

Modelowanie rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w warunkach idealnych i rzeczywistych

Abstract. This article applies to modelling the propagation of electromagnetic waves. The use of mathematical models describing the propagation of electromagnetic waves allows you to simulate the propagation of any environment such as a building. The paper shows problem of selecting the appropriate propagation model for the analysis of the propagation environment. (*Modeling the propagation of electromagnetic waves in ideal and real conditions*)

Streszczenie. Artykuł dotyczy modelowania rozchodzenia się fal elektromagnetycznych. Zastosowanie matematycznych modeli opisujących rozchodzenie się fal elektromagnetycznych pozwala na symulowanie dowolnego środowiska propagacyjnego np. budynku. Celem artykułu jest przedstawienie problemu doboru odpowiedniego modelu propagacyjnego do analizowanego środowiska.

Keywords: wave propagation, attenuation, model

Słowa kluczowe: propagacja fal, tłumienie, model

doi:10.12915/pe.2014.07.31

Wstęp

W ostatnich latach zaobserwować można dynamiczny wzrost liczby urządzeń korzystających z komunikacji bezprzewodowej. Wśród nich zdecydowaną większość stanowią urządzenia mobilne (smartfony, tablety), ale nie należy pomijać intensywnie rozwijanych nowych środków i systemów łączności (także wojskowych) bezprzewodowej. Wprowadzane na rynek rozwiązania bezprzewodowe należy wcześniej przetestować. W tym celu prowadzone są symulacje pracy urządzeń bezprzewodowych lub nawet całych systemów telekomunikacyjnych w różnych środowiskach propagacyjnych. Praktycznie niemożliwe jest zrealizowanie wszystkich typów testów w rzeczywistym środowisku propagacyjnym. Zastosowanie matematycznych modeli opisujących rozchodzenie się fal radiowych pozwala na wyeliminowanie tej niedogodności, możliwe staje się symulowanie dowolnego środowiska propagacyjnego np. budynku. Opracowanie odpowiedniego oprogramowania symulacyjnego, lub skorzystanie z już istniejącego pozwala na stosunkowo tanią weryfikację przygotowywanych projektów, przy akceptowalnym czasie trwania i uzyskiwanej dokładności symulacji.

W niniejszym artykule przedstawiono problematykę doboru właściwego modelu propagacyjnego w celu jak najbardziej poprawnego i trafnego wyznaczenia tłumienia fali elektromagnetycznej na określonej jej trasie propagacji.

Współczynnik tłumienności trasy

Podstawowym elementem przewidywania (szacowania) poziomu sygnału w modelach propagacyjnych jest współczynnik tłumienności trasy. Współczynnik ten określa zmniejszenie poziomu sygnału w porównaniu do poziomu sygnału wytworzonego (emitowanego od źródła). Do zdefiniowania współczynnika tłumienności trasy rozpatrzmy elementarny model systemu, w skład którego wchodzi nadajnik (źródło sygnału) o mocy P_{pr} , antena nadawcza o zysku G_n , oraz po stronie odbiorczej antena odbiorcza o zysku G_o i odbiornik na wejściu, którego odbieramy moc P_r . Pomiedzy tymi urządzeniami znajduje się środowisko propagacyjne wprowadzające tłumienie sygnału L . Schemat takiego elementarnego łącza radiokomunikacyjnego pokazano na rys.1. W przypadku, gdy nie znamy parametrów anteny nadawczej te można zastąpić ogólnie jednym elementem – źródłem sygnału emitującego fale elektromagnetyczną o mocy P_i .

Bilans mocy łącza radiokomunikacyjnego można wyrazić za pomocą następującej zależności:

$$(1) \quad P_r = \frac{G_n G_o}{L} P_{pr} \quad P_r = \frac{G_o}{L} P_i$$

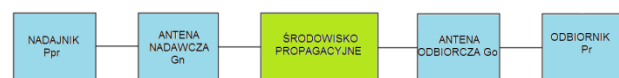
W zależności (1) moce P_{pr} , P_r , P_i , wyrażone są w watach. Zależność powyższą wygodniej jest przedstawić w postaci, w której poszczególne składniki wyrażone są w [dB]:

$$(2) \quad P_r = P_{pr} + G_n + G_o - L$$

$$P_r = P_i + G_o - L$$

gdzie: moce P_{pr} , P_r , P_i , wyrażone w [dBm], zyski energetyczne anteny nadawczej G_n oraz odbiorczej G_o wyrażone w [dB]; współczynnik tłumienności trasy L wyrażony w [dB].

