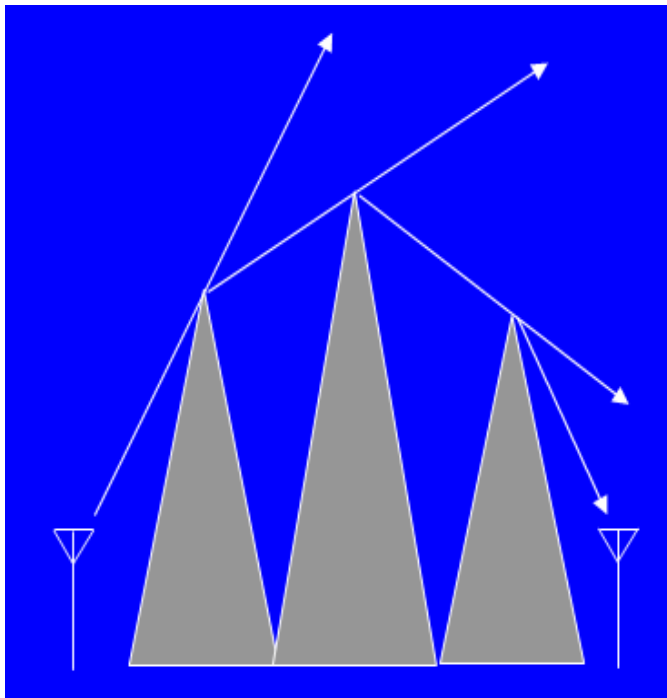


MODELI PROPAGACIJE

Pregled stanja in aktualnih modelov



Mobitel d.d., izobraževanje
27. 3. 2009, predavanje 10

Prof. dr. Jožko Budin

Vsebina - aktualni modeli:

- Razvrstitev modelov
- Modeli upadanja polja
- Modeli za zunanji prostor:
 - Erceg, Lee, Egli, Young
 - Okumura-Hata
 - Walfish-Bertoni-Ikegami
- Modeli za notranje prostore
 - Keenan- Motley
 - Žarkovni modeli

Modeli propagacije

- **Deterministični modeli:**

- na osnovi Maxwellovih enačb: momentna metoda, metoda končnih elementov, metoda končnih diferenc;
- na osnovi asimptotičnega (optičnega) približka rešitve valovne enačbe (žarkovna optika, zrcalna in uklonska metoda).

- **Pol-deterministični (pol-empirični) modeli:**

- kombinacija deterministične metode in empiričnih podatkov.

- **Izkustveni (empirični) modeli:**

- na temelju statističnih podatkov za tipično kategorijo okolja (ruralno, predmestno, srednje urbano, visoko urbano, notranjost stavb);
- Delna prilagoditev (umeritev) parametrov na določeno okolje.

Razširjanje v zunanjem prostoru

- Makrocelice (1 – 20 km)
- Mikrocelice (0,1 – 1 km)

Propagacijski modeli – razvrstitev

Deterministični modeli:

- ITU-R P.526-8 (uklon)
- ITU-R P. 368 (prizemni val)

Numerični modeli:

- CR Predict
- Detvag-90/FOA
- AWE Comm. WinProp
- CRC

*Podatki o reliefu in terenu
Teoretične metode
zahtevne, zamudne*

Pol-deterministični pol-empirični modeli:

- Longley-Rice
- Večkratni uklon
- TIREM (US Army rural)
- UPM (US Army urban)
- PTP
- AWE Dominant Path

*Delni podatki o terenu
Poenostavljene metode
Manj zahtevne in hitre*

Izkustveni (empirični) modeli:

- FCC krivulje
- ITU-R 370-7
- ITU-R P.529-3
- ITU-R P.452
- ITU-R P.1546
- ITU-R P. 1238-1
- ITU-R P.1238-1
- Okumura-Hata
- COST 231-Hata:
- Walfish-Bertoni-Ikegami
- Keenan-Motley

*Podatki o kategoriji terena.
Podatki o stavbah in ulicah. Merilni rezultati*

Modeli propagacije v zunanjem prostoru

- Model Longley-Rice
- Model ITU-R P.370 in ITU-R P.526
- Eno- in dvopotenčni model upadanja
- Model Egli
- Model Erceg
- Model Lee
- Model Young
- Model Okumura
- Model Okumura-Hata
- Model Hata – COST 231
- Model Walfish-Bertoni-Ikegami

Modeli propagacije v notranjih prostorih

- Eno- in dvopotenčni model upadanja
- Model Keenan-Motley
- Model dominantne poti
- Žarkovni model
- Uklonski model
- Primeri širjenja v stavbah
- Sklop z zunanjim prostorom
- Variabilnost polja

Priporočila ITU

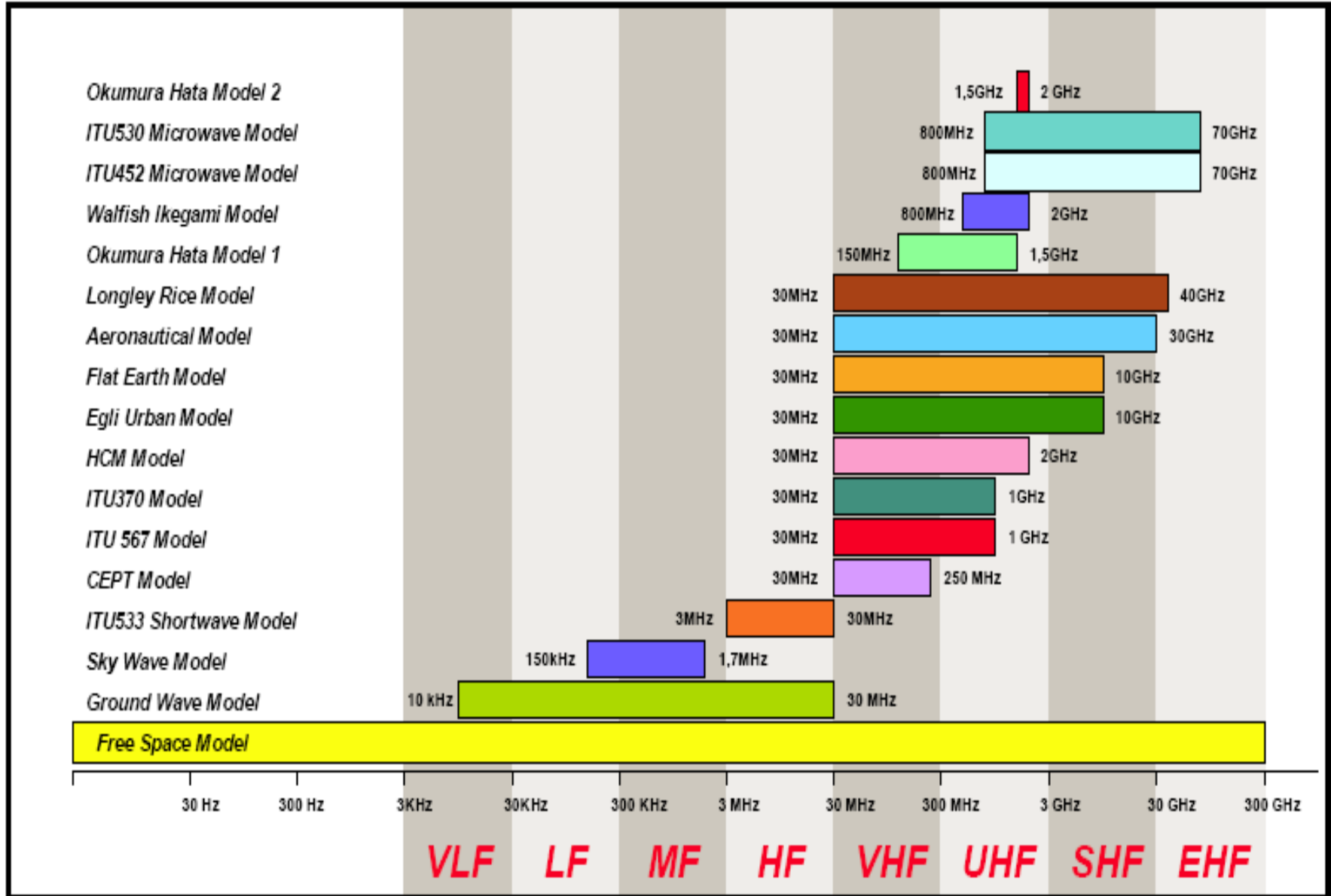
Modeli:

