

dr inż. Sławomir Hausman

Bezprzewodowe sieci telekomunikacyjne: Analiza propagacyjna

Zadanie nr 14 – Studia podyplomowe „Bezprzewodowe systemy nadzoru i monitorowania”



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Prezentacja multimedialna
współfinansowana przez Unię Europejską
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego
w projekcie

*„Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń
– zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej –
zarządzanie Uczelnią,
nowoczesna oferta edukacyjna
i wzmacniania zdolności do zatrudniania
osób niepełnosprawnych”*



Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

90-924 Łódź, ul. Żeromskiego 116,
tel. 042 631 28 83
www.kapitalludzki.p.lodz.pl



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Prezentacja multimedialna współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Wprowadzenie

- Przełom XX i XXI wieku przyniósł gwałtowny i zauważalny dla niemal każdego mieszkańca Ziemi rozwój systemów łączności bezprzewodowej.
- Różne etapy projektowania, planowania i wdrażania takich systemów wymagają skutecznych narzędzi do modelowania propagacji fal radiowych.
- Modele propagacji muszą rozwijać się wraz z kolejnymi generacjami systemów (nowe zakresy częstotliwości, nowe środowiska propagacji).

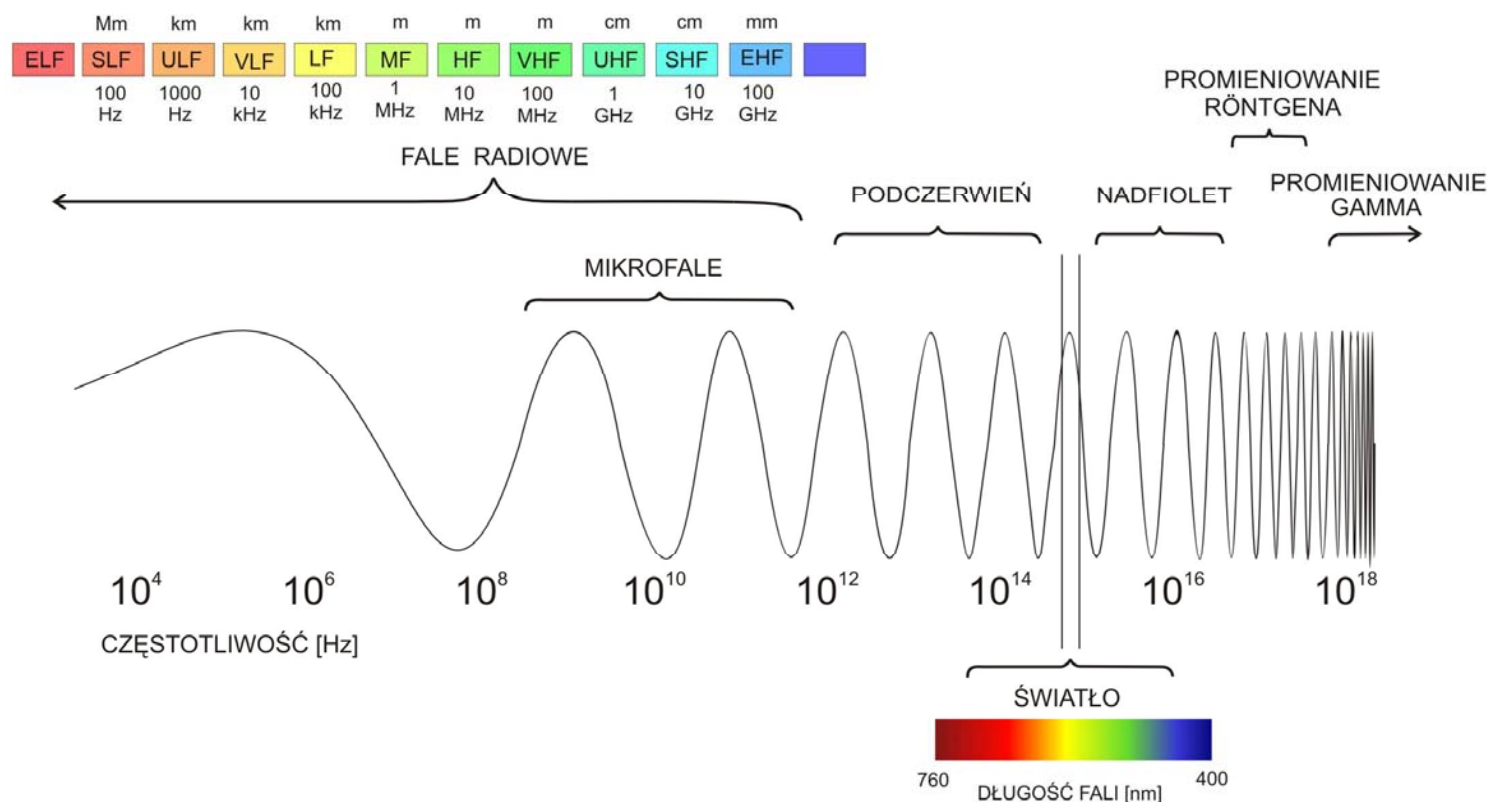


Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

*Bezprzewodowe sieci telekomunikacyjne:
Analiza propagacyjna*



Widmo fal elektromagnetycznych



Międzynarodowa Unia Telekomunikacyjna w 1947 r. uznała za górną granicę pasma fal radiowych częstotliwość 3 000 GHz





Dekadowy podział widma częstotliwości radiowych wg ITU

Oznaczenie Pasma	Nr pasma ITU	Zakres częstotliwości fal i jego nazwa	Długość fali	Przykłady wykorzystania
ELF	1	3–30 Hz	100.000 – 10.000 km	komunikacja podwodna
SLF	2	30–300 Hz	10.000 – 1000 km	komunikacja podwodna
ULF	3	300–3000 Hz	1000 – 100 km	komunikacja kopalniana
VLF	4	3–30 kHz (myriametrowe)	100 – 10 km	komunikacja podwodna
LF	5	30–300 kHz (kilometrowe)	10 – 1 km	transmisja wzorców czasu (np. DCF77)
MF	6	300–3000 kHz (hektometrowe)	1000 – 100 m	radiofonia analogowa i cyfrowa (DRM)
HF	7	3–30 MHz (dekametrowe)	100 – 10 m	radiofonia analogowa i cyfrowa (DRM)
VHF	8	30–300 MHz (metrowe)	10 – 1 m	telewizja analogowa i cyfrowa (DVB), radiofonia analogowa i cyfrowa (DRM+), systemy łączności dyspozytorskiej
UHF	9	300–3000 MHz (decymetrowe)	100 – 10 cm	telewizja analogowa i cyfrowa (DVB), TETRA, GSM 900 i GSM 1800, UMTS, ISM, WLAN, GPS, T-DAB
SHF	10	3–30 GHz (centymetrowe)	10 – 1 cm	Linie radiowe, WLAN, WiMAX, radiodyfuzja satelitarna
EHF	11	30–300 GHz (milimetrowe)	10 – 1 mm	beprzewodowa pętla abonencka
		300–3000 GHz (decymilimetrowe)	1 – 0,1 mm	beprzewodowa pętla abonencka





Obliczenia z wykorzystaniem decybeli

Decybel jest logarytmiczną miarą stosunku dwóch mocy:

$$10 \cdot \log_{10}(\text{stosunek mocy})$$

Jeśli mamy np. dwie moce $P_0 = 1\text{ W}$ i $P_1 = 1000\text{ W}$, to to możemy obliczyć stosunek P_1/P_0

$$10 \cdot \log_{10}(P_1/P_0) = 10 \cdot \log_{10}(1000) = 10 \cdot 3 = 30\text{ dB}$$

Można też obliczyć stosunek odwrotny P_0/P_1

$$10 \cdot \log_{10}(P_0/P_1) = 10 \cdot \log_{10}(1/1000) = 10 \cdot (-3) = -30\text{ dB}$$





Obliczenia z wykorzystaniem decybeli

Jeśli za moc odniesienia wybierzemy 1 W, to otrzymujemy jednostkę dBW

$$P[\text{dBW}] = 10 \cdot \log_{10}(P [W] / 1 W)$$

Np. dla mocy $P_1 = 10 W$

$$10 \cdot \log_{10}(P_1 / 1 W) = 10 \cdot \log_{10}(10) = 10 \cdot 1 = 10 \text{ dBW}$$

Jeśli za moc odniesienia wybierzemy 1 mW, to otrzymujemy jednostkę dBm.

Przykład: dla mocy $P_1 = 10 W = 10000 \text{ mW}$, otrzymujemy

$$10 \cdot \log_{10}(P_1 [\text{mW}] / 1 \text{ mW}) = 10 \cdot \log_{10}(10000 \text{ mW} / 1 \text{ mW}) = 10 \cdot 4 = 40 \text{ dBm}$$





Obliczenia z wykorzystaniem decybeli

Dla rezystora liniowego moc jest wprost proporcjonalna do kwadratu napięcia

$$P=U \cdot I = U \cdot U/R = U^2/R$$

wówczas

$$\begin{aligned} 10 \cdot \log_{10}(P_I / P_0) &= 10 \cdot \log_{10}((U_I^2/R)/(U_0^2/R)) = 10 \cdot \log_{10}(U_I^2/U_0^2) = \\ &= 10 \cdot \log_{10}(U_I/U_0)^2 = 20 \cdot \log_{10}(U_I/U_0) \end{aligned}$$

W radiokomunikacji często używa się jednostki napięcia dBμV

$$P[\text{dB}\mu\text{V}] = 20 \cdot \log_{10}(U [\mu\text{V}] / 1 \mu\text{V})$$





Obliczenia z wykorzystaniem decybeli

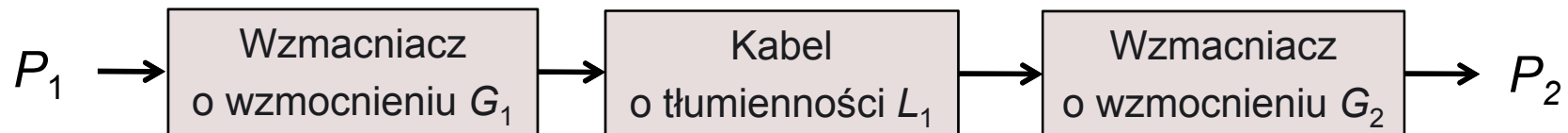
Często używaną jednostką natężenia pola jest $\text{dB}\mu\text{V/m}$

$$E[\text{dB}\mu\text{V/m}] = 20\log_{10}(E[\mu\text{V/m}] / 1\mu\text{V/m}),$$

Jedną z ważnych cech miary decybelowej wynika z tego, że

$$\log(A \cdot B \cdot C \cdot \dots) = \log(A) + \log(B) + \log(C) + \dots$$

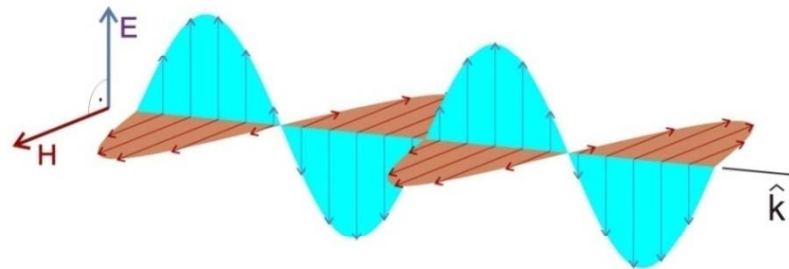
Przykład:



$$P_2[\text{dBW}] = P_1[\text{dBW}] + G_1[\text{dB}] - L_1[\text{dB}] + G_2[\text{dB}]$$



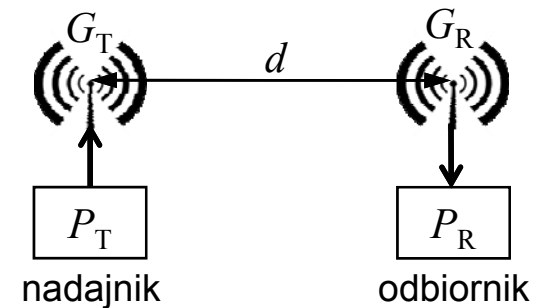
Propagacja w wolnej przestrzeni (1)



Fala TEM (ang. *Transversal ElectroMagnetic*) - polaryzacja liniowa, ośrodek bezstratny (składowe H oraz E mają tę samą fazę)

W wolnej przestrzeni obowiązuje wzór Friisa (1946 r.)

$$P_R = P_T G_T G_R \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2}$$



P_R – moc odebrana przez antenę odbiorczą, P_T - moc wypromieniowana z anteny nadawczej, G_T i G_R - zyski anten, d - odległość między antenami, λ - długość fali



Propagacja w wolnej przestrzeni (2)

Wzór Friisa można zapisać używając miary decybelowej

$$P_R = P_T + G_T + G_R + L_F$$

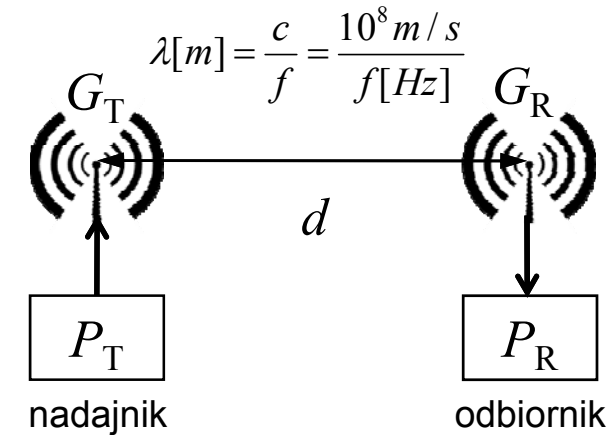
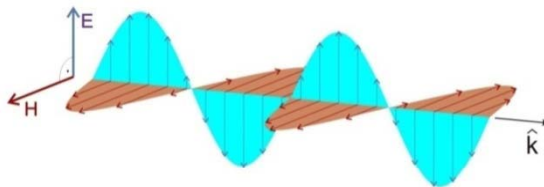
P_R, P_T, G_T, G_R są wyrażone w decybelach; L_F – tłumienność wolnej przestrzeni w dB;

$$L_F = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 32.5 + 20 \log f [MHz] + 20 \log d [km]$$

Tłumienność wolnej przestrzeni wynika wyłącznie ze zmniejszania się powierzchniowej gęstości mocy z kwadratem odległości od anteny nadawczej. Nie następuje żadna strata mocy fali elektromagnetycznej.



Propagacja w wolnej przestrzeni (3)



Zestawienie ważniejszych zależności propagacyjnych w wolnej przestrzeni

Moc odebrana	Tłumienność wolnej przestrzeni *	Natężenie pola przy znanej mocy źródła	Gęstość mocy przy znanej mocy źródła	Impedancja właściwa próżni	Gęstość mocy przy znanym natężeniu pola
$P_R = P_T G_T G_R \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2}$	$L_0 = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2}$	$E = \frac{\sqrt{30 P_T G_T}}{d}$	$S = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi d^2}$	$Z_0 = E/H = 120\pi \approx 377 \Omega$	$S = \frac{E^2}{Z_0}$

*) W wolnej przestrzeni nie ma strat mocy. Tłumienność wynika wyłącznie ze zmniejszania się powierzchniowej gęstości mocy z odległością.



Propagacja w wolnej przestrzeni (4)

Zysk anteny G i jej skuteczna powierzchnia A_e są ze sobą związane wzorem

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi f^2 A_e}{c^2} \Rightarrow A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$$

$c = 3 \cdot 10^8$ m/s – prędkość światła

G oznacza zysk w stosunku do anteny izotropowej (zysk anteny izotropowej $G = 1$).

$$A_{e(\text{izotropowa})} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \approx 0,08\lambda^2$$

Znając skuteczną powierzchnię A_{eR} anteny odbiorczej oraz powierzchniową gęstość mocy S pola elektromagnetycznego otaczającego tę antenę, można wyznaczyć moc odebraną P_R

$$P_R = A_{eR} S = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} S$$





Propagacja w wolnej przestrzeni (5)

Przykład: Antena nadawcza o zysku $G_T = 8$ dBi promieniuje moc $P_T = 10$ mW. Częstotliwość fali $f = 2,4$ GHz. Obliczyć powierzchniową gęstość mocy w odległości $d = 100$ m od anteny nadawczej oraz moc odebraną P_R przez antenę odbiorczą o zysku $G_R = 5$ dBi.