Współczynnik tłumienności trasy L reprezentuje własności środowiska, w którym propaguje się sygnał (tłumienność trasy, tłumienność ścian budynków, tłumienność zabezpieczeń przed ułotem informacji itp.). Wyznaczenie zatem tego współczynnika umożliwia określenie poziomu sygnału w miejscu odbioru. Biorąc pod uwagę złożoność zagadnień rozpraszania, odbicia, dyfrakcji sygnału wyznaczanie wartości współczynnika tłumienności jest zagadnieniem złożonym, jednakże większość modeli propagacyjnych skupia się w dużej mierze na określeniu tego współczynnika.



Rys. 1. Schemat elementarnego łącza radiokomunikacyjnego

Model propagacyjny to wzór matematyczny, który z pewnym przybliżeniem opisuje propagację fal radiowych uwzględniając takie czynniki jak częstotliwość, odległość czy wysokość zawieszenia anteny. Generalnie modele propagacyjne można podzielić na empiryczne, deterministyczne i inne będące najczęściej połączeniem obu wcześniejszych.

Tłumienie swobodnej przestrzeni

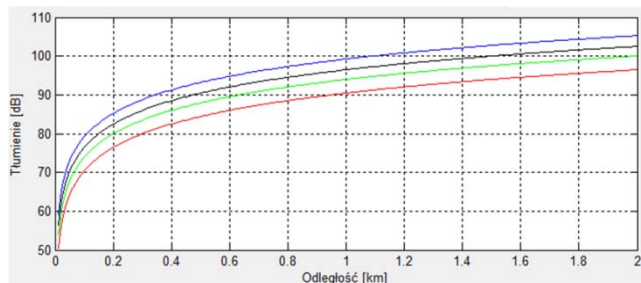
Propagacja fal w wolnej przestrzeni jest przypadkiem środowiska idealnego, pozbawionego jakichkolwiek przeszkód, nieuwzględniającym wpływu podłoża ani innych parametrów i właściwości ośrodka propagacji. Podstawowym zagadnieniem związanym z modelami propagacyjnymi jest określenie współczynnika tłumienności,

dla przypadku propagacji w wolnej przestrzeni. Tłumienie wolnej przestrzeni opisuje zależność:

$$(3) \quad L = 32,4 + 20 \log d + 20 \log f$$

gdzie: d - odległość pomiędzy antenami wyrażona w [km],
 f - częstotliwość propagowanej fali radiowej [MHz]

Na rysunku 3 przedstawiono wpływ zmian częstotliwości fali elektromagnetycznej na tłumienie w wolnej przestrzeni.



Rys. 2. Wpływ częstotliwości na tłumienie w wolnej przestrzeni (800MHz, 1200MHz, 1600MHz, 2200MHz)

Modelowanie tłumienia propagacyjnego w terenie zabudowanym

Wyznaczanie tłumienia sygnału radiowego w terenie zurbanizowanym, w którym występuje duże zróżnicowanie infrastruktury środowiska propagacyjnego jest problemem złożonym. Ponieważ zdecydowana większość komunikacji bezprzewodowej występuje głównie w terenie zabudowanym i głównie w większych miastach, zatem istotne jest przeanalizowanie możliwych warunków propagacji fal, z jakimi można się spotkać w takich warunkach. W przypadku radiokomunikacji w terenie zabudowanym należy wziąć pod uwagę zjawisko wielodrogowości, które polega na tym, że do anteny odbiornika dociera sygnał kilkoma różnymi drogami. Dodatkowo, jeżeli rozważana jest propagacja w sytuacji, gdy jedna ze stron łącza radiowego znajduje się w ruchu należy wziąć pod uwagę niestacjonarność warunków propagacyjnych w trakcie transmisji.