- Širjenje zemeljskega vala: Rec. P.368 (100 kHz -30 MHz); ITU Handbook (10 kHz – 10 GHz)
- Širjenje z uklonom: Rec. P. 526 (30 MHz – 15 GHz)
- Širjenje z radijsko vidljivostjo: Rec. P. 530 (800 MHz – 70 GHz)
- Širjenje v zunanjem prostoru na krajših relacijah: Rec. P. 1411 (300 MHz – 100GHz)
- Širjenje v notranjih prostorih: Rec. P. 1238 (900 MHz – 100GHz)

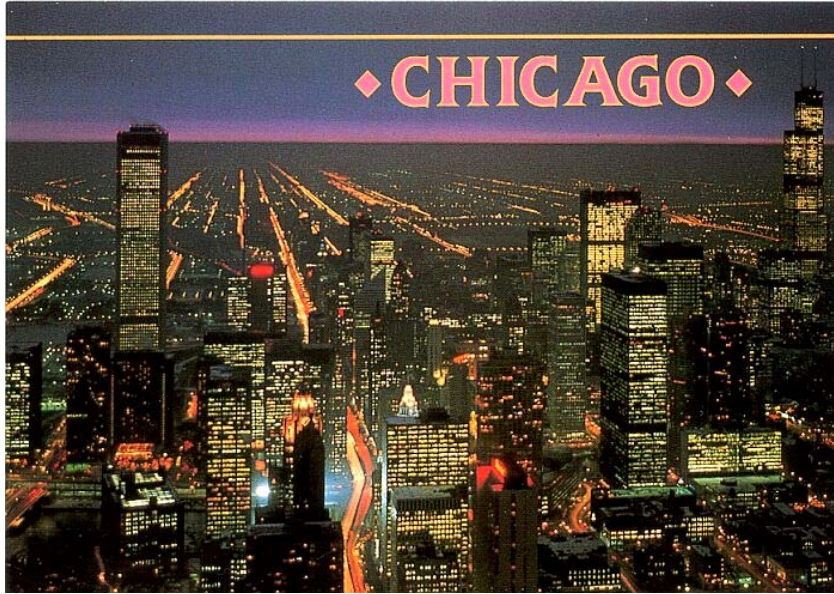
Podatki:

- Propagacijski podatki zemlja – vesolje: Rec. P.681
- Učinek vegetacije na širjenje: Rec P. 681 (800 MHz – 20 GHz)
- Absorpcija atmosferskih plinov: Rec. P. 676, P. 530, P.618
- Absorpcija oblakov in megle: Rec. P. 840
- Absorpcija padavin: Rec. P. 837
- Referenčna troposfera Rec. P. 835

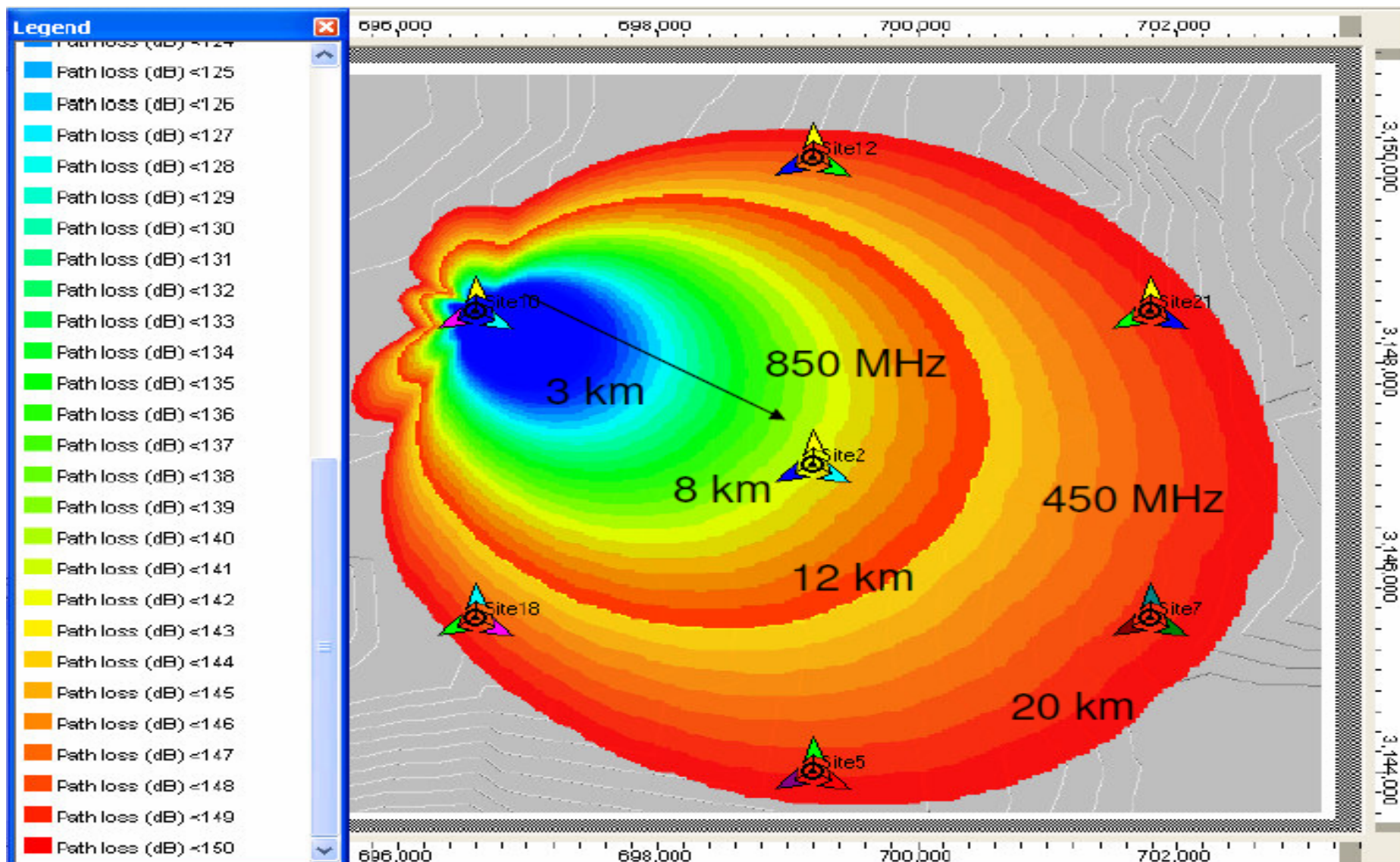
Propagacijski modeli in frekvenčna področja