Możemy przeliczyć zysk anteny z miary logarytmicznej na liniową $G_{dB} = 10 \log(G) \Rightarrow G = 10^{\frac{G_{dB}}{10}}$

$$G_T = 10^{\frac{8}{10}} \approx 6,3 \quad S = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi d^2} = \frac{0,01W \cdot 6,3}{4\pi(100)^2} = 5 \cdot 10^{-7} W / m^2 \quad P_R = S \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} = 5 \cdot 10^{-7} \frac{3,2 \cdot (0,125)^2}{4\pi} \approx 2 \cdot 10^{-9} W$$

Podobnie można wykonać obliczenia w dB.

$$S[dBW / m^2] = 10 \log(P_T \cdot G_T) - 20 \log(d) - 10 \log(4\pi) \approx P_T + G_T - 11 - 20 \log(d)$$

$$S[dBW / m^2] = -20dBW + 8 - 11 - 40 = -63dBW / m^2$$

$$S[W / m^2] = 10^{\frac{S[dBW / m^2]}{10}} = 10^{\frac{-63}{10}} \approx 5 \cdot 10^{-7} W / m^2$$

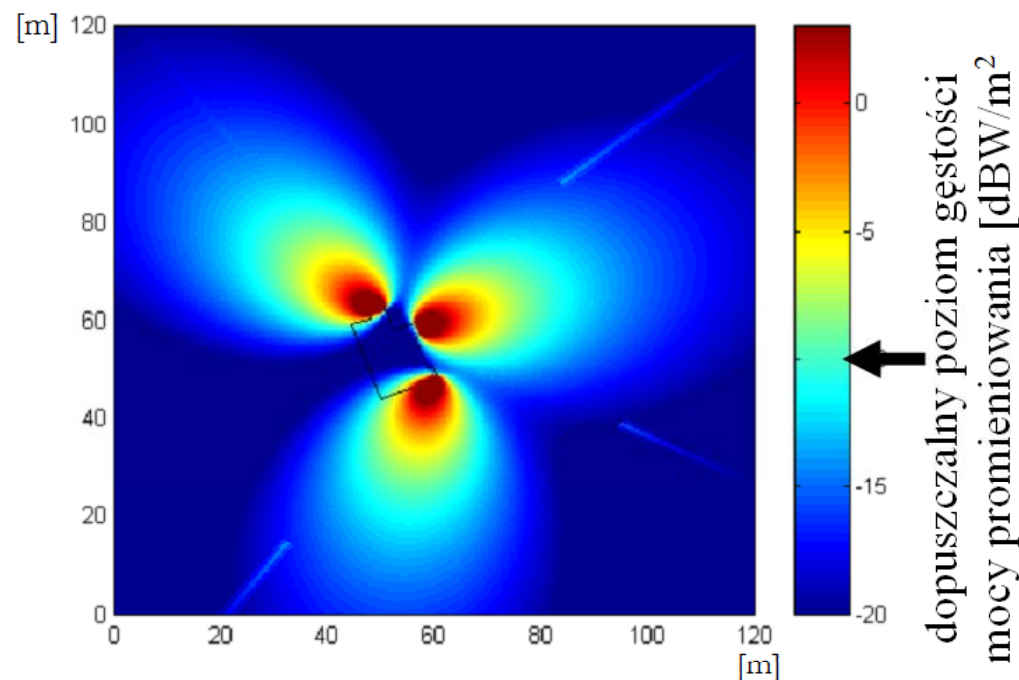
$$P_R[dBW] = S[dBW / m^2] + G_R[dBi] + 20 \log(\lambda) - 10 \log(4\pi) \approx S + G_R + 20 \log(\lambda) - 11$$

$$P_R[dBW] = -63 + 5 - 18 - 11 = -87dBW \Rightarrow P_R \approx 2 \cdot 10^{-9} W$$



Propagacja w wolnej przestrzeni (6)

Propagacja w wolnej przestrzeni: Przykład zastosowania wzoru Friisa [Friis 1946]



$$P_R = P_T G_T G_R \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2}$$

zyski anten G_T i G_R
(odniesione do anteny
izotropowej)

długości fali λ

odległości między
antenami d

Rozkład wynikowy gęstości mocy [dBW/m²] dla systemu 6 anten jednej ze stacji bazowych systemu UMTS w centrum Łodzi. Widoczne są także wiązki promieniowania anten radioliniowych



Propagacja w warunkach ziemskich: Podstawowe zjawiska fizyczne

W radiokomunikacji lądowej największy wpływ na rozprzestrzenianie się fal radiowych ma Ziemia i jej atmosfera. Do najważniejszych zjawisk fizycznych należą tu:

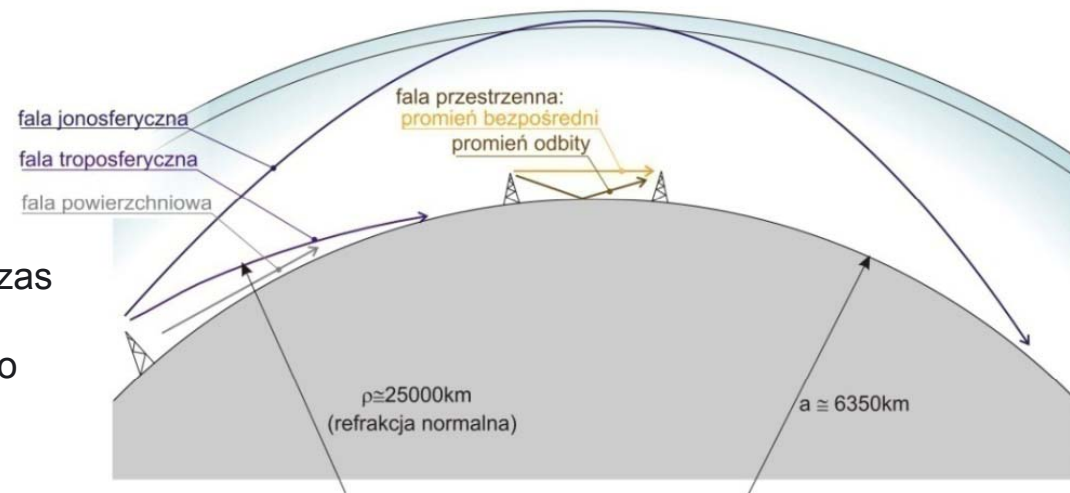
- zmniejszanie się powierzchniowej gęstości mocy wynikające z rozprzestrzeniania się fali,
- tłumienie atmosferyczne, zwłaszcza dla częstotliwości odpowiadających prążkom absorpcyjnym O_2 i H_2O ,
- odbicie od powierzchni Ziemi,
- refrakcja w troposferze,
- dyfrakcja na krzywiznie Ziemi,
- odbicie jonosferyczne,
- odbicia od przeszkód znajdujących się na drodze propagacji,
- dyfrakcja na przeszkodach (np. na krawędziach ścian i dachów),
- rozpraszanie, np. na roślinności.



Propagacja w warunkach ziemskich

Wśród fal radiowych występujących w otoczeniu Ziemi można wyróżnić:

- Fale troposferyczne, docierające do odbiornika dzięki refrakcji w troposferze (wartości parametrów troposfery są zmienne – zależą od czasu i miejsca);
- Fale jonosferyczne (fale odbite w kierunku Ziemi od jonosfery i fale rozchodzące się w przestrzeni ograniczonej powierzchnią Ziemi i dolną granicą jonosfery);
- Fale przyziemne, rozchodzące się w pobliżu powierzchni Ziemi, które można podzielić na:
 - fale powierzchniowe, wytwarzane przez anteny umieszczone bezpośrednio na powierzchni Ziemi i rozchodzące się wzdłuż tej powierzchni;
 - fale przestrzenne, powstające wówczas gdy anteny umieszczone są na tyle wysoko nad powierzchnią Ziemi, że do odbiornika dociera składowa bezpośrednia i odbita od powierzchni Ziemi.

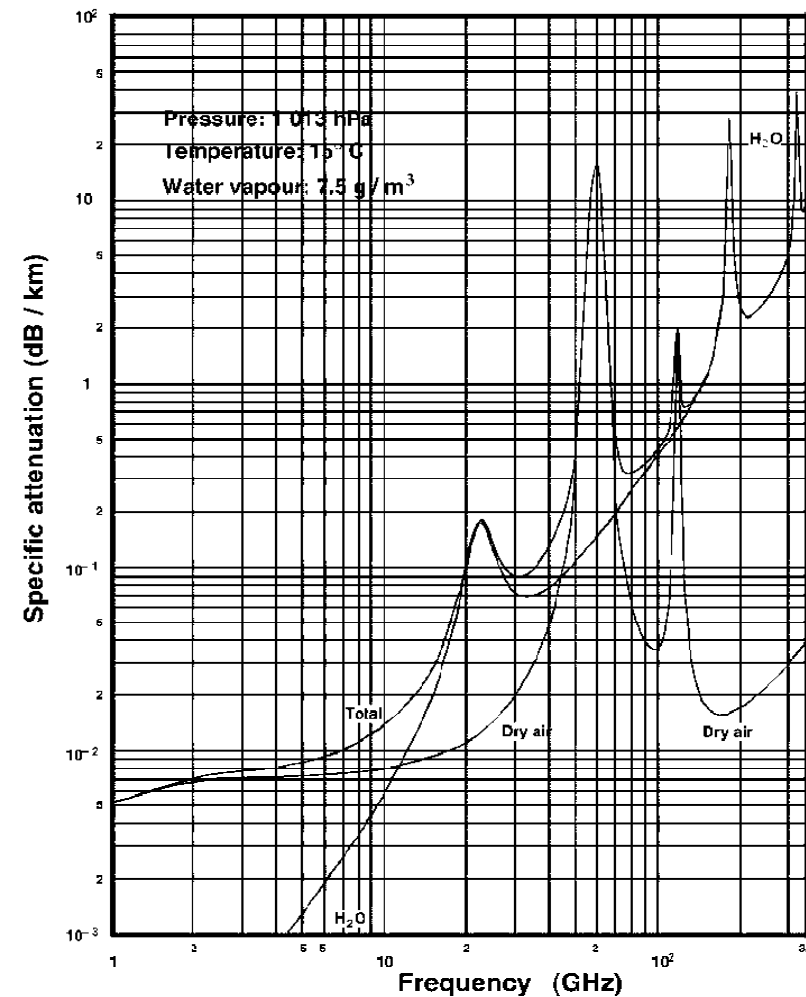




Propagacja w warunkach ziemskich: Tłumienność atmosferyczna

Tłumienność właściwa fal elektromagnetycznych w atmosferze [ITU-R P.676]

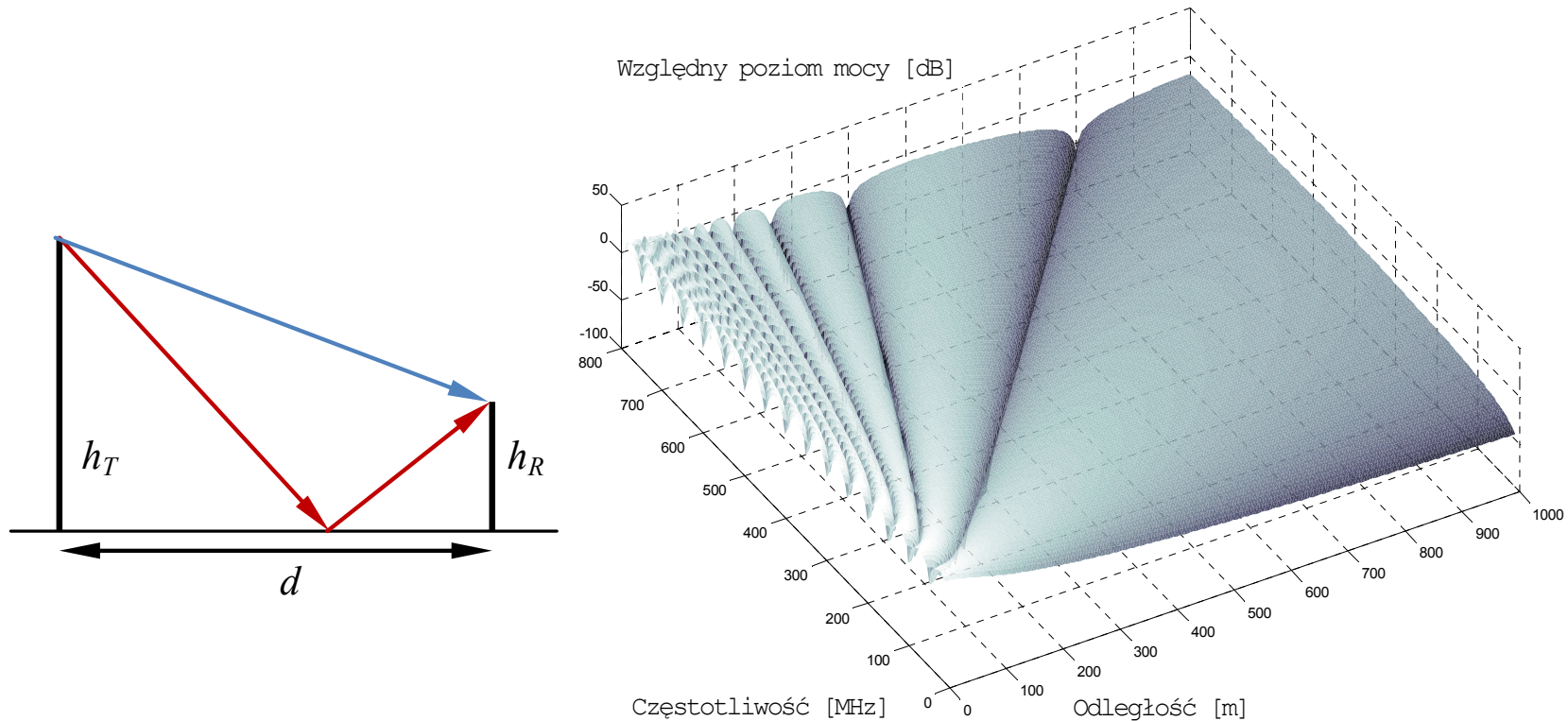
Przykład: dla systemu GSM (pasma 900 i 1800 MHz), w którym maksymalny zasięg stacji bazowej to 35 km (ograniczony maksymalną wartości czasu wyprzedzenia TA – ang. Timing Advance), można obliczyć tłumienność związaną z absorpcją na krańcu tego zasięgu, która wynosi tylko ok. 0,25 dB. Jest to wartość pomijalnie mała w porównaniu z wartością całkowitej tłumienności rzędu 90 dB.



*Bezprzewodowe sieci telekomunikacyjne:
Analiza propagacyjna*



Propagacja w warunkach ziemskich: Fala przestrzenna



Propagacja przyziemna przedhoryzontowa: Przykład zależność natężenia pola od odległości i częstotliwości, przy $h_T = 50$ m, $h_R = 3$ m



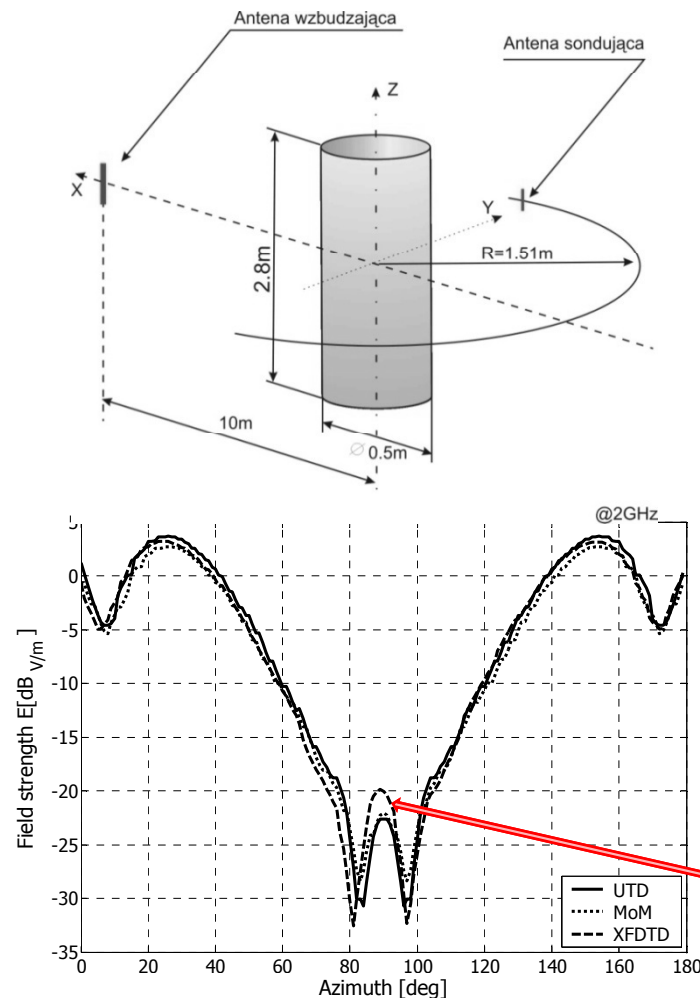
Dyfrakcja

Termin dyfrakcja (łac. *diffractus* od *diffringere* – rozłamać się na kawałki) wprowadził włoski jezuita Francesco Maria Grimaldi w swoim dziele *De Lumine* w 1665 r. Grimaldi obserwował zjawisko dyfrakcji światła na przegrodach z otworami.