Propagacja występująca w terenie zurbanizowanym określa tłumienie występujące w środowisku zewnętrznym, gdzie anteny umieszczone są na zewnątrz budynków. W kanale radiowym występują trzy fizyczne mechanizmy powodujące trudności w rozchodzenia się fal radiowych w dowolnym propagacyjnym kanale radiowym a zatem i w warunkach łączności miejskiej. Te trzy mechanizmy to odbicia, dyfrakcja i rozproszenie. W środowisku na zewnątrz budynków w warunkach miejskich głównymi przeszkodami są wysokie obiekty w postaci budynków, które mogą być przyczyną powstawania dyfrakcji. Natomiast przeszkody w postaci dużych płaszczyzn będą przyczyną odbić. Źródłem rozprożeń są małe obiekty i nierówności na dużych płaszczyznach, jakimi są dachy, boczne ściany budynków, nawierzchnie ulic i placów. Analiza porównawcza modeli Okumury-Haty, Delisle-Egli oraz Wwiedeńskiego pozwoli oszacować różnicę w określeniu tłumienia wprowadzanego poprzez środowisko wyznaczonego za pomocą każdego z tych modeli.

W sytuacji, gdy przyjmujemy, że antena nadawcza i odbiorcza są antenami izotropowymi tłumienie środowiska propagacyjnego według zależności Wwiedeńskiego można przedstawić w postaci:

$$(4) \quad L = 20 \log h_n + 20 \log h_o - 40 \log r$$

Z wzoru Wwiedeńskiego można korzystać przy spełnieniu określonych warunków:

$$(5) \quad \frac{2\pi h_n h_o}{\lambda d} \leq \frac{d\lambda}{18} \quad \text{lub} \quad h_n h_o \leq \frac{d\lambda}{18}$$

Model propagacyjny Delisle-Egli uwzględnia zjawiska propagacji wielodrogowej, co ma szczególnie istotne znaczenie w warunkach gęstej zabudowy miejskiej. W najprostszym przypadku przy założeniu, że do anteny odbiorczej docierają tylko dwa promienie radiowe można przy pewnych założeniach wyznaczyć teoretyczną zależność opisującą tłumienie:

$$(6) \quad L[\text{dB}] = 40 \lg d - 20 \lg h_b - 20 \lg h_t$$

Analizując powyższą zależność można stwierdzić, że tłumienie wzrasta wraz z odległością bardziej intensywnie niż ma to miejsce w przypadku wolnej przestrzeni. Ponadto wartość tłumienia jest niezależna od częstotliwości propagującej się fali. Na bazie znacznej liczby pomiarów tłumienia propagacyjnego wykonanych w miastach Egli opracował modyfikację zależności, co z kolei Delisle aproksymował do bardziej użytecznej postaci, która przedstawia się następująco:

$$(7) \quad L[\text{dB}] = 40 \lg d + 20 \lg f - 20 \lg h_b + L_a$$

gdzie:

$$(8) \quad L_a[\text{dB}] = \begin{cases} 76,3 - 10 \lg h_t & \text{dla } h_t < 10\text{m} \\ 76,3 - 20 \lg h_t & \text{dla } h_t > 10\text{m} \end{cases}$$

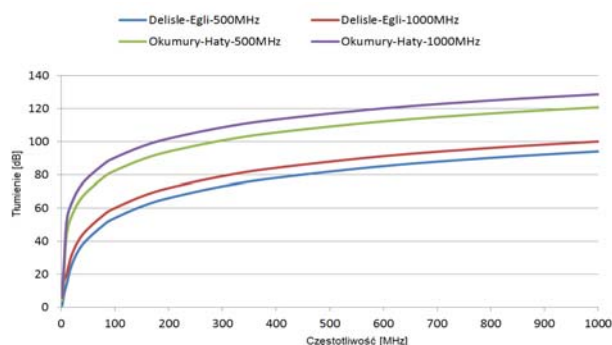
Model Okumury opiera się na danych pomiarowych i praktyczny zakres jego stosowalności powinien zawierać się w granicach zmienności zdefiniowanych parametrów. Dopuszcza się odchylenia od tych danych, jednak należy wtedy dokonać odpowiednich interpolacji.

Opracowane przez Hatę zależności matematyczne do danych pomiarowych Okumury, odnoszą się przede wszystkim do quasi-płaskich terenów miejskich. Podstawową zależność opisującą tłumienie fali w środowisku propagacyjnym. tzw. zależność Haty opisuje zależność:

$$(9) \quad L = 69,55 + 26,19 \log(f) - 13,82 \log(h_n) - s(h_o) + (44,9 - 6,55 \log(h_n)) \log(r)$$

gdzie: f - częstotliwość w [MHz]; h_n - efektywna wysokość zawieszenia anteny nadawczej (źródła sygnału) względem średniego poziomu gruntu w [m]; h_o - efektywna wysokość zawieszenia anteny odbiorczej w [m]; $s(h_o)$ - współczynnik korekcyjny zależny od wysokości anteny odbiornika, gęstości zabudowy i częstotliwości.