Vrste urbanih područij



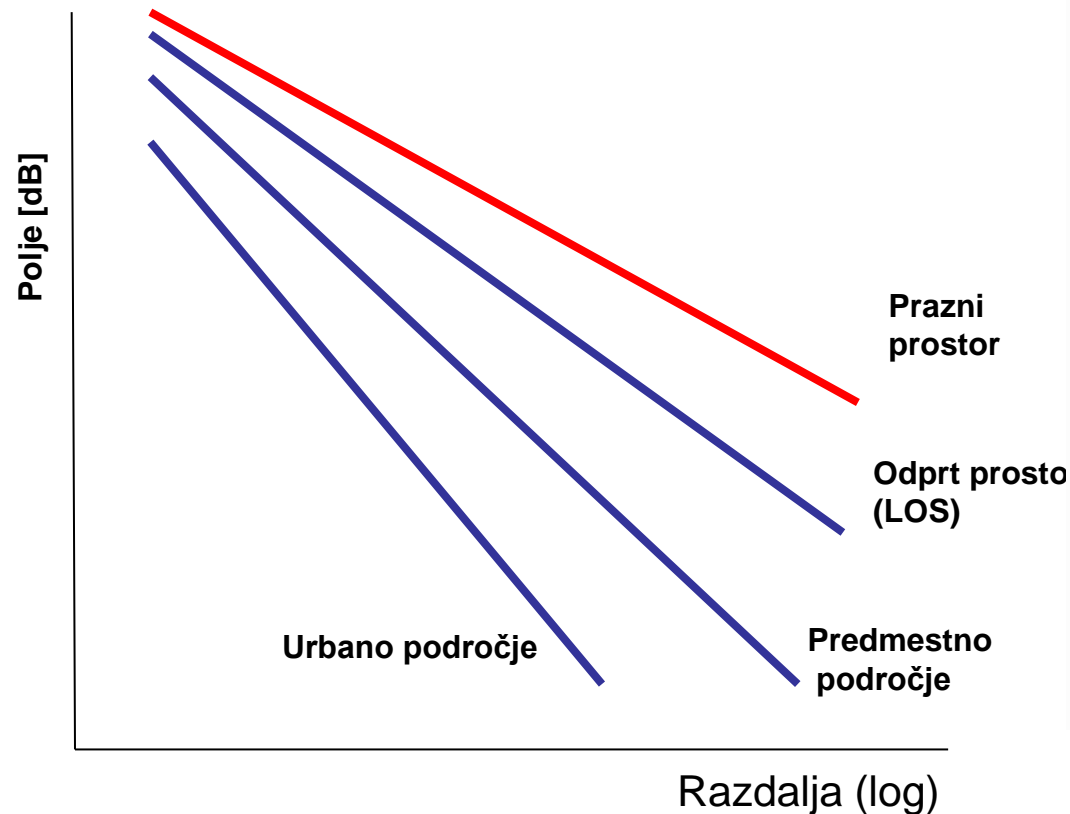
Radijska pokritost terena



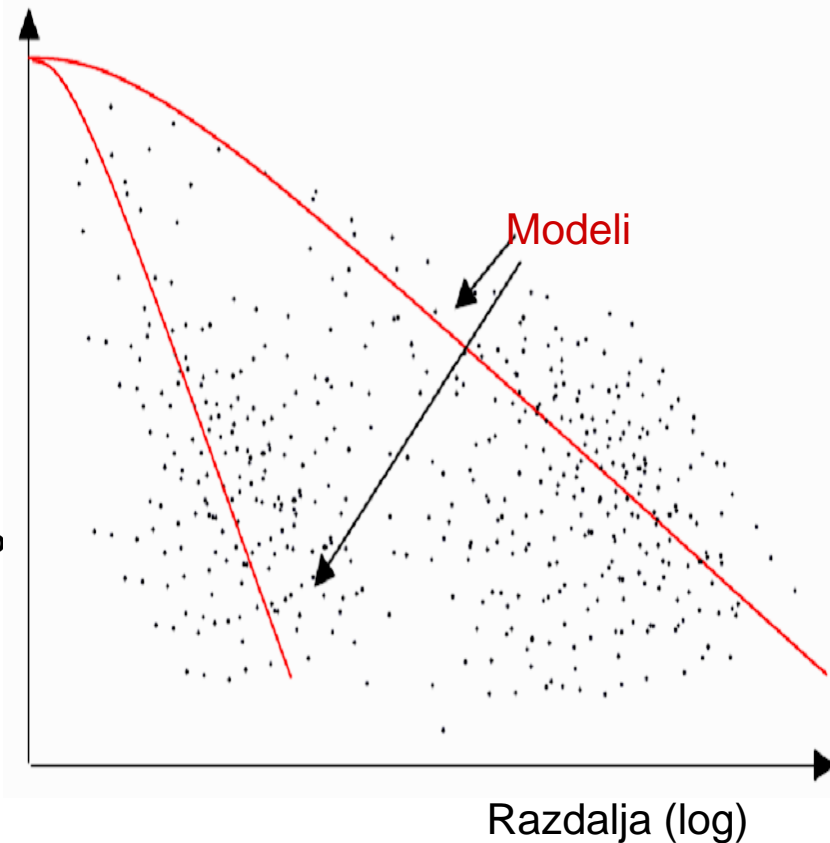
Modeli (Okumura-Hata, drugi) dajejo slabljenje neodvisno od smeri. Bazna antena je tista, ki določa odvisnost pokritosti od smeri.

Preprosti potenčni modeli za propagacijo v odbojno-izgubnem prostoru

Nekaj potenčnih modelov upadanja polja z razdaljo



Primer statistične variabilnosti polja v močno reflektivnem okolju



Potenčni modeli so najbolj groba kategorizacija slabljenja. Podajajo približno srednjo vrednost slabljenja, okoli katere so široko raztresene dejanske vrednosti polja.