Dyfrakcja to zjawisko polegające na powstaniu wtórnego pola elektromagnetycznego spowodowanego wprowadzeniem w przestrzeń propagacji przeszkody np. przewodnika. Dzięki dyfrakcji możliwa jest czasami łączność poza obszarami bezpośredniej widzialności anten nadajnika i odbiornika np. za przeszkodą.



Dyfrakcja: Przykład dla walca



Układ pomiarowy w komorze bezechowej: w środku widoczny jest miedziany walec przewodzący umieszczony na stole obrotowym. po lewej stronie antena odbiorcza. Antena nadawcza zlokalizowana jest w pobliżu obiektu, którym wykonano zdjęcie.

Gdy obie anteny i walec znajdują się w jednej linii (kąt obrotu stołu 90°), widać wyraźnie efekt dyfrakcji.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Prezentacja multimedialna współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Propagacja w warunkach ziemskich: Złożone środowiska



Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

*Bezprzewodowe sieci telekomunikacyjne:
Analiza propagacyjna*



Środowiska propagacji w warunkach ziemskich

W większości przypadków środowisko jest zbyt złożone, aby możliwe było zastosowanie równań Maxwella do modelowania propagacji fal radiowych.

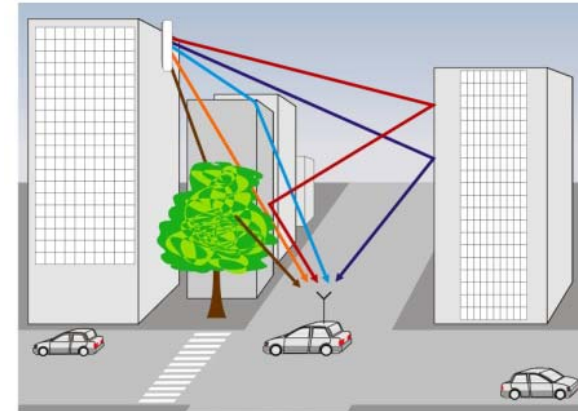
W takich sytuacjach konieczne jest uproszczenie opisu środowiska i najczęściej także zastosowanie upraszczających założeń przy korzystaniu z równań Maxwella (np. metody wielko- i małoczęstotliwościowe).

Stosowane są również modele empiryczne wykorzystujące bardzo uproszczony opis środowiska. Modele takie powstają przy użyciu metod regresji.

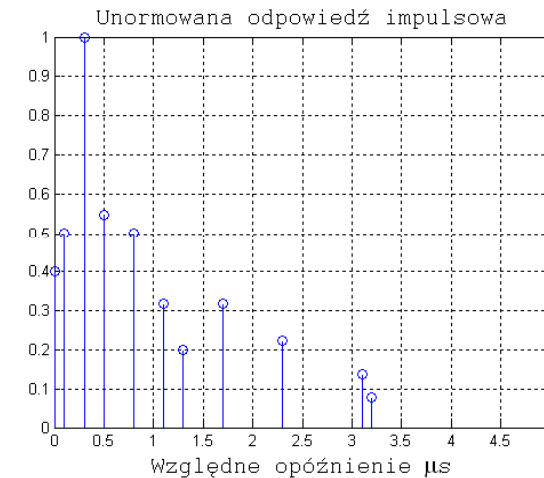
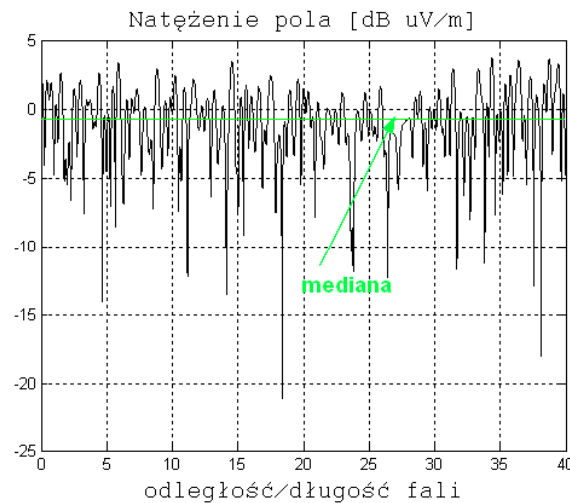


Propagacja wielodrogowa

Rzeczywiste środowiska propagacji są bardzo złożone.



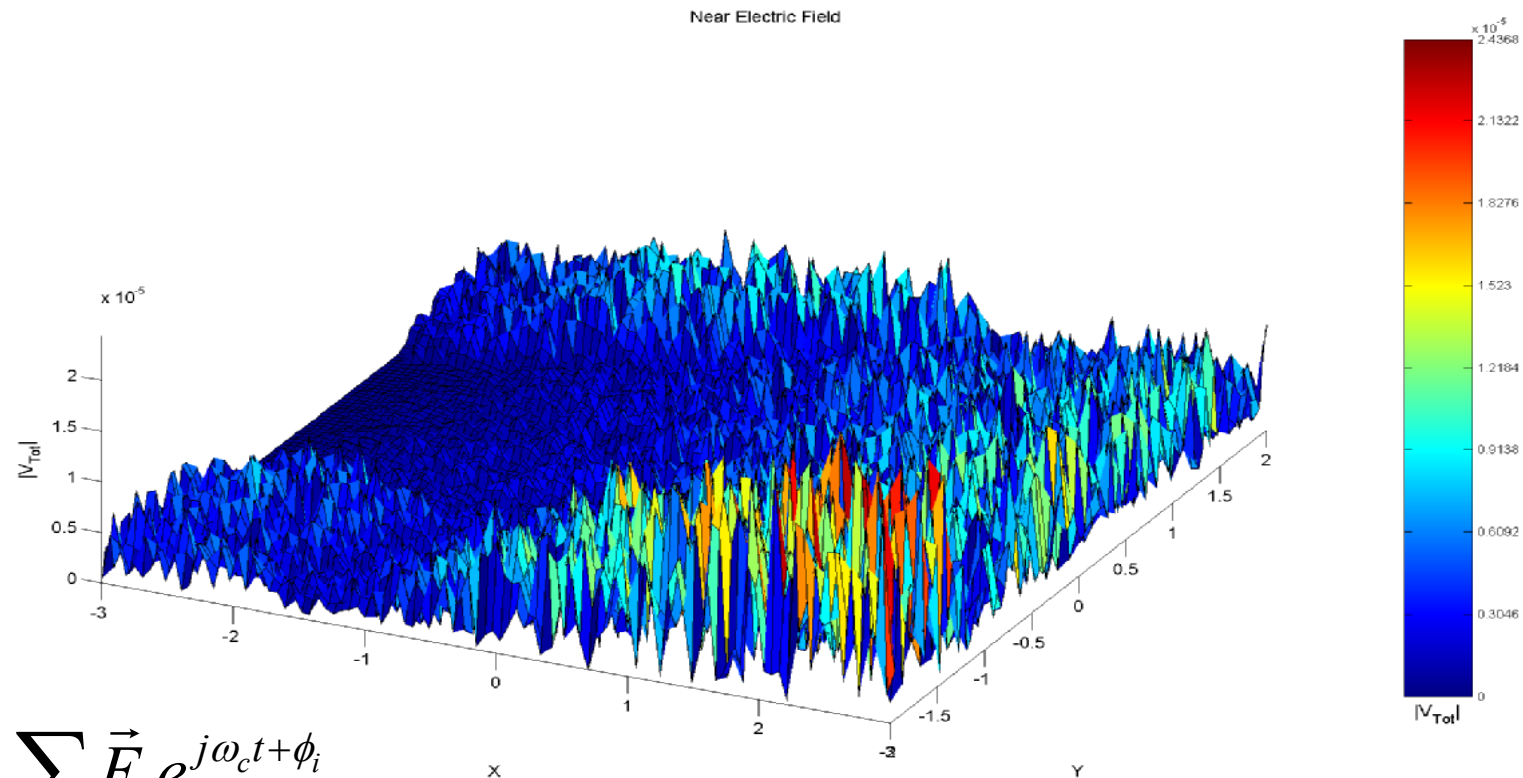
- promień dwukrotnie odbity
- promień odbity
- promień bezpośredni
- promień ugięty
- promień rozproszony



Ilustracja wpływu propagacji wielodrogowej na parametry kanału w przykładowym systemie łączności naziemnej ruchomej



Zaniki pola spowodowane propagacją wielodrogową



$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i e^{j\omega_c t + \phi_i}$$

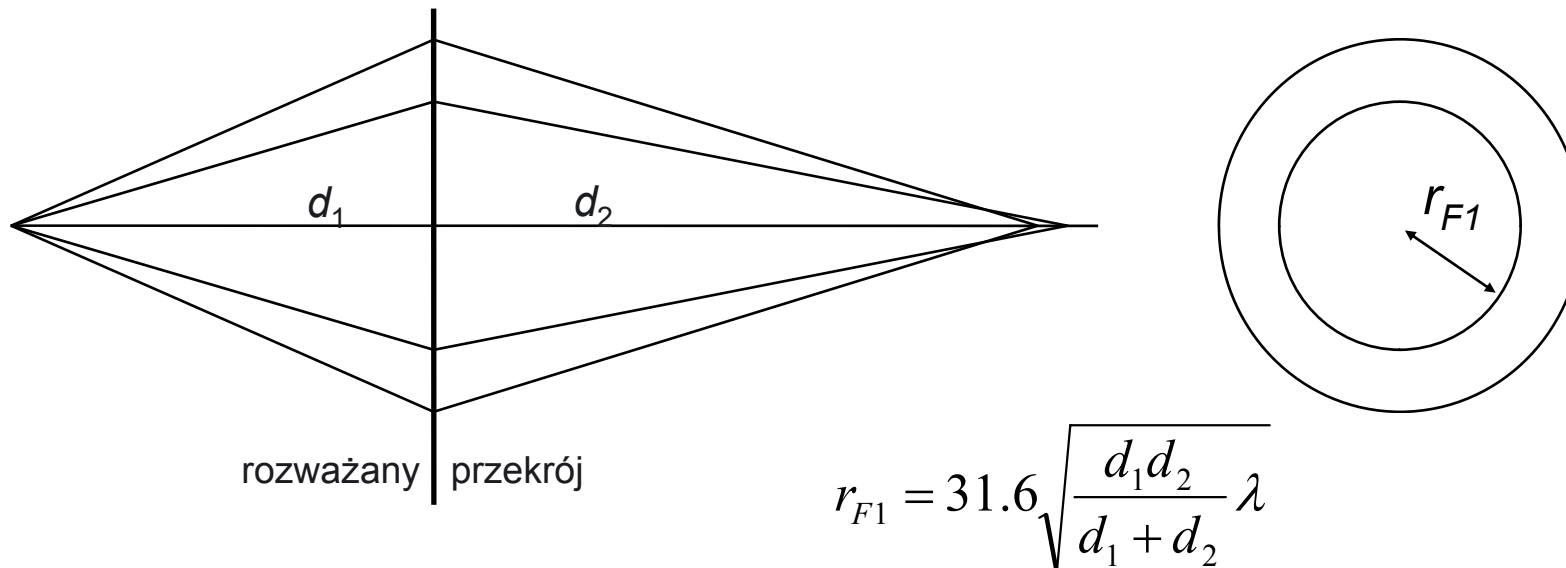
Pole wypadkowe jest sumą
geometryczną pól
składowych

Symulowany rozkład natężenia pola w
pomieszczeniu



Propagacja w terenie otwartym: Strefa Fresnela (1)

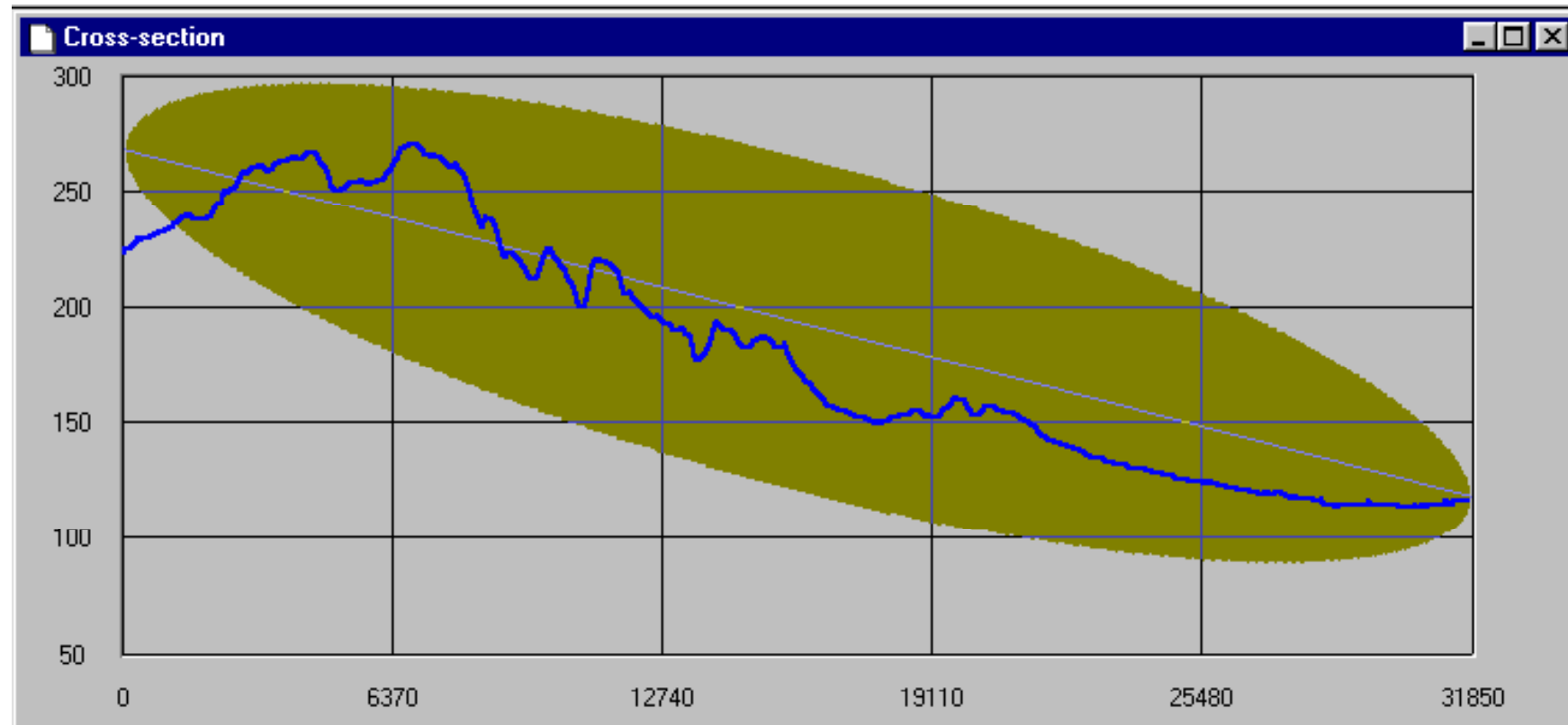
Strefy Fresnela to przestrzenie między współśrodkowymi elipsoidami obrotowymi, wewnątrz których faza pola zmienia się co najwyżej o 180° . Anteny znajdują się w ogniskach tych elipsoid.



Znaczący wpływ dyfrakcji wystąpi, gdy przeszkoda znajdzie się w pierwszej strefie Fresnela, której promień r_{F1} [m], w zależności od odległości do nadajnika d_1 [km] i do odbiornika d_2 [km] oraz długości fali λ [m].



Propagacja w terenie otwartym: Strefa Fresnela (2)



Strefa Fresnela na tle profilu terenu Łódź – Głowno, $\lambda=0.7\text{m}$





Model propagacji

funkcja lub zbiór funkcji, których

- **argumentami** są parametry źródła fali (np. częstotliwość, charakterystyka promieniowania, moc) oraz środowiska propagacji (np. przenikalność elektryczna, konduktywność i geometria obiektów), a
- **wartościami** parametry pola (np. natężenie pola, polaryzacja) lub sygnału odebranego (np. moc) w wybranych punktach przestrzeni.