Rysunek 3 przedstawiają wyniki symulacji i porównania tłumienia dla dwóch częstotliwości 500 oraz 1000 [MHz].



Rys. 3. Zestawienie tłumienia wyznaczone za pomocą modeli Delisle-Egli oraz Okumura Haty dla częstotliwości 500 oraz 1000MHz

W tabeli 1 przedstawiono natomiast zestawienie tłumienia dla omówionych powyżej modeli propagacyjnych w zależności od odległości od anteny nadawczej.

Tabela 1. Zestawienie wartości tłumienia dla wybranych modeli propagacyjnych dla długości trasy propagacyjnej 2 oraz 4km

Model Propagacyjny	Odległość [km]	Tłumienie [dB]
Okumury-Haty	2	83,96
	4	95,16
Delisle-Egli	2	101,79
	4	113,84
Wwiedeńskiego	2	88,52
	4	100,56

Niezależnie od wybranej odległości największy poziom tłumienia uzyskano dla modelu Delisle-Egli, ponieważ uwzględnia warunki propagacji wielodrogowej dla gęstej zabudowy miejskiej, co wiąże się z występowaniem większego tłumienia. Mała gęstość zabudowania miejskiego modelu Okumury-Haty (wybranie aglomeracji- małe miasto) spowodowała otrzymanie najmniejszego tłumienia względem pozostałych modeli. Model Wwiedeńskiego jest modelem uwzględniającym tylko dwa promienie w swojej propagacji: promień bezpośredni i odbity. Analizując więc wyniki należy zwrócić uwagę na dwupromieniowość modelu, która sprawia że nie są one idealne dla odzwierciedlenia warunków panujących w otaczającym nas środowisku.

Modelowanie tłumienia propagacyjnego wewnątrz budynków

Rozchodzenie fal elektromagnetycznych we wnętrzach budynków jest bezpośrednio powiązane z jego architekturą, na którą składa się przede wszystkim określona liczba ścian i stropów o różnej grubości i wykonana w różnej technologii oraz z różnego materiału zamkniętego w danej przestrzeni. Ponadto na sposób propagacji mają też wpływ elementy wyposażenia znajdujące się w pomieszczeniach. Całość tworzy bardzo trudne do analizy środowisko propagacji fal elektromagnetycznych.

W trakcie analizy środowiska propagacji fal elektromagnetycznych wewnątrz budynków należy uwzględnić wpływ następujących zjawisk i czynników:

- odbicia od ścian i stropów oraz elementów wyposażenia znajdującego się w pomieszczeniach oraz rozproszenie fal na krawędziach tych przedmiotów,
- tłumienie fali podczas przenikania przez ściany i stropy budynku,
- efekt falowodowy, który polega na prowadzeniu fali radiowej w długich pomieszczeniach np. korytarzach,
- obecność i przemieszczanie się ludzi wewnątrz budynku i pomieszczeń.

Przedstawione powyżej czynniki mają wpływ na poziom i rozkład fali radiowej, są przyczyną:

- wzrostu tłumienia i depolaryzacji fali,
- wzrostu zjawiska wielodrogowości.

Ponadto wymienione wyżej czynniki wpływają na czasowe i przestrzenne zmiany rozkładu tłumienia fali radiowej.

Model ITU- P.1238

Podstawowy model propagacyjny zalecany przez ITU-R jest modelem empirycznym, który uwzględnia trzy główne czynniki w trakcie propagacji fali radiowej w pomieszczeniach zamkniętych, mające największy wpływ na jej tłumienie. Zaliczamy do nich:

- długość trasy propagacji d ,
- częstotliwość propagującej się fali f ,
- tłumienie sygnału podczas przechodzenia przez ściany i stropy budynku.

Dwie pierwsze składowe są uwzględniane w większości modeli propagacyjnych i ich obecność jest stosunkowo oczywista. Natomiast ostatni czynnik związany jest ze specyfiką propagacyjną, z jaką mamy do czynienia w wielokondygnacyjnym, przedzielonym ścianami środowisku wewnątrzbudynkowym.