Modeli upadanja daljnega polja v odbojno-izgubnem okolju

1. Model upadanja polja in moči pri sprejemu v praznem prostoru (Friis)

$$E(r) = E(r_0) \left(\frac{r_0}{r} \right)$$

$$P_s(r) = P_s(r_0) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2$$

upadanje moči s kvadratom razdalje
 r_0 – referenčna razdalja (npr. 1m)

2. Model upadanja moči pri širjenju v realnem prostoru

$$P_s(r) = P_s(r_0) \left(\frac{r_0}{r} \right)^n$$

$$P_{sdB}(r) = P_{sdB} + 10n \log \left(\frac{r}{r_0} \right)$$

$n < 2$ ugoden učinek valovodnega širjenja

$n = 2$ širjenje v praznem prostoru

$n > 2$ neugoden učinek na širjenje v realnem prostoru

3. Model upadanja moči z upoštevanjem prostorske fluktuacije (median in naključni del moči)

$$P_{sdB}(r) = P_{sdB} + 10n \log \left(\frac{r}{r_0} \right) \pm x_\sigma$$

x_σ Gaussov (normalni) naključni prispevek pri standardni deviaciji σ

Prostorska variabilnost je posledica večstезne interference v refleksnem okolju. Referenčna razdalja r_0 je poljubna, ponavadi izbiramo $r_0 = 1$ meter za notranji prostor ali $r_0 = 0,1$ do 1 km za zunanji prostor.

Model dveh strmin upadanja polja

V začetnem delu ($r < R$) in končnem delu ($r > R$) so pogoji širjenja lahko različni in jih karakteriziramo z različnima potencama upadanja n_1 in n_2 . R je "lomna" razdalja. Model se uporablja v urbanem in notranjem okolju.

$$P_{s_{dB}} = P_{s_{dB}}(r) = 10n_1 \log\left(\frac{r}{r_0}\right), \quad r \leq R$$

$$P_{s_{dB}} = P_{s_{dB}}(r) = 10n_1 \log r_0 + 10n_2 \log\left(\frac{r}{r_0}\right), \quad r > R$$

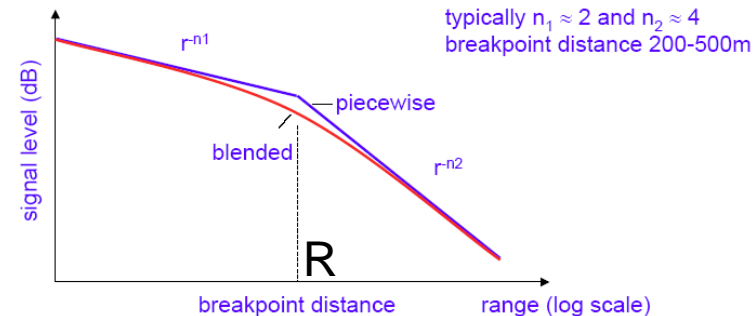
Če so v prvem delu izpolnjeni pogoji za širjenje v praznem prostoru ($n_1 = 2$), je

$$P_{s_{dB}} = P_{s_{dB}}(r) = 20 \log r_0 + 10n_2 \log\left(\frac{r}{r_0}\right)$$

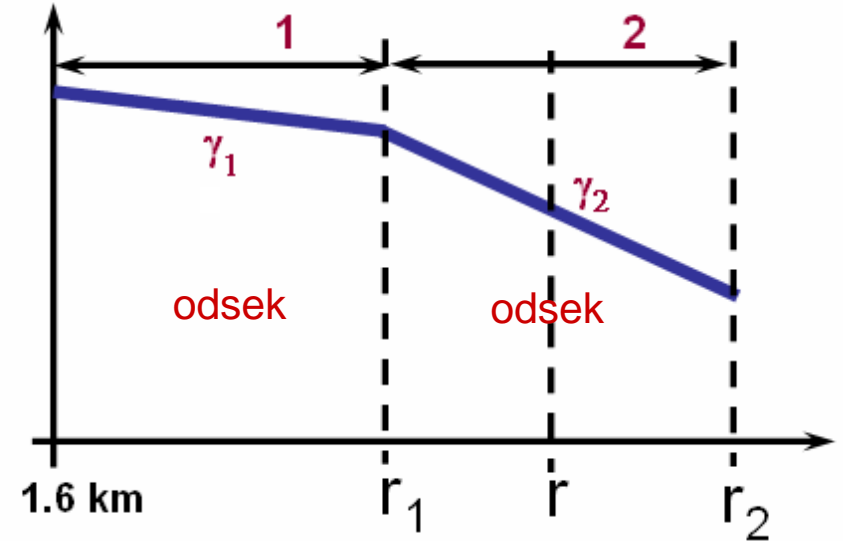
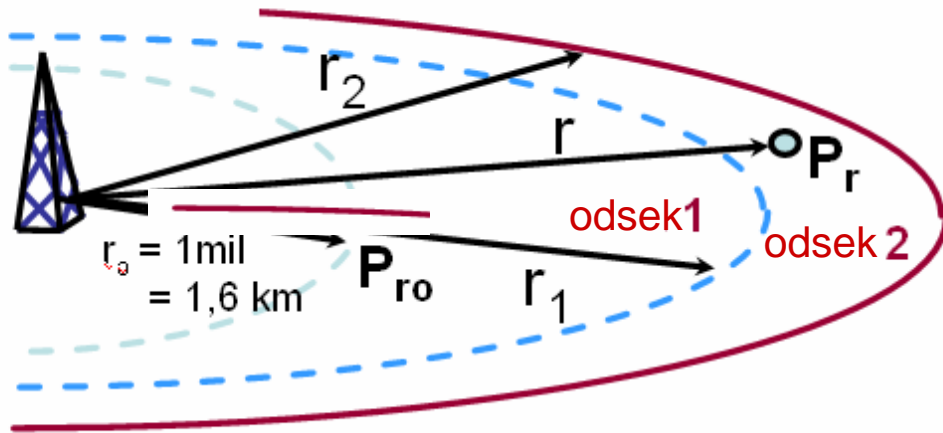
Slabljenje $10 \log(P_2/P_1)$ izražamo pri $n_1 = 2$ in $r > R$ v lomljeni ali zglajeni obliki:

$$L_{dB} = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 20 \log R + 10n_2 \log\left(\frac{r}{R}\right)$$

$$L_{dB} = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 20 \log R + 10(n_2 - 2) \log\left(1 + \frac{r}{R}\right)$$