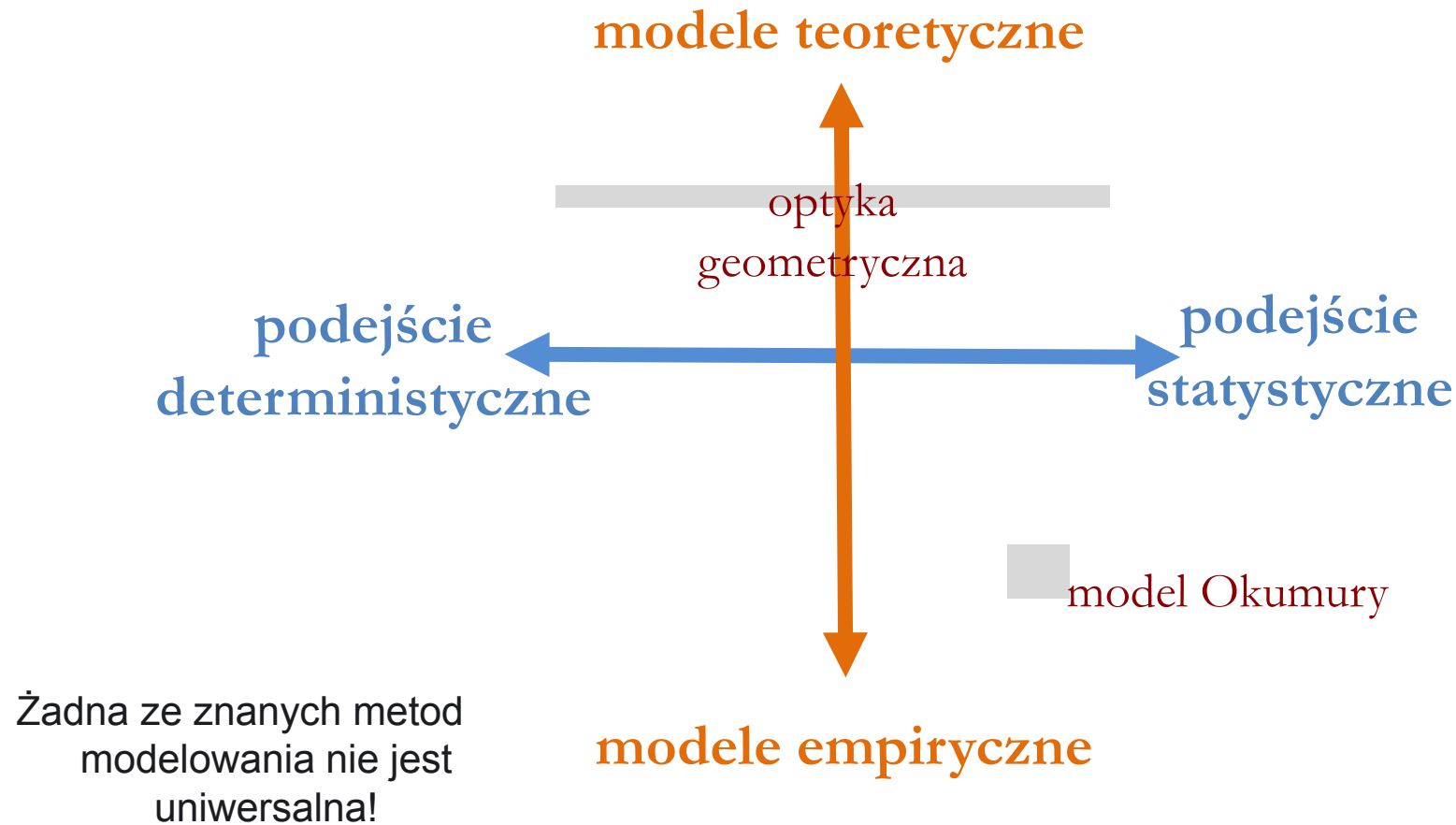
Przykład (wzór Friisa):

$$P_R = P_T G_T G_R \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2}$$





Klasyfikacja modeli propagacji





Modele empiryczne

- niewielki nakład obliczeniowy (Okumura, ITU-R P. 1546, ...),
- wykorzystanie mało szczegółowych map cyfrowych (informacje o ukształtowaniu terenu i jakościowej charakterystyce zabudowy),
- trudna do przewidzenia dokładność dla nowych środowisk,
- konieczność badania przydatności, np. w innych warunkach klimatycznych, dla innego rodzaju budownictwa, ...





Model ITU-R 370 / ITU-R P.1546 (1)

Podaje w formie graficznej zależność między odległością od nadajnika a kwantylami natężenia pola. Metodę opracowano głównie z myślą o projektowaniu systemów radiodfuzyjnych pracujących w zakresie częstotliwości od 30 MHz do 1000 MHz.

Natężenie pola zostało uzależnione od wysokości anteny odbiorczej i charakteru jej bezpośredniego otoczenia. Model ma następujący zakres stosowalności:

- częstotliwość 30 MHz - 1000 MHz;
- odległość między nadajnikiem i odbiornikiem $d = 10 - 1000$ km (krzywe dla odległości większej od 500 km uzyskano na drodze ekstrapolacji);
- wysokość efektywna anteny nadawczej h_1 – krzywe opracowane dla wysokości z zakresu 37,5 - 1200 m;
- umiarkowany typ klimatu - lądowy (Europa i Ameryka Płn.); morski - ciepły i chłodny (Morze Śródziemne i Morze Północne);
- krzywe wartości natężenia pola zaobserwowanego przez 50%, 10%, 5% i 1% czasu;
- wysokość anteny odbiorczej $h_2 = 1,5-40$ m (krzywe opracowane dla wysokości anteny odbiorczej 10 m – typowej dla radiodfuzji).

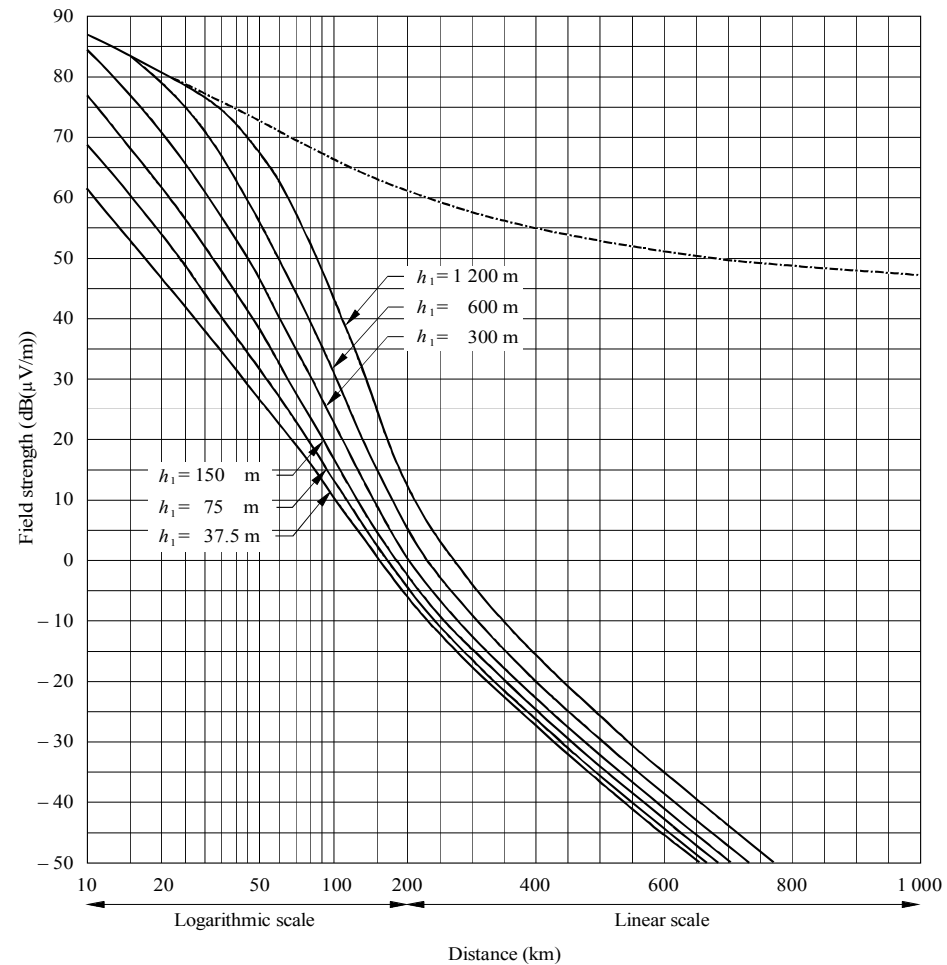




Model ITU-R 370 / ITU-R P.1546 (2)

Field strength ($\text{dB}(\mu\text{V/m})$) for 1 kW e.r.p.

Rodzina krzywych natężenia pola [$\text{dB}\mu\text{V/m}$] w funkcji odległości od nadajnika: ERP = 1kW, trasa lądowa; zakres częstotliwości 450-1000MHz; 50% czasu, 50% miejsc; $h_0=10\text{m}$; $\Delta h=50\text{m}$. [ITU-R P.370-7; parametrem krzywych jest wysokość efektywna zawieszenia anteny nadawczej h_1





Model ITU-R 370 / ITU-R P.1546 (3)

- Natężenie pola zostało uzależnione od wysokości anteny odbiorczej i charakteru jej bezpośredniego otoczenia. Model ma następujący zakres stosowalności:
- częstotliwość 30 MHz - 1000 MHz;
- odległość między nadajnikiem i odbiornikiem $d = 10 - 1000$ km (krzywe dla odległości większej od 500 km uzyskano na drodze ekstrapolacji);
- wysokość efektywna anteny nadawczej h_1 – krzywe opracowane dla wysokości z zakresu 37,5 - 1200 m;
- umiarkowany typ klimatu - lądowy (Europa i Ameryka Płn.); morski - ciepły i chłodny (Morze Śródziemne i Morze Północne);
- krzywe wartości natężenia pola zaobserwowanego przez 50%, 10%, 5% i 1% czasu;
- wysokość anteny odbiorczej $h_2 = 1,5-40$ m (krzywe opracowane dla wysokości anteny odbiorczej 10 m – typowej dla radiodifuzji).





Model ITU-R 370 / ITU-R P.1546 (4)

Krzywe reprezentujące kwantyle natężenia pola podano dla następujących wartości parametrów:

- równoważna moc promieniowana ERP (ang. *Equivalent Radiated Power*) 1 kW;
- podział pasma na dwa zakresy częstotliwości 30–250 MHz i 450–1000 MHz;
- nieregularność terenu dla lądowej drogi propagacji $\Delta h = 50$ m;
- wysokość anteny odbiorczej $h_2 = 10$ m;
- wartości natężenia pola zaobserwowane w 50% lokalizacji (mediana).





Model ITU-R 370 / ITU-R P.1546 (5)

$$\Delta E(h_2) = (c/6) 20\log(h_2/10)$$

c - wartość zależna od pasma częstotliwości i od rodzaju zabudowy w otoczeniu odbiornika (jedyne sposoby uwzględniania charakteru zabudowy w omawianym modelu)

h_2 - wysokość zawieszenia anteny odbiorczej (w zakresie od 1,5 m do 40 m)

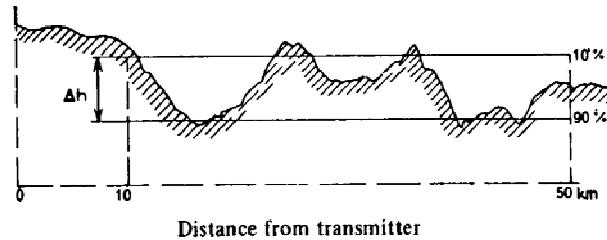
Wartość współczynnika c zależnie od typu zabudowy i pasma częstotliwości

Typ zabudowy	VHF	UHF
Wiejska	4	4
Podmiejska	5	6
Miejska	6	8

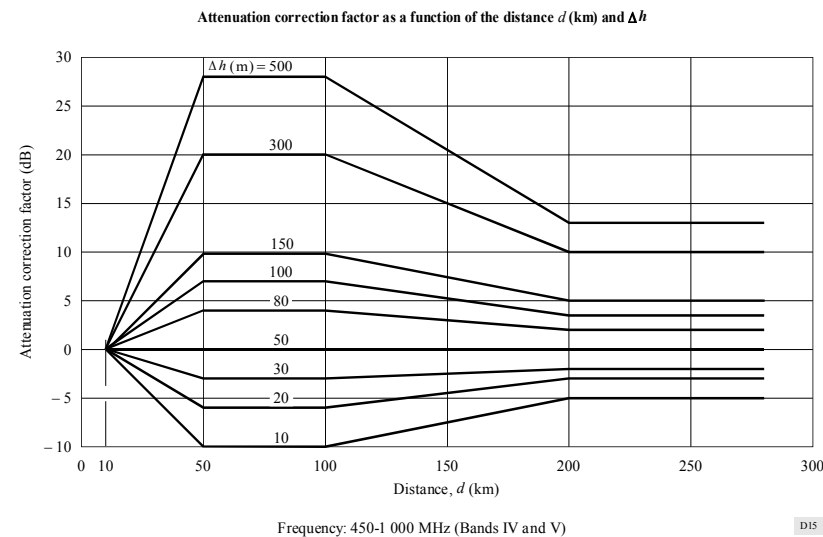




Model ITU-R 370 / ITU-R P.1546 (6)



a)



b)

Pofałdowanie terenu Δh : a) definicja parametru, b) krzywe korekcyjne pozwalające wprowadzać poprawkę tłumienności zależną od wartości Δh dla zakresu częstotliwości 450-1000 MHz, [ITU-R P.370-7]





Model ITU-R 370 / ITU-R P.1546 (7)

W 2001 r. Międzynarodowa Unia Telekomunikacyjna (ITU) przyjęła rekomendację ITU-R P.1546, która zastąpiła dotychczasowe rekomendacje ITU-R 370, 529 i 1146.

Model zawarty w rekomendacji ITU-R P.1546 jest w swojej konstrukcji zbliżony do wcześniejszego modelu ITU-R 370.

Oprócz podobieństw widoczne są istotne zmiany i uzupełnienia np.: zakres częstotliwości rozszerzono z 30–250 MHz i 450–1000 MHz do 30 MHz–3000 MHz (obejmującego pasma wykorzystywane przez wiele współczesnych systemów łączności bezprzewodowej);

zakres odległości od 1 km zamiast 10 km;

dodatkowe krzywe dla efektywnej wysokości zawieszenia anteny nadawczej 10 m i 20 m.

Do ważnych uzupełnień należy wprowadzenie zależności służących do interpolacji i ekstrapolacji w funkcji częstotliwości oraz wysokości zawieszenia anteny nadawczej.

Dodano zmodyfikowaną metodę uwzględniania wpływu środowiska, w którym znajduje się antena odbiorcza. Wprowadzono korekcję natężenia pola uwzględniającą ukształtowanie terenu z wykorzystaniem zmodyfikowanej wersji tzw. metody kąta przesłaniania trasy [ITU-R Raport 239-7].





Model Okumury (1)

- [Okumura i inni 1968] - empiryczna metoda obliczania rozkładów natężenia pola
- Model jest wynikiem statystycznej obróbki danych pomiarowych zebranych w Tokio i jego okolicach
- uzależnia natężenie pola od kilku parametrów (odległości nadajnik – odbiornik, wysokości zawieszenia anteny stacji bazowej i anteny stacji ruchomej, częstotliwości fali).
- poprawki uwzględniające pofałdowanie terenu, średnie nachylenie terenu, dyfrakcję na przeszkodach typu „ostrze noża”, itp.
- Metodę zaczęto powszechnie stosować w programach komputerowych wspomagających projektowanie systemów radiokomunikacyjnych od chwili, gdy Hata [Hata 1980] przedstawił równania aproksymujące część charakterystyk modelu Okumury.