Tłumienie pomiędzy źródłem sygnału a anteną odbiorczą określona jest zależnością:

$$(10) \quad L [dB] = 20 \log f + N \log d + L_f(n) - 28$$

gdzie: L – tłumienie propagacyjne pomiędzy antenami [dB]
 f – częstotliwość pracy systemu [MHz], N – odległościowy współczynnik tłumienia określony eksperymentalnie, zależy od właściwości materiałowych ścian i stropów budynków, d – odległość pomiędzy antenami [m] ($d > 1m$), L_f – współczynnik tłumienia stropów [dB], n – liczba pięter pomiędzy urządzeniami.

Zestawienie wartości współczynnika N oraz L_f przedstawiono odpowiednio w tabelach 3 i 4.

Tabela 2. Wartości odległościowego współczynnika tłumienia N zalecane przez ITU-T

Częstotliwość	Bud. mieszkalny	Bud. biurowy	Bud. komercyjny
900MHz	-	32	20
1,2-1,3GHz	-	33	22
1,8-2GHz	28	30	22
4GHz	-	28	22
5,2GHz	-	31	-
60GHz	-	22	17
70GHz	-	22	-

Składnik $L_f(n)$ w zależności (10) występuje w sytuacji, gdy pomiędzy źródłem sygnału a anteną odbiorczą występują stropy.

Składnik ten zależy od właściwości materiałowych stropów oraz ilości stropów na drodze fali radiowej pomiędzy anteną nadawczą a anteną odbiorczą.

Tabela 3. Wartości współczynnika tłumienia stropów zalecane przez ITU-T

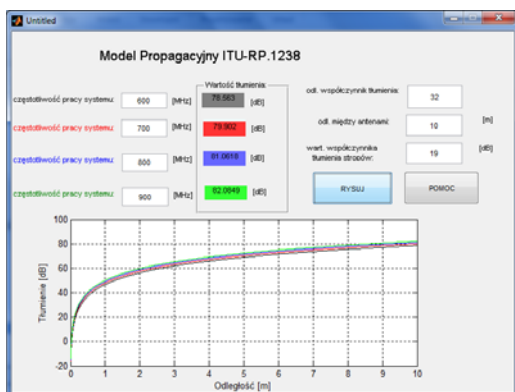
Częstotliwość	Bud. mieszkalny	Bud. biurowy	Bud. Komercyjny (hale fabryczne)
900MHz	-	9 (1 piętro) 19 (2 piętra) 24 (3 piętra)	-
1,8-2GHz	4n	15 + 4(n - 1)	6 + 3(n - 1)
5,2GHz	-	16 (1 piętro)	-

Tabela 3. Zestawienie wartości tłumienia wyznaczonego za pomocą modelu ITU-R P.1238 dla wybranych odległości i częstotliwości dla parametrów przedstawionych na rysunku 4

Model Propagacyjny	Odległość [m]	Częstotliwość [MHz]	Tłumienie [dB]
ITU-R P.1238	10	600	78,56
		700	79,90
		800	81,06
		900	82,08
	15	600	84,19
		700	85,53
		800	86,69
		900	87,71

Uwzględniając aspekt statystyczny opisywanych zjawisk propagacyjnych można przyjąć, że wartość standardowej dewiacji poziomu sygnału radiowego na trasie propagacji tego sygnału w pomieszczeniach biurowych przy częstotliwościach z zakresu 1,8-2GHz może się zmieniać w granicach 8-10dB. Model zaproponowany przez ITU-T

przeznaczony jest dla systemów pracujących na częstotliwości 900 MHz i wyżej, przy czym dla częstotliwości 60 i 70 GHz zakres stosowania ogranicza się do jednego pomieszczenia lub do 100 m.



Rys. 4. Widok okna opracowanej aplikacji do wyznaczania tłumienia za pomocą ITU-r P.1238

Model Montleja-Keana

Model ten przeznaczony jest do analizy komunikacji pomiędzy kondygnacjami wewnątrz budynku. Uwzględnia on przede wszystkim obecność stropów na drodze propagacji fal radiowych.