Posplošeni model potenčnega upadanja

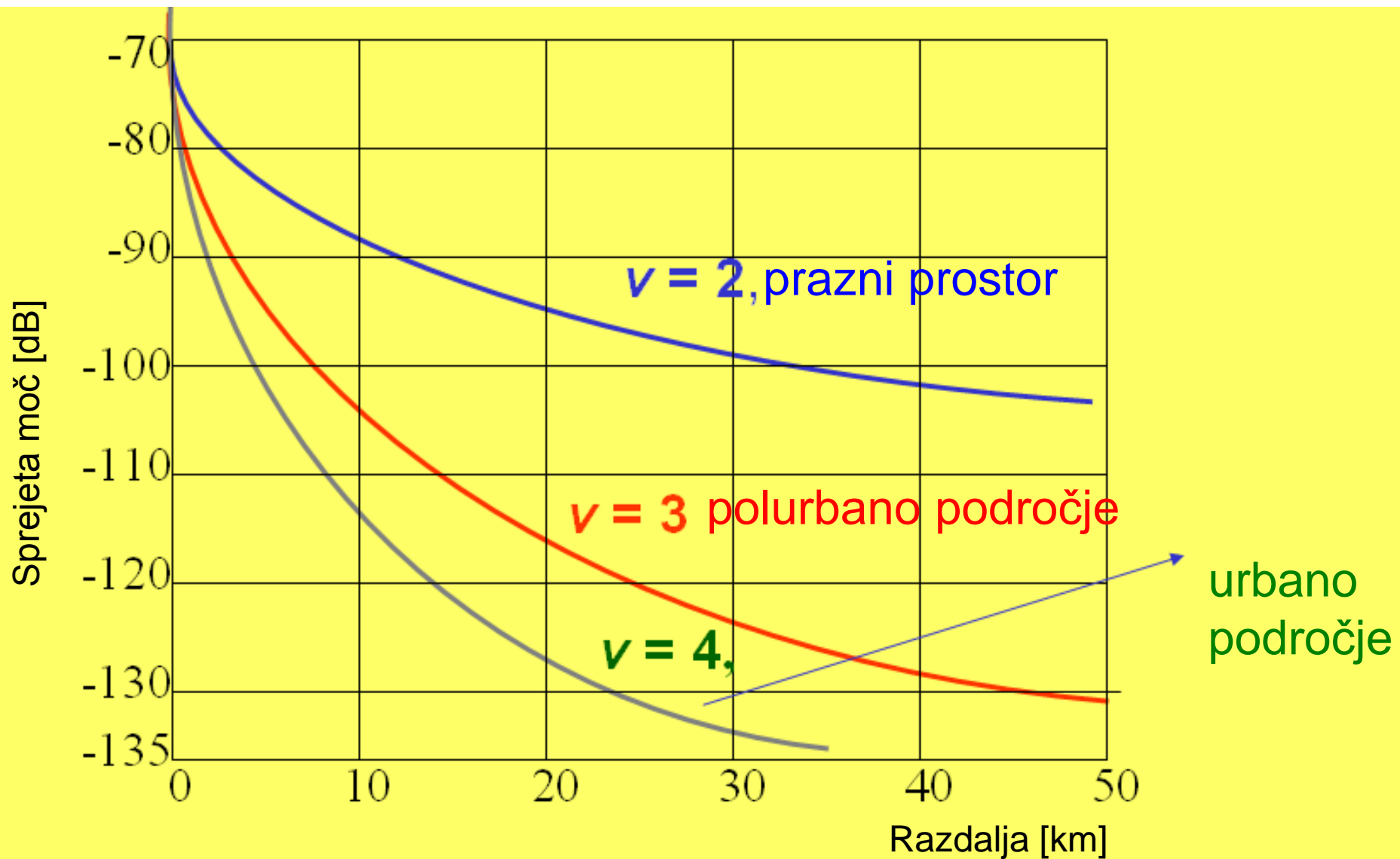


$$P_r = P_{ro} \cdot \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^{-\gamma_1} \cdot \left(\frac{r}{r_1}\right)^{-\gamma_2} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-n} \cdot \alpha_0$$

$$\alpha_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5$$

$$P_r = P_{ro} \cdot \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^{-\gamma_1} \cdot \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{-\gamma_2} \cdot \dots \cdot \left(\frac{r}{r_{N-1}}\right)^{-\gamma_N} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-n} \cdot \alpha_0$$

Sprejeta moč – linearna razdalja



Primer eksponenta slabljenja

| Environment | Path loss exponent, n |
|-------------------------------|-------------------------|
| Free space | 2 |
| Ideal specular reflection | 4 |
| Urban cells | 2.7 - 3.5 |
| Urban cells (shadowed) | 3 - 5 |
| In building (line of sight) | 1.6 - 1.8 |
| In building (obstructed path) | 4 - 6 |
| In factory (obstructed path) | 2 - 3 |

Ercegov dvopotenčni model 1/2 (IEEE802.16d)

- Bazna antena nad tlemi ($h_1=10-80\text{m}$), mobilna antena na višini ($h_2=2-10\text{m}$), referenčna dolžina 100 m
- 3 kategorije terena:
 - A - gričevnat ali hribovit gosto pogozden teren
 - B - teren srednje kategorije
 - C - raven redko pogozden teren

| Model Parameter | Terrain Type A | Terrain Type B | Terrain Type C |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| a | 4.6 | 4.0 | 3.6 |
| b | 0.0075 | 0.0065 | 0.005 |
| c | 12.6 | 17.1 | 20 |
| σ | 10,6 | 9,4 | 8,2 |

Ercegov dvopotenčni model 2/2

$$L = L_0 + 10n \log(d/d_0) + 6 \log(f_{\text{MHz}}/2000) + \Delta L_f + \Delta L_{hm} + \sigma, \quad d > d_0, \quad \text{kjer je:}$$

$L_0 = 20 \log(4\pi d_0/\lambda)$, osnovno slabljenje; $d_0 = 100$ m, ref. razdalja

$n = a - b h_m + c/h_m$, potenca upadanja z razdaljo, a, b, c konst.

Podatki:

- Kategorija terena (A,B,C)
- Frekvenca (f_{MHz})
- Veljavnost za razdaljo $d > d_0$ (m)
- Višina mobilne antene h_m (m)

Popravki za frekvenco f in višino h_2 :

$$\Delta L_f = 6 \log(f/2000)$$

$$\Delta L_{hm} = -10,8 \log(h_m/2), \text{ za A,B}$$

$$\Delta L_{hm} = -20 \log(h_m/2), \text{ za C}$$

Omejitve za višino bazne in mobilne antene:

