienność zawarta w tabelach dla takiego materiału wynosi  $15[\text{dBm}]$ . Jak zostało pokazane na rysunku 15 symulacja dla modelu COST 231 przyjmuje większe wartości tłumienia, jest to spowodowane rozbudowaniem modelu o elementy uwzględniające propagację przez stropy budynku. Na zaprezentowanym wykresie tak samo jak dla modelu wielościennego symulacja z danymi empirycznymi charakteryzują się mniejszą tłumiennością sygnału.

Zestawienie symulacji modelu wielościennego i COST 231 pozwala na zobrazowanie jak duży wpływ na symulację jest rozbudowanie modelu o przenikanie przez takie elementy jak strop budynku. Dla odległości do 4m od nadajnika tłumienność w przedstawionym modelu COST 231 jest niemal dwukrotnie większa od modelu wielościennego.



Rys. 18 Wykres tłumienia wraz ze wzrostem odległości dla omawianych modeli

## Wnioski

Przedstawiona praca w swej tematyce zawiera zarówno rozważania teoretyczne jak i praktyczne podejście do przeglądu i analiz metod stosowanych do wyznaczenia strat propagacji wewnątrz obiektu. Dzięki dokonaniu przeglądu modeli propagacji fali elektromagnetycznej wewnątrz obiektów można zauważyć jak wiele aspektów należy wziąć

pod uwagę podczas wykonywania symulacji i planowania pokrycia radiowego danej przestrzeni użytkowej. Wnioskiem, który narzuca się po analizie opisanych modeli jest fakt, iż nie istnieje model uniwersalny pozwalający na wykorzystanie w każdym środowisku wewnątrz obiektowym. Analizując opisane modele rzuca się powierchowność niektórych z nich, brak jest uwzględnienia zjawisk, które występują w rzeczywistych warunkach. Poszczególne modele są w głównej mierze dopasowywane do konkretnego środowiska i stosowanie ich w innych miejscach skutkuje doborem dużej ilości współczynników, nie gwarantujących prawidłowego zamodelowania, propagacji fali elektromagnetycznej w danym obiekcie. Aby dokładniej zapoznać się ze zjawiskami występującymi w trakcie propagacji opisane zostały parametry fizyczne mające bezpośredni wpływ na wartości sygnału w miejscu odbioru. Ilość opisanych zjawisk jest tak duża, że powoduje to duże problemy w przewidywaniu zasięgu radiowego. Dokładne opisanie chociażby dyfrakcji jest bardzo pracochłonne i nie gwarantuje, że uwzględni się dane zjawisko w pełni. Dla ułatwienia zastosowano w pracy podział na modelowanie obiektów z bezpośrednią widocznością LOS z brakiem widoczności NLOS i z zasłonięciem tzw. OLOS. Rozpatrywanie tak podzielonych obiektów ułatwia analizę, ale mimo to jest pracochłonne i zajmuje dużo czasu. Zaproponowana metoda pomiaru tłumienności jako metoda porównawcza spełnia zakładane założenia, ale by była prawidłowa należy pamiętać o zmiennych warunkach, które mogą nastąpić w trakcie dokonywania pomiarów. Z otrzymanych wyników pomiarów dla ustawienia stanowiska z bezpośrednią widocznością anten zaobserwowano, że wraz ze wzrostem odległości pomiędzy antenami tłumienność wzrasta. A przy odległości 6m następują widoczne zmiany w przebiegu charakterystyki co świadczy o dużym wpływie czynników zewnętrznych na odczyt sygnału. Wyliczone wartości tłumienia ściany mierzonej dla danych częstotliwości są zbliżone do wartości umieszczonych w tabelach pomiarowych co świadczy o poprawności wykonania pomiarów. Jednak nie można wykluczyć błędów występujących podczas pomiaru, ponieważ nie został spełniony warunek identycznego środowiska pomiarowego dla pomiarów z LOS jak i NLOS. Dzięki wykonanym pomiarom możliwa była symulacja modelu wielościennego i modelu COST 231 dla pomierzonych wartości tłumienia ścian budynku. Zgodnie z zaprezentowanymi wykresami na rysunku 15 symulacja tłumienia dla modelu o parametrach uzyskanych z pomiarów jest na mniejszym poziomie od symulacji z danymi z tabel. Jak widać na danym rysunku dobór modelu do danego środowiska ma bardzo duży wpływ na przewidywaną tłumienność, dlatego nie należy stosować modeli uwzględniających propagację np. przez stropy budynków, gdy planowana sieć jest na jednej kondygnacji. Co prawda ze względu na bezpieczeństwo danych przesyłanych w sieciach radiowych jest to wskazane, lecz ze względów ekonomicznych i praktycznych nie jest racjonalne.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Marian Wnuk, Wojskowa Akademia Techniczna Wydział Elektroniki Instytut Systemów Łączności, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: mwarian.wnuk@wat.edu.pl; mgr inż. Rafał Nogły, Wojskowa Akademia Techniczna Wydział Elektroniki Instytut Systemów Łączności, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: rafal.nogly@wat.edu.pl