Model Okumury (2)

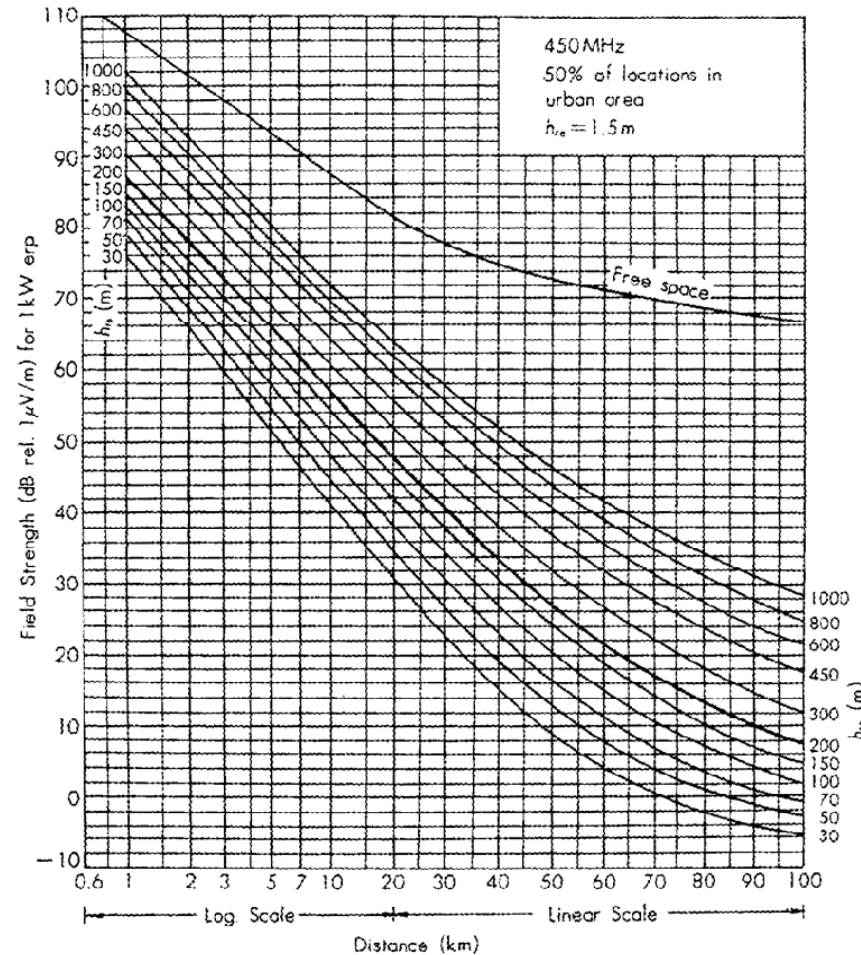
Model Okumury, ze względu na liczbę i stopień zgrupowania przeszkód (drzewa, domy itd.) wprowadzających tłumienie trasy, klasyfikuje jakościowo środowisko propagacji w następujący sposób:

- **teren otwarty** (ang. *open area*) - obszar na którym, na drodze propagacji pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem oraz dalej w odległości 200-300 m, nie występują wysokie drzewa lub budynki (mogą to być np. pola);
- **teren podmiejski** (ang. *suburban area*) - obszar na którym znajdują się przeszkody bliskie stacji ruchomej, ale ich zagęszczenie nie jest zbyt duże (np. wsie, przedmieścia lub drogi przy których rosną drzewa);
- **teren miejski** (ang. *urban area*) - obszar w centrum miasta lub tereny z zabudową o dwóch lub większej liczbie pięter, a także wsie, cechujące się dużym zagęszczeniem budynków i wysokich drzew.





Model Okumury (3)



- Podstawowe krzywe medianowe modelu Okumury: teren miejski, 450MHz, ERP=1 kW [Okumura i inni 1968]





Model Okumury (4)

Podano także, w postaci graficznej, dodatkowe składniki korekcyjne pozwalające uwzględnić wpływ:

- kąta między osią ulicy a kierunkiem do stacji bazowej,
- efektywnej wysokości zawieszenia anteny nad średnim poziomem terenu, pofałdowania terenu Δh (parametr zdefiniowano inaczej niż w modelu ITU-R P.370),
- pojedynczego grzbietu górskiego,
- średniego nachylenie terenu,
- tras mieszanych lądowo-morskich.

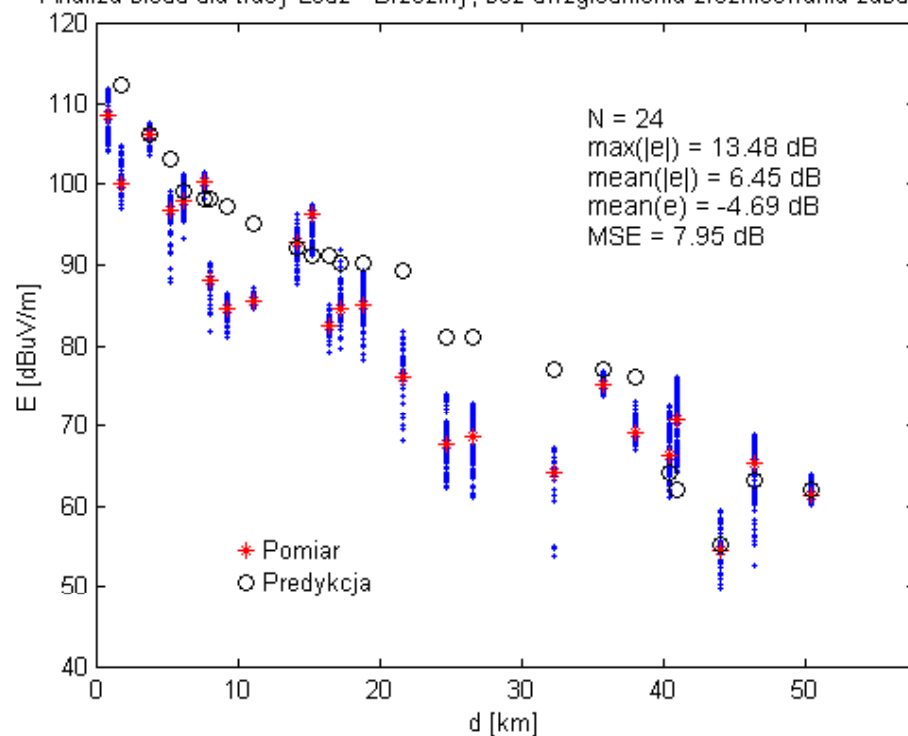




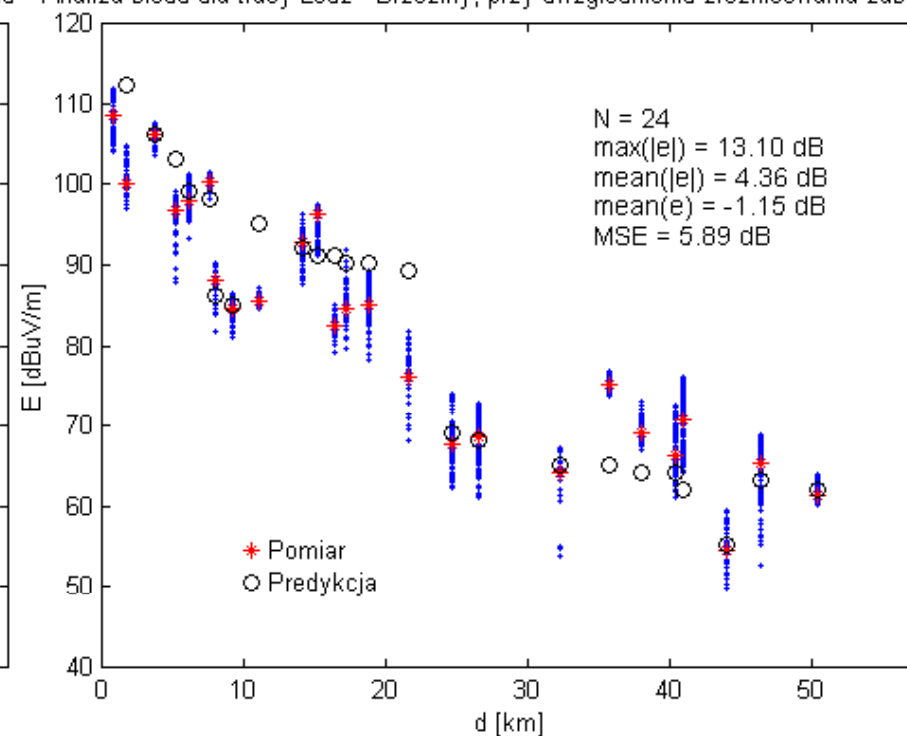
Model Okumury (5)

Przykład: Wyniki pomiaru i symulacji natężenia pola przy użyciu modelu Okumury (trasa Łódź–Brzeziny)

Analiza błędów dla trasy Łódź - Brzeziny, bez uwzględnienia zroznicowania zabudowy



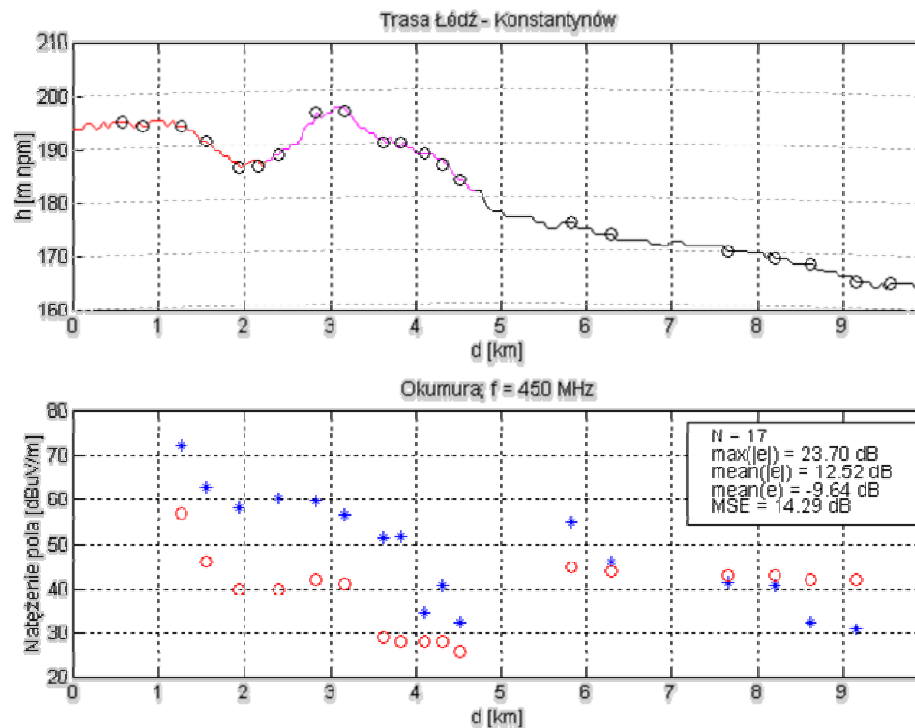
Analiza błędów dla trasy Łódź - Brzeziny, przy uwzględnieniu zroznicowania zabudowy



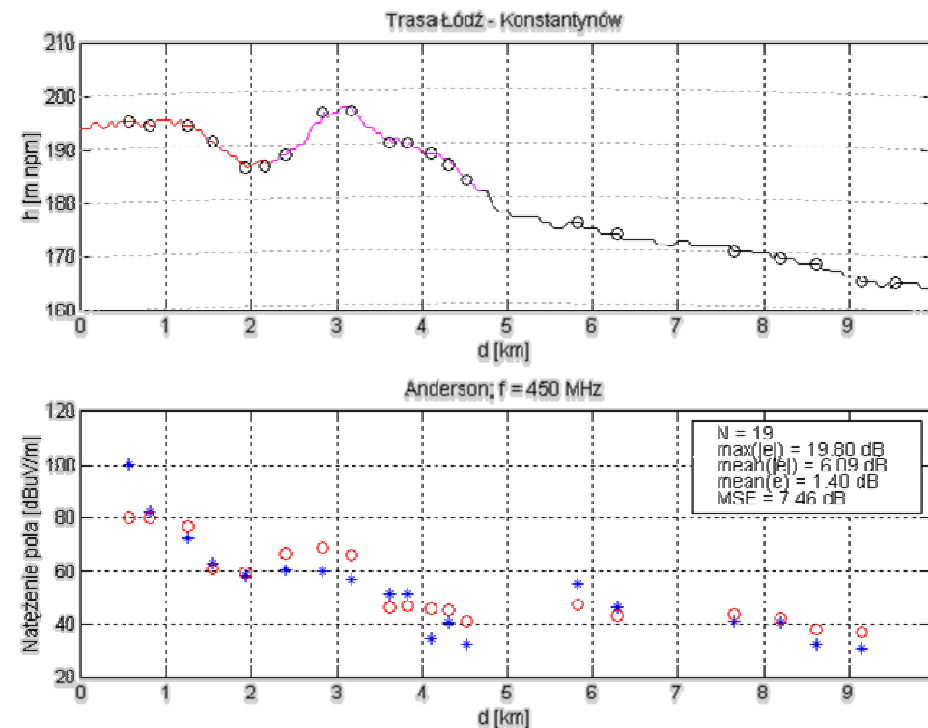


Porównanie wyników z przykładowych metod modelowania

Przykład: Wyniki pomiaru i symulacji natężenia pola przy użyciu modeli Okumury i Andersona (trasa Łódź–Konstantynów)



model Okumury



Model Andersona

pomiary (*) i symulacje (o)





Model Kozono-Watanabe

Zaproponowany w modelu Okumury podział terenu na obszary miejskie, podmiejskie i otwarte wymaga subiektywnej kwalifikacji terenu w otoczeniu odbiornika

Tokio różni się od zabudowy miast europejskich, czy amerykańskich. Tak więc zaproponowana klasyfikacja terenu jest mało ogólna.

[Kozono i Watanabe 1977] przyjęli hipotezę, że wpływ gęstości zabudowy (wokół stacji ruchomej) na wartość tłumienia trasy, może być uwzględniony przez wprowadzenie dodatkowej poprawki do modelu Okumury.

Wprowadzono współczynnik α – powierzchni zajmowanej przez budynki w obszarze (ang. *area factor of occupied buildings*) zdefiniowany jest jako procent powierzchni obszaru zajmowany przez budynki.

Do wyznaczenia wartości α niezbędne jest podzielenie mapy miasta na obszary wielkości prostokątów 500x800 m (wymiary zaproponowane przez autorów metody).


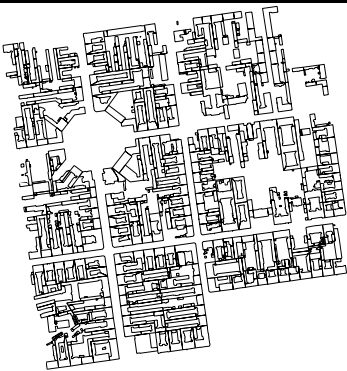

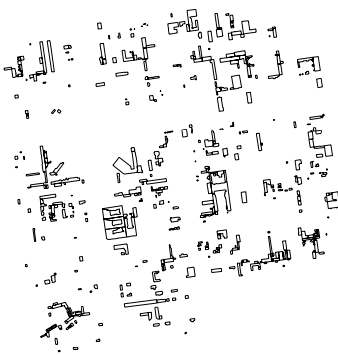
Poprawkę natężenia pola S [dB μ V/m] zależną od wartości α [%]

$$S = -25 \log \alpha + 30 \quad [\text{dB}] \quad \text{dla} \quad \left\{ \begin{array}{l} 3\% < \alpha < 50\% \\ 400\text{MHz} < f < 900\text{MHz} \end{array} \right.$$





Mapy obszarów zabudowanych

okolice ul. Pabianickiej	okolice pl. Wolności	
		Mapy zabudowy (wszystkie budynki)
		Tylko budynki jednopiętrowe

Mapy zabudowy dwóch fragmentów Łodzi ukazujące liczbę budynków dla czterech przykładowych liczb kondygnacji [Hausman Lewicki 1999]





KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



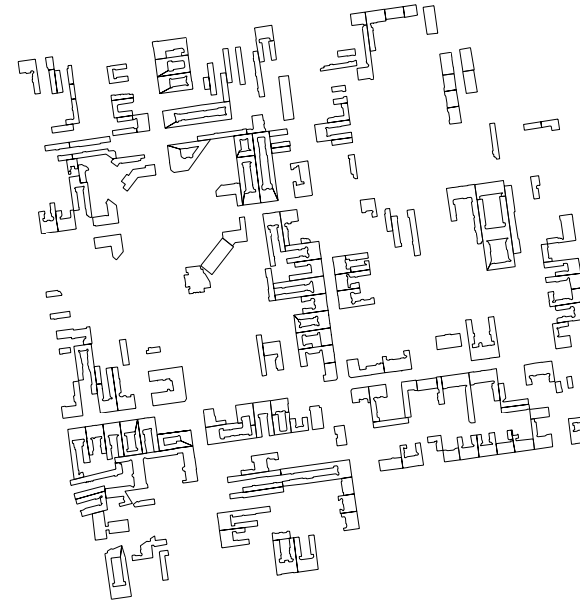
Prezentacja multimedialna współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Mapy obszarów zabudowanych