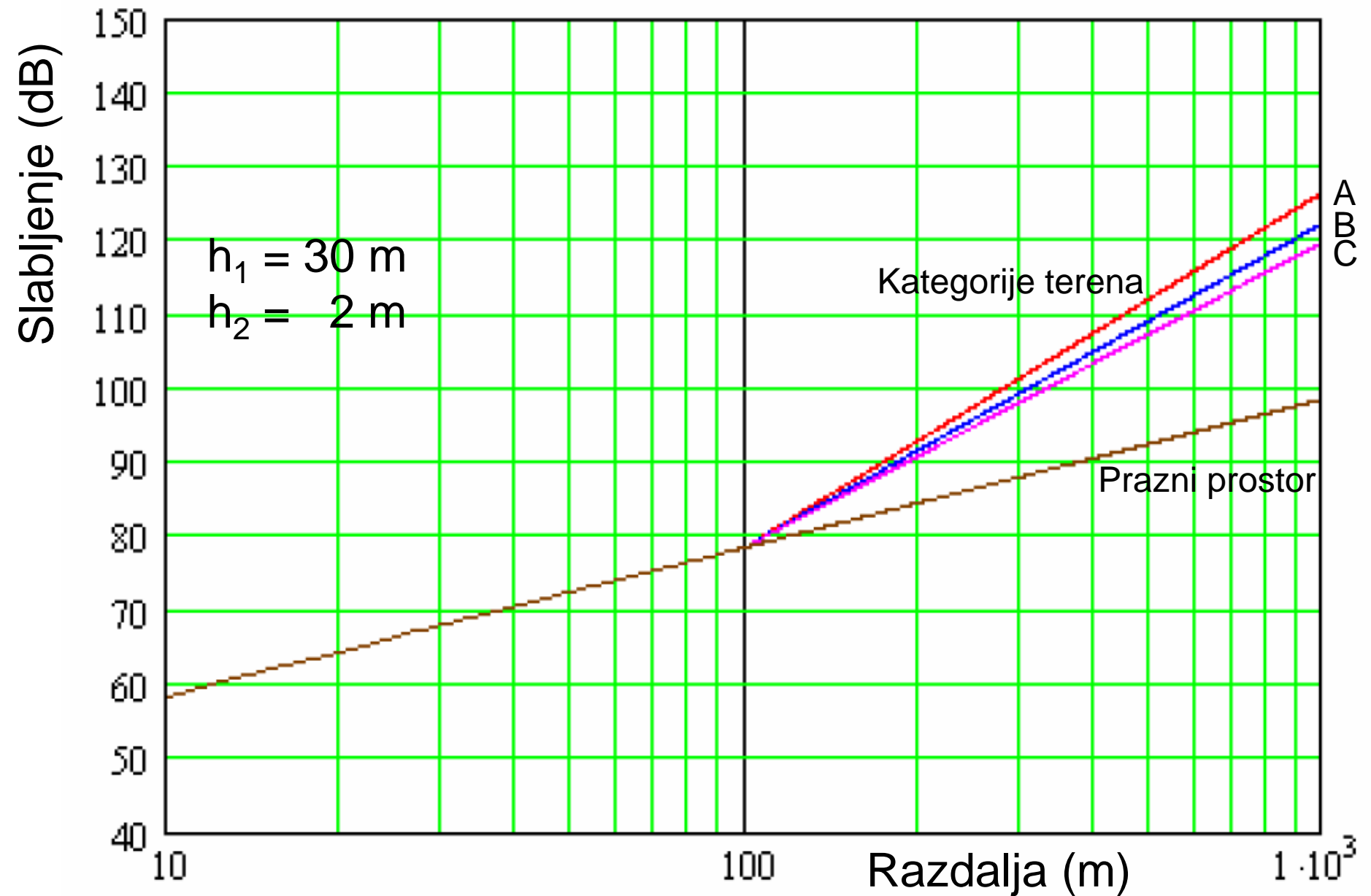
- $h_b = 10-80$ m, $h_m = 2-10$ m

Variabilnost:

σ ...standardna deviacija

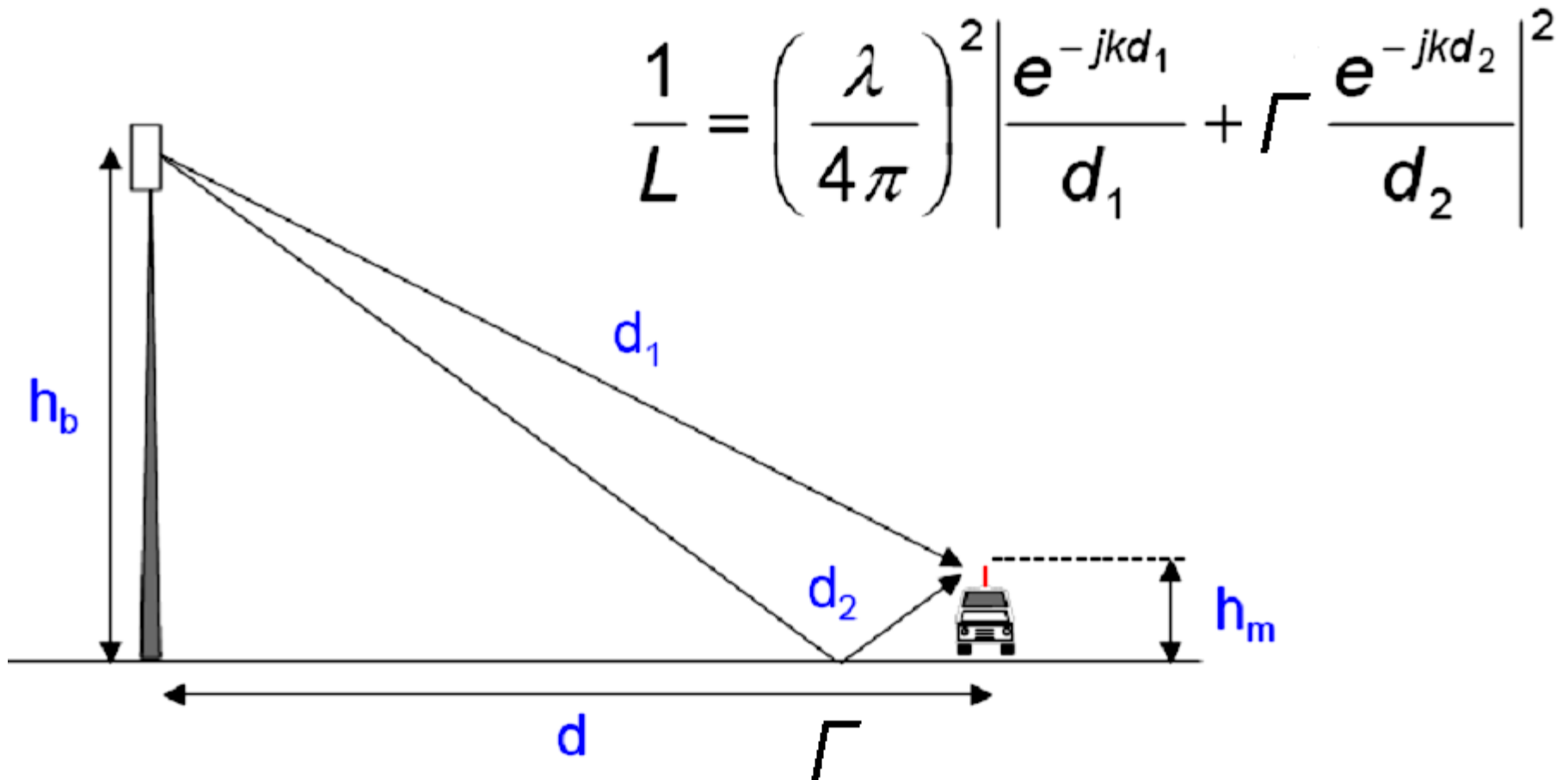
Model je bil preizkušan na terenih v ZDA pri frekvenci 1.900 MHz.