## LITERATURA

- [1]. Stuber, G L., „Principles of Mobile Communication”, *Kluwer Academic Publishers*, 2000
- [2]. Parsons, D. J., „The mobile radio propagation channel. Second Edition”, *John Wiley & Sons*, 2000



- [3]. Lee, W.C.Y. "Mobile Communication Design Fundamentals", *John Wiley & Sons*, 2003, Second Edition
- [4]. T. Dinesh, "Indoor Propagation Modeling at 2.4 GHz for IEEE 802.11 Networks", *Master of Science*, December 2005,
- [5]. P. Pauli, D. Moldan „Reduction and shielding of RF and microwaves: construction materials, screens, wainscots and tissues” *Pauli*, 2000
- [6]. K. Crane. Robert, „Propagation Handbook for Wireless Communication System Design”, *CRC Press*, 2003
- [7]. Resolutions radiocommunication assembly (ra-12) Geneva, 16-20 January 2012
- [8]. Recommendation ITU-R.” Series Radiowave propagation (09/2013)
- [9]. M. Wnuk „Wyznaczenia strat propagacji w obszarach zurbanizowanych” *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2023), nr 7, 55-161
- [10]. Recommendation ITU-R P.1407-5 „Multipath propagation and parameterization of its characteristics” P Series Radiowave propagation (09/2013)
- [11]. Recommendation ITU-R P.530-15 „Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems” P Series Radiowave propagation (09/2013)  
Ł. Jasiński „Analiza i porównanie modeli propagacyjnych dla środowiska wewnątrz budynkowego”, *Wrocław* 2011
- [12]. Al-Hareth Zyoud, Jalel Chebil, et all „Comparison of Empirical Indoor Propagation Models for 4G Wireless Networks at 2.6 GHz” *CEIT* 2013
- [13]. R. Jukka, „COST-231 Path-loss models”, *Tampere University of Technology Institute of Communications Engineering*, 2003
- [14]. P. Kyösti, J. Meinilä, L. Hentilä, et all. „Report IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 V1.2 WINNER II Channel Models” 2008
- [15]. D. Vanhoenacker-Janvier, „Propagation models for wireless mobile communications”, *Microwave Lab. UCL, Louvain-la-euve, Belgium*
- [16]. P. Gajewski, S. Wszelak „Technologie bezprzewodowe sieci teleinformatycznych”, *WKŁ, Warszawa* 2008
- [17]. S.R. Saunders, A.A. Zavala „Antennas and propagation for wireless communication systems “second edition”, *John Wiley & Sons, Ltd.* 2007
- [18]. P. S. Hall Yang Hao „Antennas and Propagation for Body-Centric Wireless Communications” *U.S. Library of Congress* 2006
- [19]. Lee, S., Ko, H.: “An intelligent Multipath Propagation Prediction Model Using Circular Representation in Microcell Design”, *IEICE Trans. Commun*, wolumin E83-B, number 4, April 2000
- [20]. Al-Hareth Zyoud, Jalel Chebil, et all „Comparison of Empirical Indoor Propagation Models for 4G Wireless Networks at 2.6 GHz” *CEIT* 2013
- [21]. V.S. Abhayawardhana, I.J. Wassell, D. Crosby, M.P. Sellars, M.G. Brown, “Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems”, *Ofcom Ref: AY4463, UK*