Fragment mapy zabudowy centrum Łodzi



Wszystkie budynki



Tylko budynki czteropiętrowe

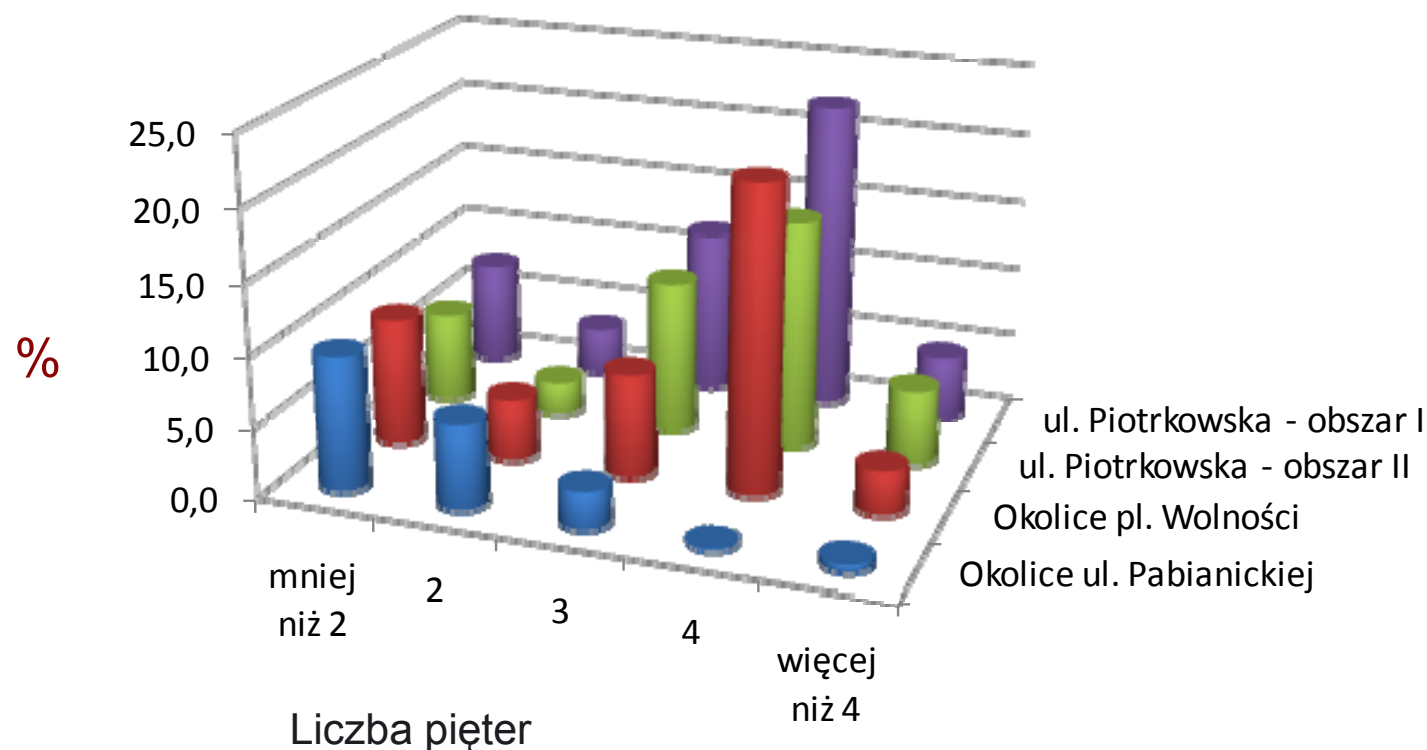


Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

*Bezprzewodowe sieci telekomunikacyjne:
Analiza propagacyjna*

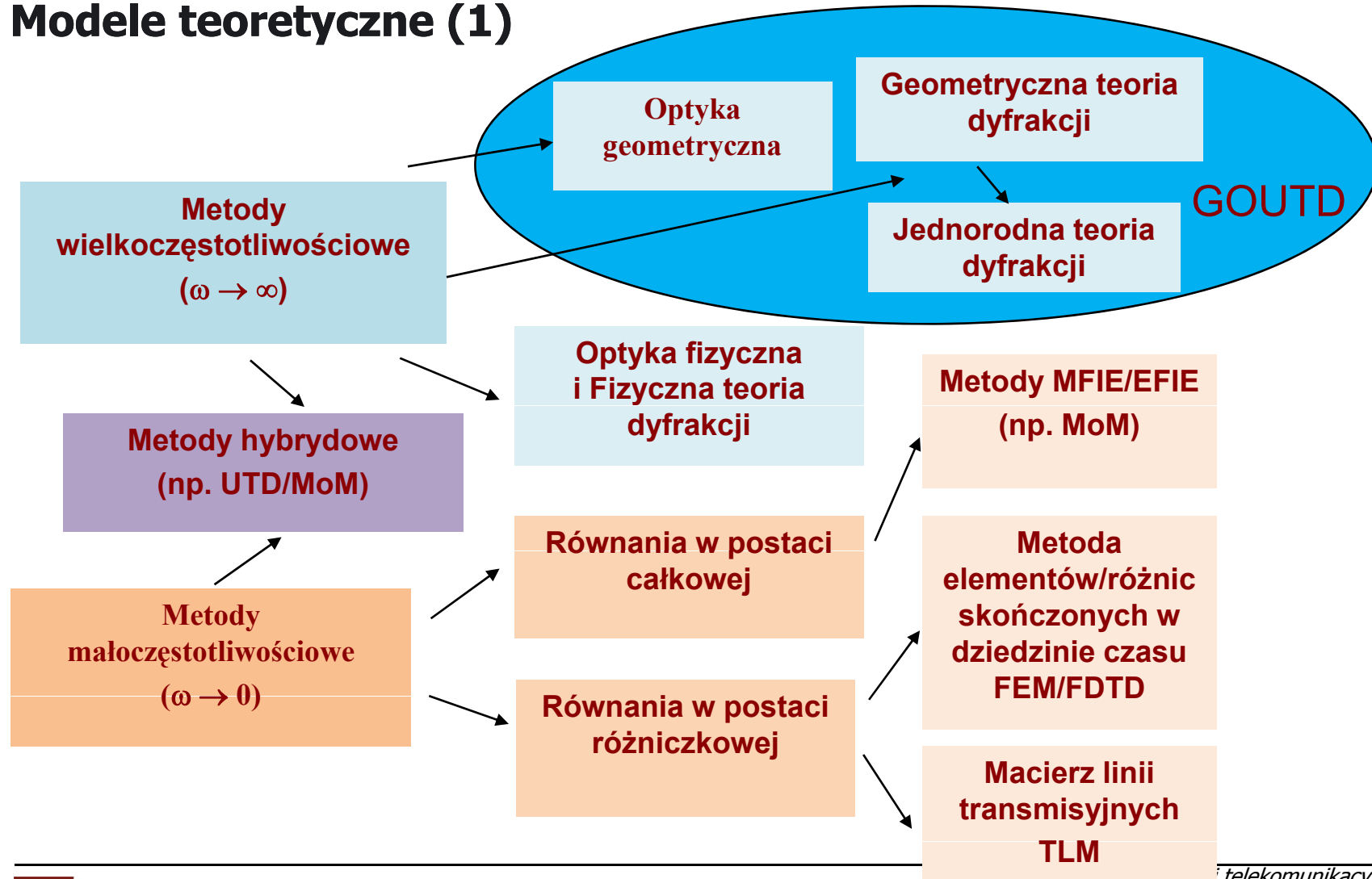


Mapy obszarów zabudowanych



Histogram powierzchni obszarów miasta zajmowany przez budynki o określonej liczbie pięter

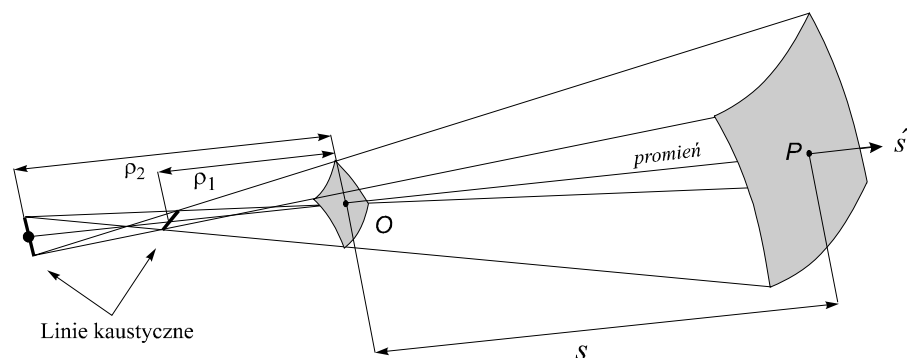
Modele teoretyczne (1)



Modele teoretyczne (2)

W optyce geometrycznej obowiązują następujące podstawowe postulaty:

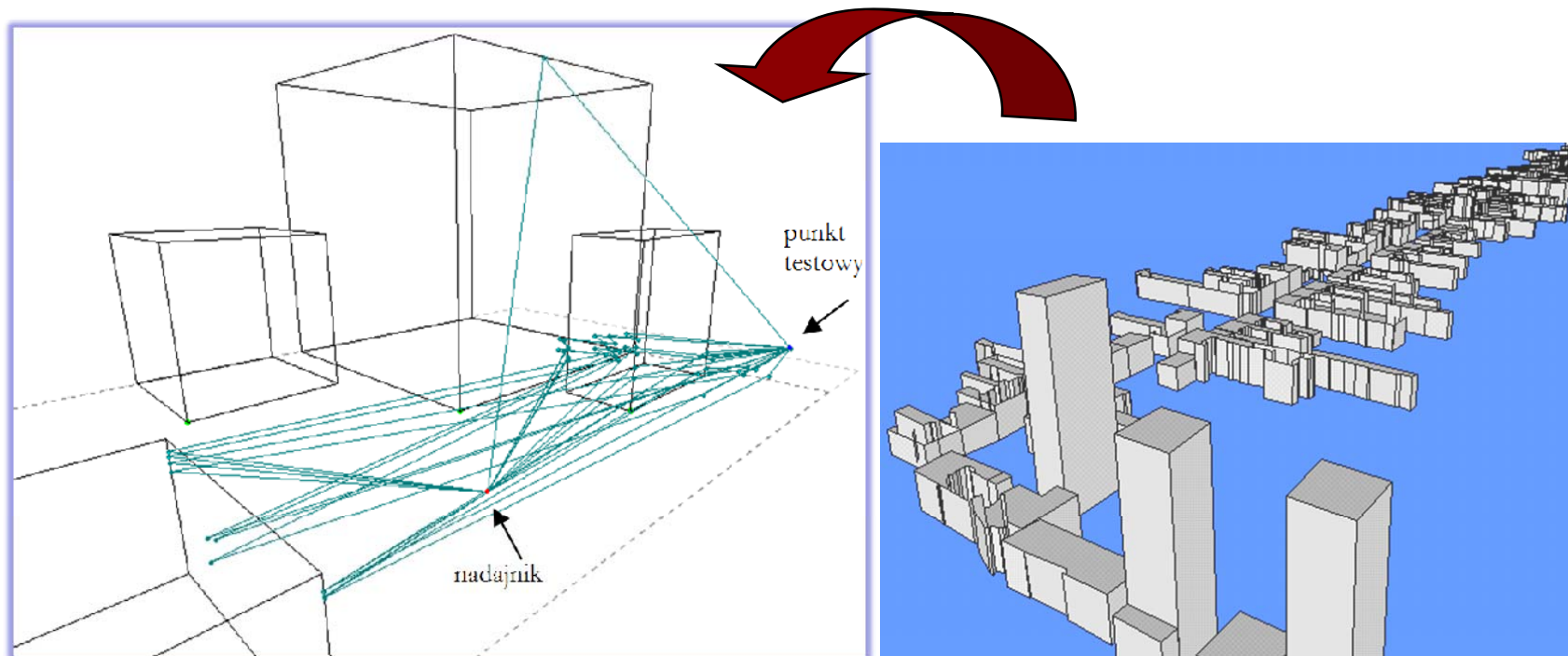
- energia niesiona przez falę rozprzestrzenia się wzdłuż tzw. promieni – linii prostopadłych w każdym punkcie do powierzchni równofazowych;
- droga optyczna między dowolnymi dwiema rozważanymi powierzchniami równej fazy wzdłuż każdego z przechodzących przez nie promieni jest stała;
- promienie załamane i odbite podlegają prawu Snelliusa.



$$\vec{E}(P) = \vec{E}(O) \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)}} e^{-jks}$$

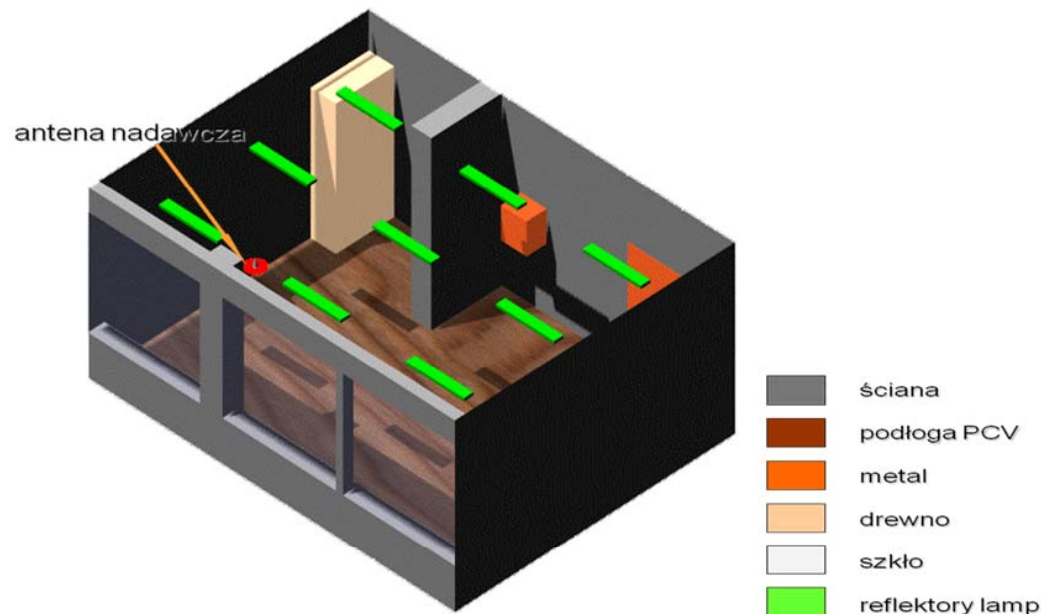
Astygmatyczna tuba promieni z zaznaczonymi liniami kaustycznymi i promieniami głównymi

Modele teoretyczne (2)

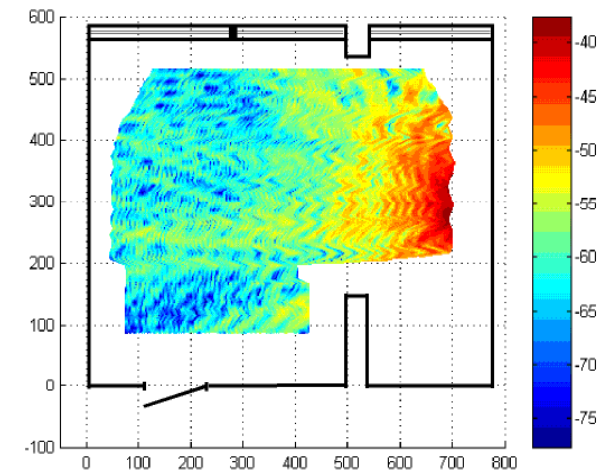
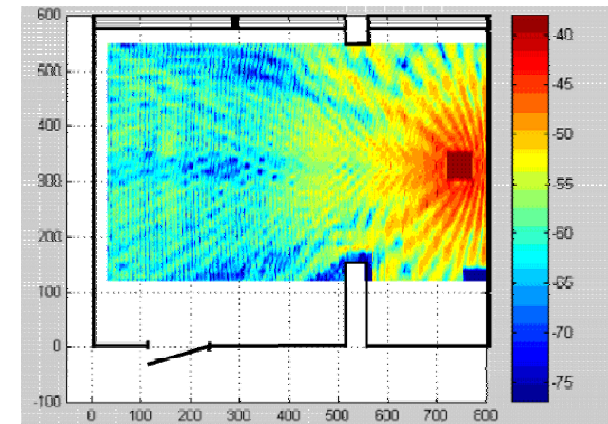


Widok okien programu GOUTD ze szkieletową wizualizacją fragmentu środowiska oraz promieni odbitych i ugiętych docierających do punktu testowego

Modele teoretyczne (2)



Wizualizacja modelu pomieszczenia



Przestrzenny rozkład natężenia pola



Proste modele teoretyczno-empiryczne

Często spotyka się modele teoretyczno-empiryczne, np. wykładniczy model tłumienia trasy. Zakłada się, że środowisko propagacji jest jednorodne: wyrażona w decybelach tłumienność L_{dB} w dowolnej odległości d od nadajnika może być wyznaczona na podstawie wartości tłumienia w pewnej odległości referencyjnej d_0 oraz współczynnika tłumienności γ .

$$L_{dB}(d) = L_{dB}(d_0) + \gamma 10 \log_{10} \frac{d}{d_0}$$

Można zaproponować pewne uogólnienie tego modelu, w którym występuje dodatkowa zależność tłumienności od częstotliwości f i (iloczynu) wysokości zawieszenia anten h_t i h_r .

$$L_{dB}(d) = L_{dB}(d_0) + \gamma \cdot 10 \left[\log_{10} \frac{d}{d_0} + n \cdot \log_{10} \frac{f}{f_0} + c \cdot \log_{10}(h_T h_R) \right]$$





Model wielościanowy (ang. multi-wall model - MWM)

Tłumienność toru radiowego wewnątrz budynku można wyznaczyć między innymi przy użyciu tzw. modelu Multi-Wall, który został opracowany w ramach europejskiego projektu COST 231 i jest zalecany przez ITU do użytku przy projektowaniu systemów komórkowych trzeciej generacji.

$$L = L_{FS}(d) + L_c + \sum_{i=1}^I k_{wi} L_{wi} + k_f \frac{k_f + 2}{k_f + 1}^{-b} L_f$$

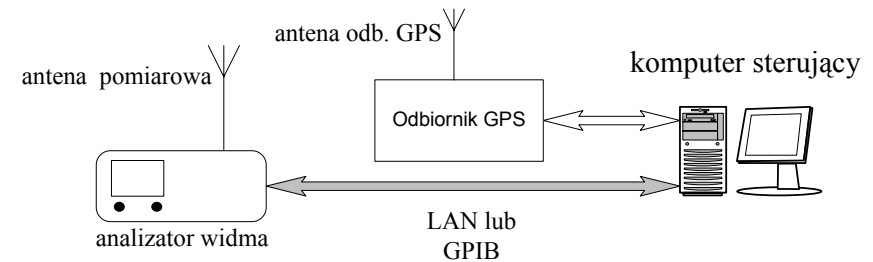
L_{FS} - tłumienie wolnej przestrzeni (z wzoru Friisa), L_c - stała tłumienia (określana empirycznie i zwykle bliska 0), k_{wi} - liczba ścian i-tego typu na trasie propagacji, I – liczba typów różnych ścian, k_f – liczba stropów na trasie propagacji, L_{wi} - tłumienność ściany i-tego typu, L_f - tłumienność stropu, b - parametr empiryczny, d - odległość między nadajnikiem a odbiornikiem w linii prostej.