Ercegov dvopotenčni model



Odbojni modeli

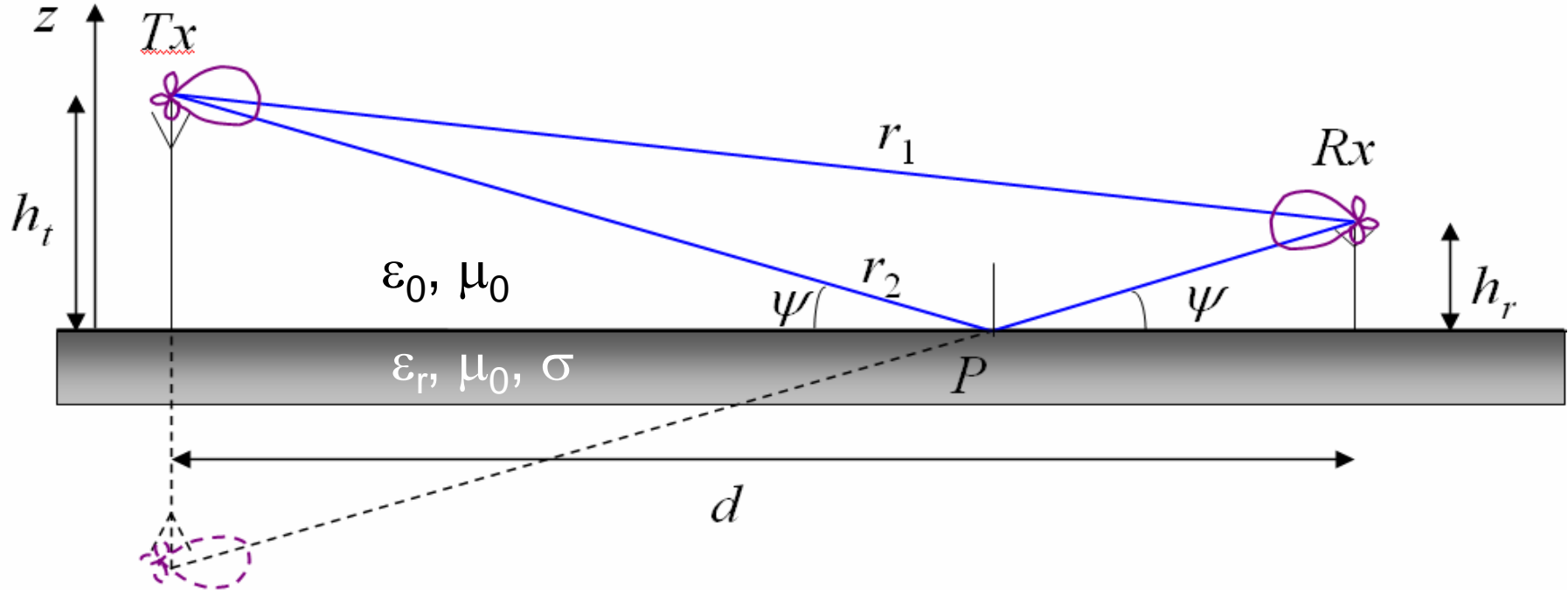
Upoštevajo slabljenje, ki ga prinaša odboj od tal, med podatke vključujejo višino bazne in mobilne antene ter nekatere podatke o kategoriji terena.



LOS z odbojem

$$L(\text{dB}) \approx 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) - 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \right)$$

$$L(\text{dB}) \approx 40 \log_{10} d - 20 \log_{10} h_t - 20 \log_{10} h_r$$



Model, veljaven nad 30 MHz, je neodvisen od frekvence (pod 30 MHz se začanja pojavljati zemeljski val).

Youngov model

$$L_{\text{dB}} = 120 + G_{1\text{db}} + G_{2\text{dB}} + 20 \log (h_b h_m / d^2) + \beta_{\text{dB}}$$