Tabela 4. Przykładowe wartości parametru n dla modeli wewnątrz budynku.

f [GHz]	n	Zastosowanie
2,40	4,5	Wnętrza z dużą gęstością użytkowników i przedmiotów (A)
2,40	3,5	Budynki biurowe i mieszkalne (B)
2,40	2	Duże puste pomieszczenia (C)
2,40	1,2	Korytarze

Jest to rozwinięcie modelu jednościeżkowego o składnik uwzględniający tłumienie sygnału radiowego podczas przechodzenia przez stropy budynku. W modelu tym tłumienie sygnału radiowego można przedstawić za pomocą zależności:

$$(11) \quad L_{M-K} [dB] = L(d_0) \cdot 10n \lg d + n_f \cdot L_f$$

gdzie: $L(d_0)$ – tłumienie pomierzone w umownej odległości d_0 [m] – najczęściej przyjmuje się $d_0=1m$, n – indeks odległościowego spadku mocy sygnału radiowego, n_f – liczba stropów, przez które przechodzi fala radiowa od źródła sygnału (anteny nadawczej) do anteny odbiorczej, L_f – tłumienie pojedynczego stropu

Jest to model bardziej uniwersalny od modelu jednościeżkowego oraz modelu liniowego, jednakże w nim również nie uwzględnia się rozkładu i specyfiki wyposażenia określonych pomieszczeń.

Tabela 5. Zestawienie wartości tłumienia wyznaczonego za pomocą modeli: liniowego oraz Motleja-Keenana

Model Propagacyjny	Odległość [m]	Częstotliwość [MHz]	Tłumienie [dB]
Liniowy	10	900	51,6
		1800	57,6
		2100	58,9
		2400	60,96
	20	900	57,56
		1800	63,58
		2100	64,92
		2400	66,08
Motleja-Keenana	10	2400	53,00
	20	2400	65,16

Wyniki wartości tłumienia uzyskiwane za pomocą powyższych modeli są stosunkowo zbieżne.

PODSUMOWANIE

Istnieje znaczna grupa modeli propagacyjnych przeznaczonych do wyznaczania tłumienia trasy fali radiowej lub określania natężenia pola elektromagnetycznego w określonej od anteny nadawnika sygnału radiowego. W zależności od miejsca propagacji sygnału wykorzystuje się inną grupę modeli propagacyjnych. Modele propagacyjne dzielimy na przeznaczone do analizy tłumienia wewnątrz budynków oraz w środowisku miejskim (na zewnątrz budynków). Większość z przedstawionych modeli propagacyjnych ma pewne ograniczenia stosowalności, np. ze względu na zakres częstotliwości lub też odległości pomiędzy anteną nadawczą a odbiorczą. Istnieje również możliwość wyznaczenia tłumienności określonej trasy przy wykorzystaniu kilku modeli i porównanie uzyskanych wartości tłumienności ze sobą. Główną trudnością i najważniejszym elementem w procesie wyznaczania tłumienności tras z wykorzystaniem modeli propagacyjnych jest odpowiedni i umiejętny dobór określonego modelu propagacyjnego odpowiednio do analizowanej sytuacji. W przypadku nieoptymalnego wyboru wyznaczona wartość tłumienia trasy może różnić się o kilka a nawet kilkanaście dB w stosunku do wartości pomierzonej.

Projekt jest finansowany ze środków NCBiR w ramach umowy NR 0024/R/ID2/2012/02 w latach 2012-2015.

REFERENCES

- [1] Katulski R, Propagacja fal radiowych, WKŁ 2009
- [2] Recommendation ITU-R P.1238-7(02/2012)- Propagation data and prediction methods for planning of indoor radio communications system...
- [3] Piwowarczyk K, Przesmycki R, Nowosielski; Procedure for absorption measurements of absorbing materials Przegląd Elektrotechniczny str. 4-6(2/2012): ISSN 33-35 2012
- [4] R.J.Katulski, A.Lipka, K.Turek, badania rozkładu mocy sygnału radiowego w sieciach WLAN, KKRRiT, Poznań 2006
- [5] S. Hausman, Modelowanie propagacji fal radiowych do projektowania naziemnych systemów łączności bezprzewodowej, Zeszyty Naukowe politechniki Łódzkiej, nr 1009,2007
- [6] A. Charytoniuk, badania propagacyjne łączności WLAN wewnątrz budynku, KKRRiT, Poznań 2006
- [7] ITU-R.P1238-5:Propagations data and predictions methods for planning of indoor radiocommunications system and radio local area network in frequency range900MHz to 100GHz,2/2007

Autorzy: dr inż. Marek Bugaj, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, E-mail: mbugaj@wat.edu.pl, prof. dr hab. inż. Marian Wnuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, E-mail: mwnuk@wat.edu.pl