Przykładowe wartości parametrów (źródło Alcatel)

L_{w1} [dB] ściana działowa	L_{w2} [dB] ściana nośna	L_f [dB]	b
3,4	6,9	18,3	0,46



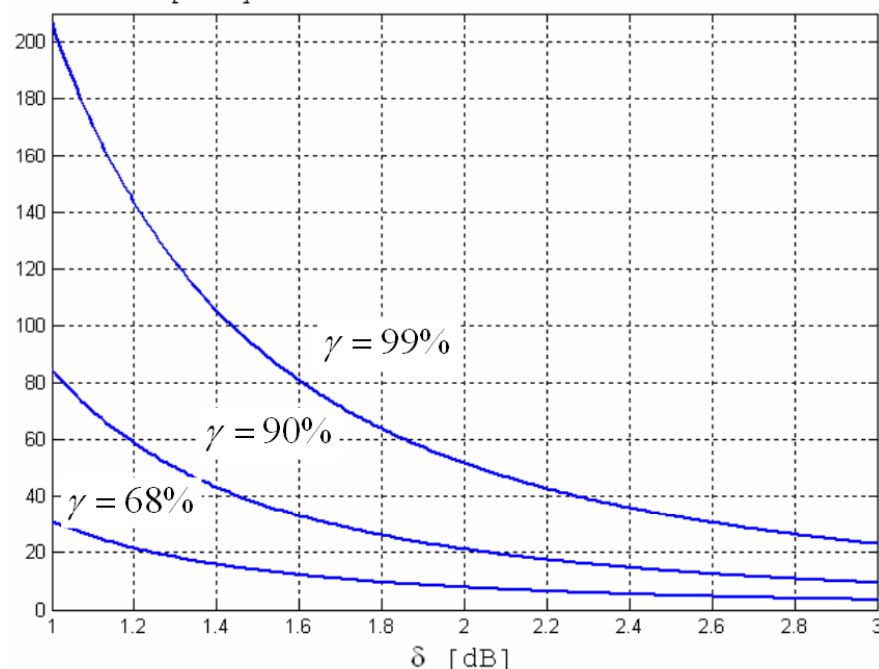
Pomiary pola w terenie (1)



Widok pojazdu pomiarowego z anteną i analizatorem widma

Pomiary pola w terenie (2)

Liczność próby N



$$r(x) = m(x) \cdot r_0(x)$$

$r(x)$ - obwiednia sygnału odebranego

$m(x)$ - zaniki wolne

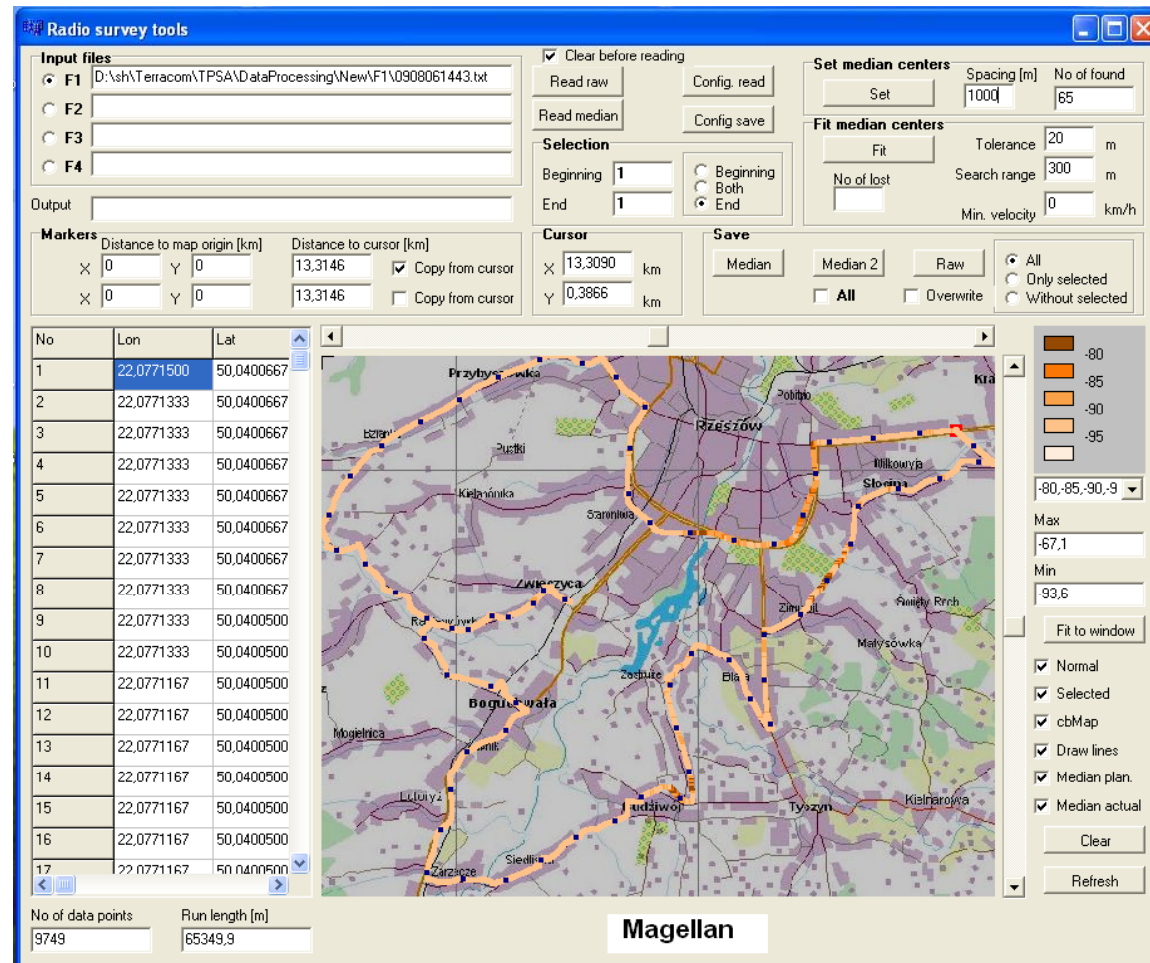
$r_0(x)$ zaniki szybkie

Problem: Wyznaczyć $m(x)$
na podstawie obserwacji $r(x)$

Liczba N niezależnych pomiarów natężenia pola (przy założeniu rozkładu Rayleigha ($\sigma_z = 5,57$)) potrzebna do wyznaczenia średniej z przedziałem ufności $\pm \sigma_z$ dla poziomu ufności $\gamma = 68\%$, 90% i 99%

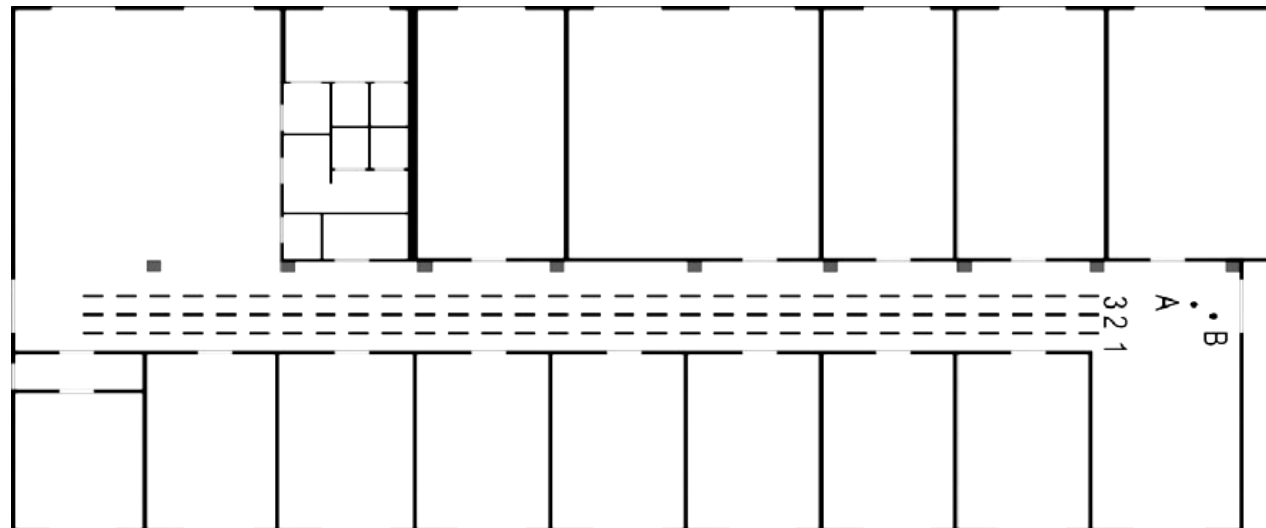
Pomiary pola w terenie (3)

Widok okna programu komputerowego Magellan (autor S.Hausman) do rejestracji i statystycznej obróbki wyników pomiarów natężenia pola w terenie





Pomiary we wnętrzach budynków (1)

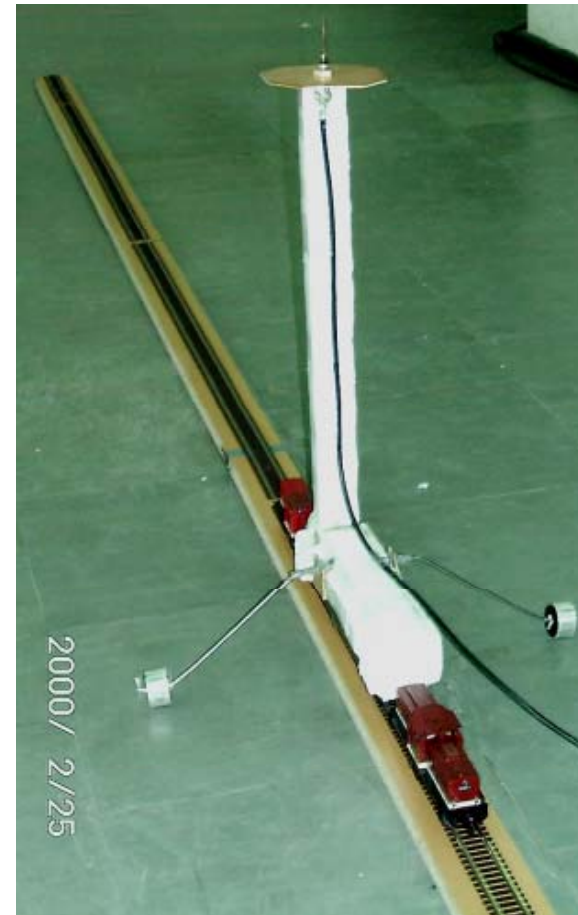


Przekrój jednego z pięter budynku mieszczącego Instytut Elektroniki PŁ: ukazano ścieżki pomiarowe (oznaczenie: 1,2,3) oraz położenie anteny nadawczej (oznaczenie: A i B)





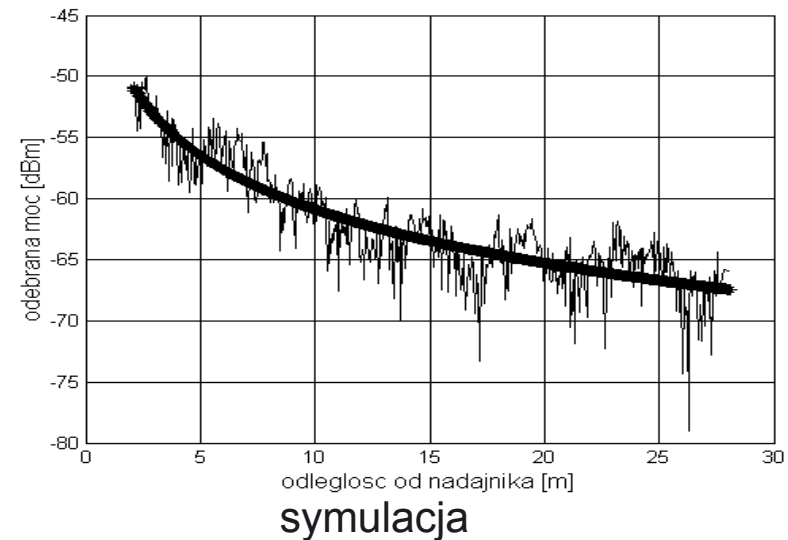
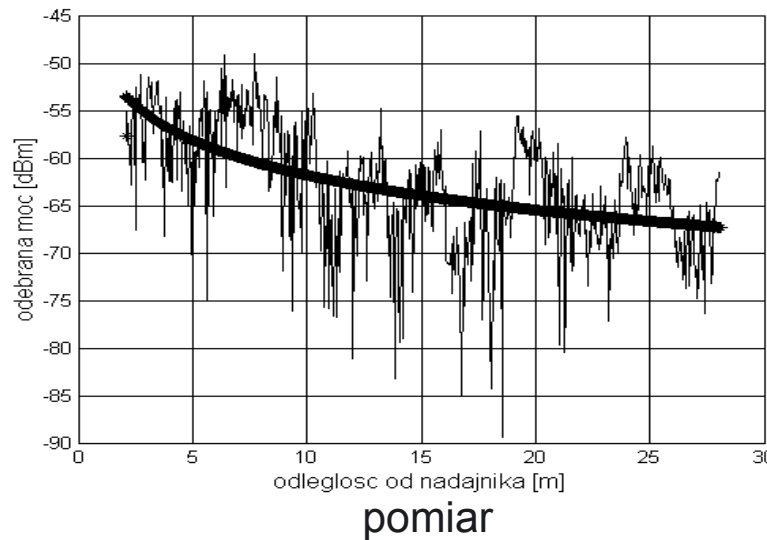
Pomiary we wnętrzach budynków (2)



Układy pomiarowe wykorzystane do pomiarów pól we wnętrzach budynków

*Bezprzewodowe sieci telekomunikacyjne:
Analiza propagacyjna*

Pomiary we wnętrzach budynków (3)



$$L_{dB}(d) = L_{dB}(d_0) + \gamma 10 \log_{10} \frac{d}{d_0}$$

Rozkład mocy odebranej dla ścieżki pomiarowej

numer ścieżki	γ pomiar	γ symulacja
1	1,78	1,83
2	1,35	1,52
3	1,21	1,46
wartość średnia	1,45	1,60



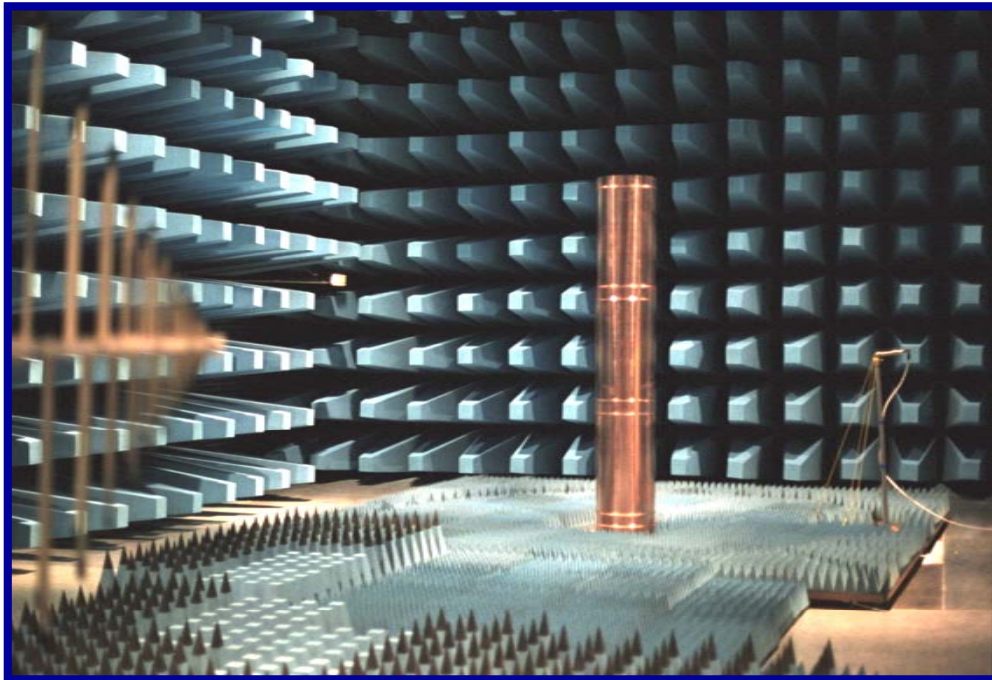
KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



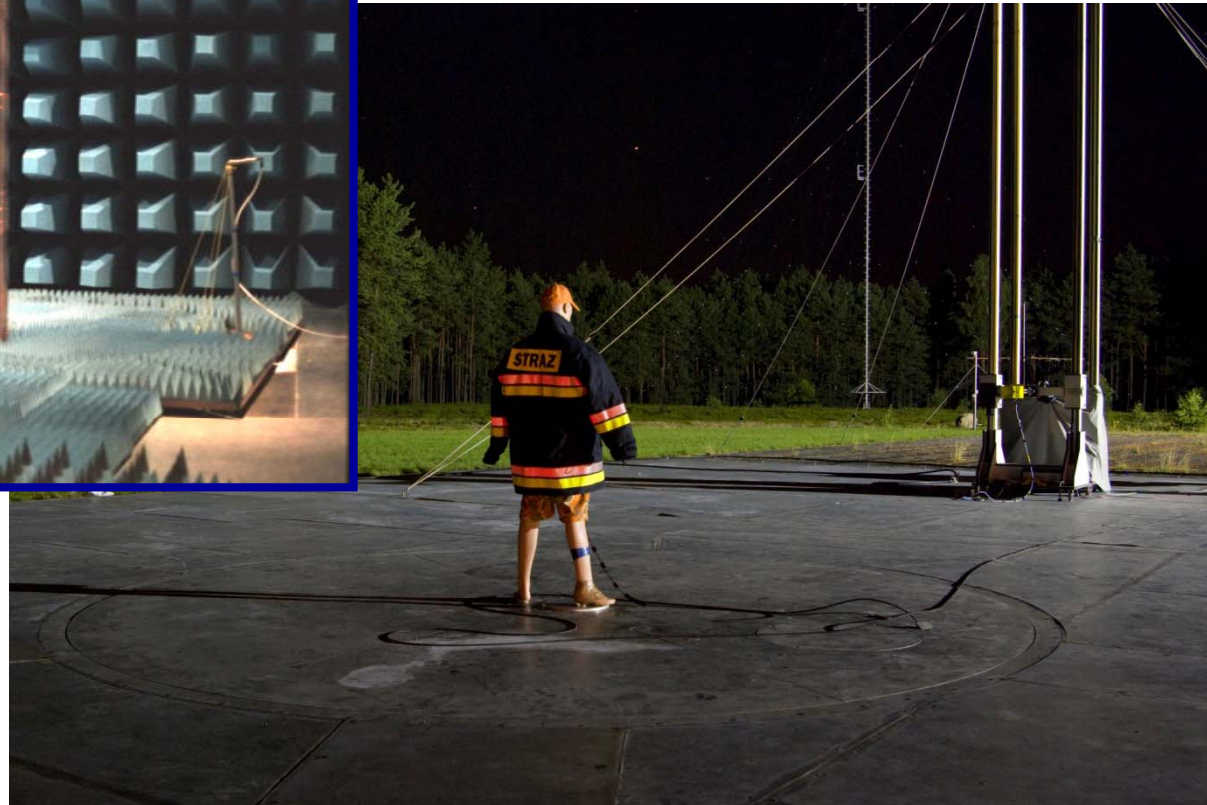
Prezentacja multimedialna współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Inne środowiska pomiarowe



Komora bezodbiciowa

Stanowiska wykorzystywane głównie do wykonywania pomiarów w kompatybilności elektromagnetycznej.



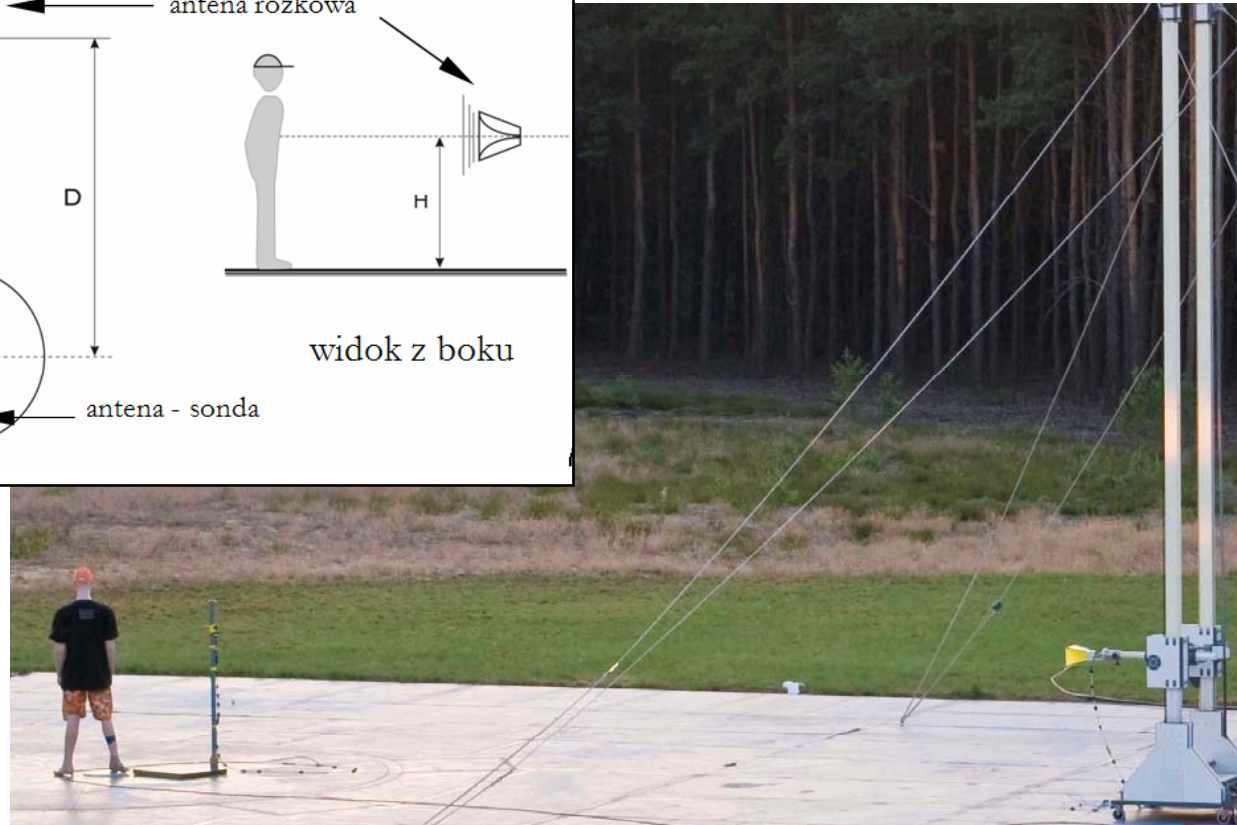
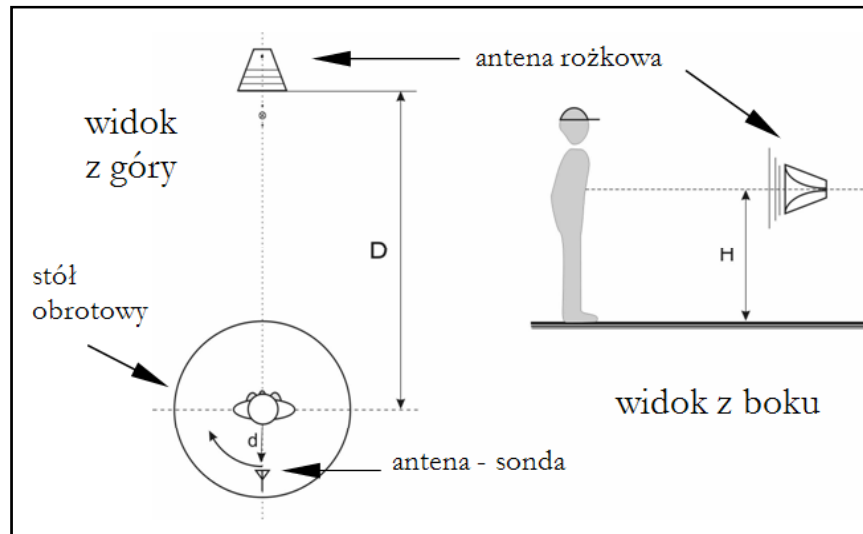
Otwarte pole pomiarowe

*Bezprzewodowe sieci telekomunikacyjne:
Analiza propagacyjna*



Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

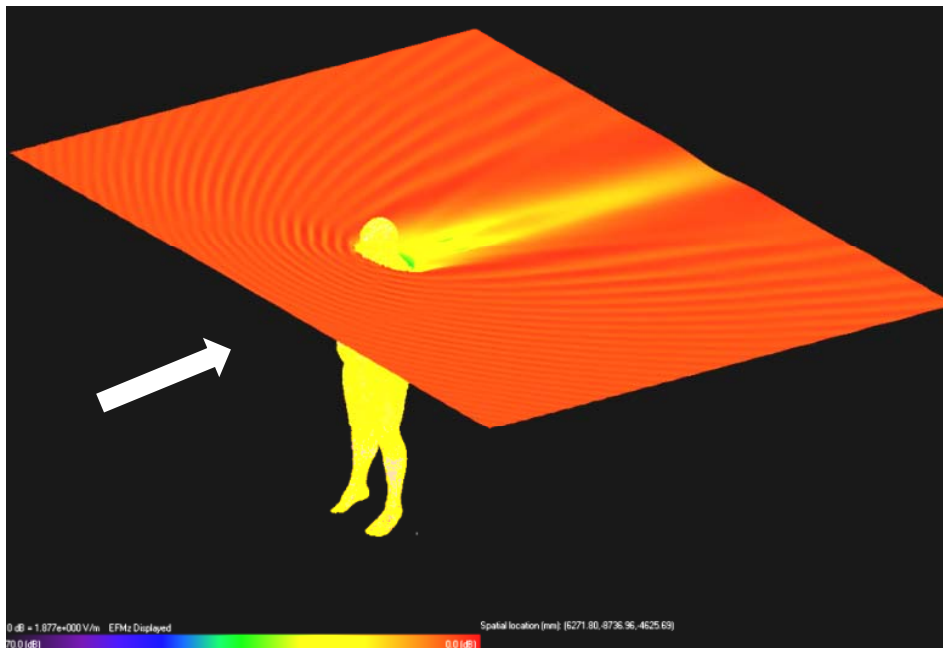
Rozpraszanie fali przez ciało człowieka (1)



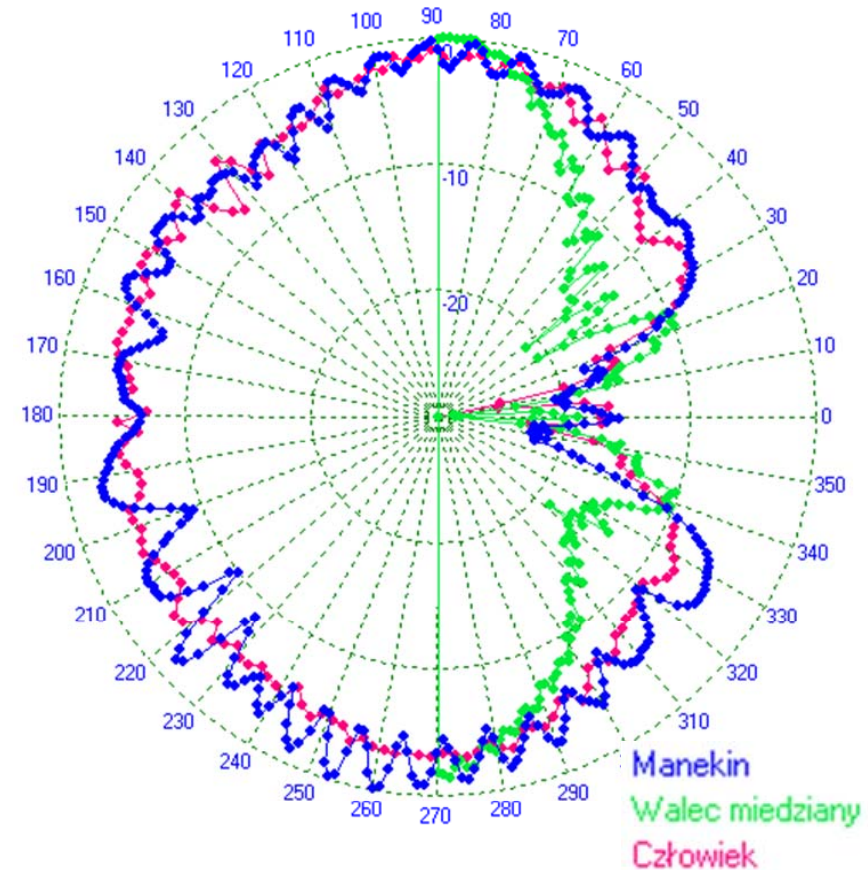
Widok układu do pomiaru rozpraszania fali na ciele człowieka, na fantomie antropomorficznym



Rozpraszanie fali przez ciało człowieka (2)



Rozkład natężenia pola rozpraszanego na fantomie (symulacja - Remcom XFDTD)



Natężenie pola w funkcji kąta obrotu stołu (pomiary)



Normy i raporty opracowane przez organizacje normalizacyjne

- Report 239-7, Propagation statistics required for broadcasting services using the frequency range 30 to 1000 MHz, pp.: 291- 309.
- Report 567-4, Propagation data and prediction methods for the terrestrial land mobile service using the frequency range 30 MHz to 3 GHz, pp.: 310-340.
- ITU-R P.310 Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media.
- ITU-R P.311 Acquisition, presentation and analysis of data in studies of tropospheric propagation.
- ITU-R P.341 The concept of transmission loss for radio links.
- ITU-R P.368 Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz.
- ITU-R P.369 Reference atmosphere for refraction.
- ITU-R P.370 VHF and UHF propagation curves for the frequency range from 30 MHz to 1 GHz broadcasting services.
- ITU-R P.434 ITU-R reference ionospheric characteristics and methods of basic MUF, operational MUF and ray-path prediction.





Normy i raporty opracowane przez organizacje normalizacyjne

- ITU-R P.453 The radio refractive index: its formula and refractivity data.
- ITU-R P.525 Calculation of free-space attenuation.
- ITU-R P.526 Propagation by diffraction.
- ITU-R P.527 Electrical characteristics of the surface of the Earth.
- ITU-R P.528 Propagation curves for aeronautical mobile and radionavigation services using the VHF, UHF and SHF bands.
- ITU-R P.529 Prediction methods for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands.
- ITU-R P.530 Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.
- ITU-R P.531 Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems.
- ITU-R P.676 Attenuation by atmospheric gases.
- ITU-R P.678 Characterization of the natural variability of propagation phenomena.
- ITU-R P.832 World Atlas of Ground Conductivities.





Normy i raporty opracowane przez organizacje normalizacyjne

- ITU-R P.833 Attenuation in vegetation.
- ITU-R P.834 Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation.
- ITU-R P.835 Reference standard atmospheres.
- ITU-R P.837 Characteristics of precipitation for propagation modelling.
- ITU-R P.1057 Probability distributions relevant to radiowave propagation modelling.
- ITU-R P.1058 Digital topographic databases for propagation studies.
- ITU-R P.1060 Propagation factors affecting frequency sharing in HF terrestrial systems.
- ITU-R P.1144 Guide to the application of the propagation methods of Radiocommunication Study Group 3.
- ITU-R P.1145 Propagation data for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands.
- ITU-R P.1146 The prediction of field strength for land mobile and terrestrial broadcasting services in the frequency range from 1 to 3 GHz.





Normy i raporty opracowane przez organizacje normalizacyjne

- ITU-R P.1238 Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz.
- ITU-R P.1240 ITU-R Methods of basic MUF, operational MUF and ray-path prediction.
- ITU-R P.1406 Propagation effects relating to terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands.
- ITU-R P.1407 Multipath propagation and parameterization of its characteristics.
- ITU-R P.1410 Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband millimetric radio access systems operating in a frequency range of about 20-50 GHz.
- ITU-R P.1411 Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz.
- ITU-R P.1546 Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz.