Dobitek bazne antene $G_{1\text{db}}$

Dobitek mobilne antene $G_{2\text{db}}$

Višina bazne antene h_b v m

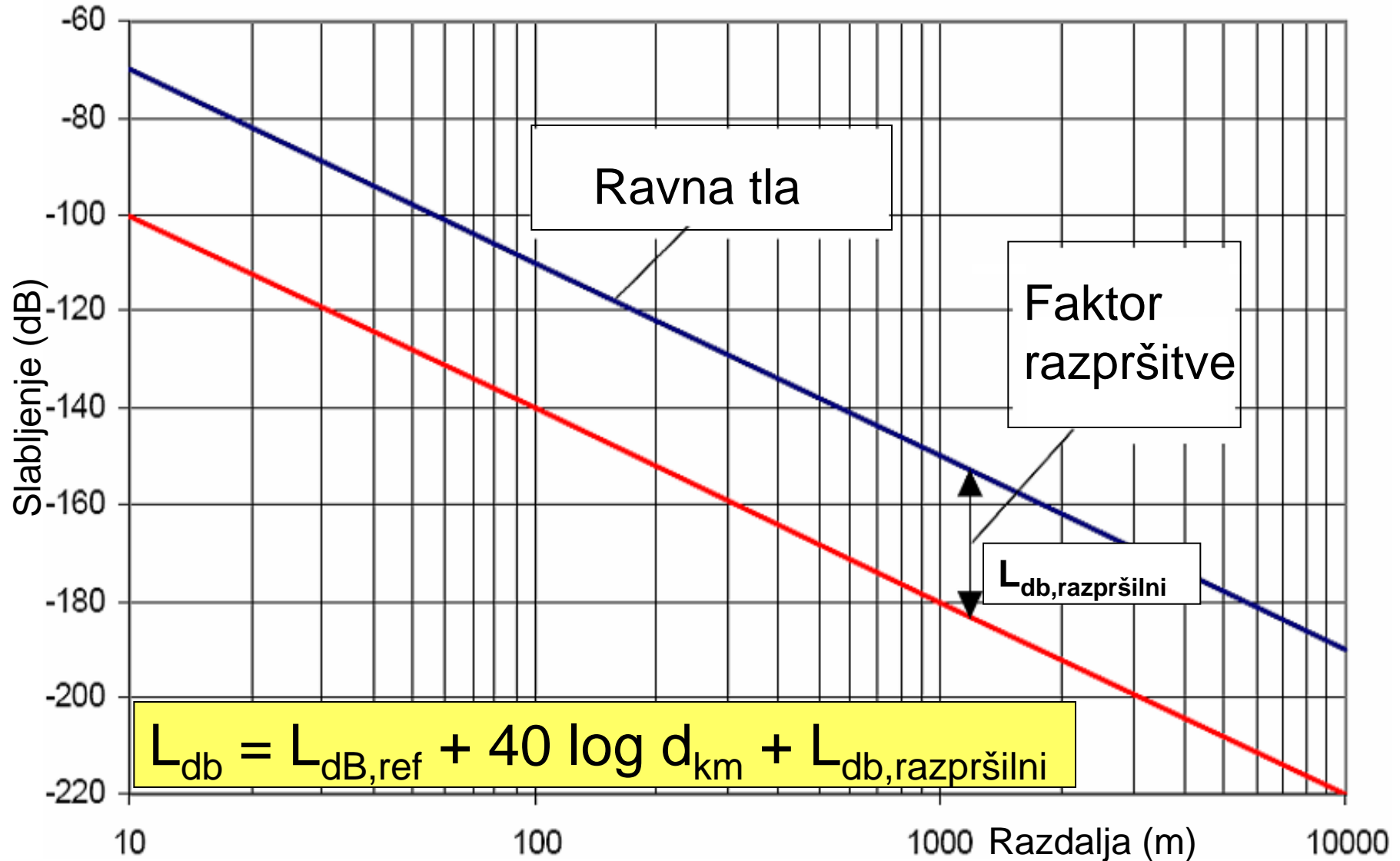
Višina mobilne antene h_m v m

Razdalja d v km

Faktor razpršitve β , prilagojen okolju

Enopotenčni model ($n=4$) je bil izdelan na primeru New Yorka

Youngov model



Slabljenju na terenu ($n=4$), dodamo faktor razpršitve L_{dB} , ki ni odvisen od d .

Eglijev odbojni model

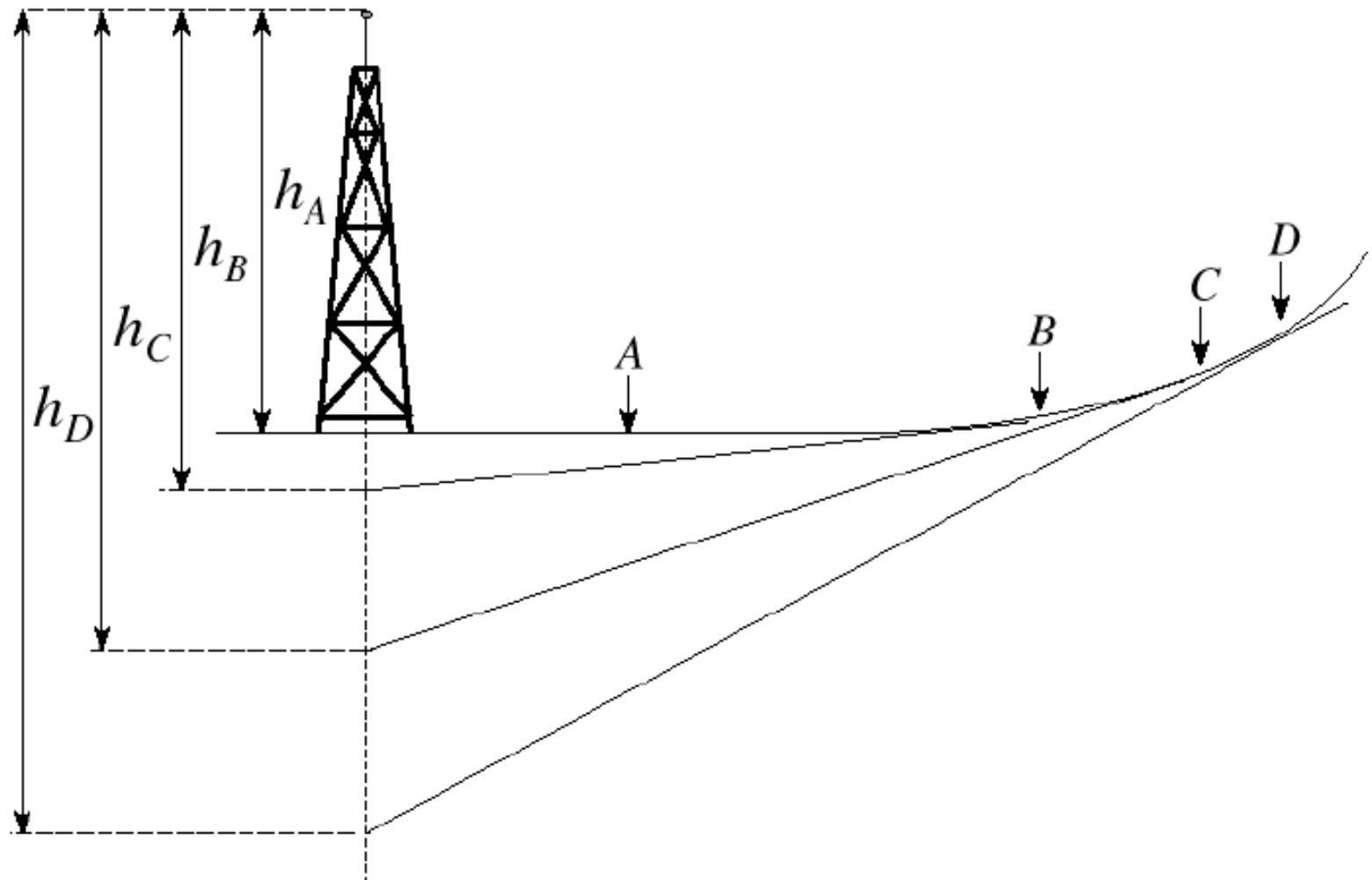
- Polempirični model, ki izhaja iz modela odboja na rahlo valovitih (20 m) neporaščenih tleh in uvaja odvisnost od frekvence.

$$L_{\text{dB}} = 120 + 40 \log d_{\text{km}} + 20 \log (f_{\text{MHz}}/40) - 20 \log h_b - 20 \log h_m + \text{razpršitev (20 dB)}$$

- Standardna deviacija $\sigma = 12$ dB.
- Uporaba omejena na: $d_{\text{km}} = 1 - 50$, $f_{\text{MHz}} = 30 - 1000$.
- Razlika med tem slabljenjem in slabljenjem v praznem prostoru je: $\Delta L_{\text{dB}} = 55,5 + 20 \log d_{\text{km}} - 20 \log (h_b h_m) + \text{razpršitev}$

Model je bil preizkušen na centralnem ravninskem področju ZDA.

Efektivna višina bazne antene glede na nagib terena ob mobilni anteni



Leejev model točka-točka 1/2

$$L = L_0 + \gamma \log d_{\text{km}} - 10 (\log f_{\text{MHz}} - 2 \log(h_{\text{ef},m}/30))$$

Referenčno slabljenje:

$$L_0 = G_1 + G_2 + 20 (\log \lambda_m - \log d_{\text{km}}) - 22$$

$$G_1 + G_2 \text{ [dBi]}$$

Korekcijski faktor:

$$F = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5$$

Leejev model točka-točka 2/2

Vhodni podatki:

- Koeficient strmine upadanja polja γ
 - Razdalja d v km
 - Efektivna višina terena h_{ef} , v m
 - Korekcijski faktor F
 - višina bazne antene h_b v m
 - Dobitek bazne antene G_1 v dBi
 - Višina mobilne antene h_m v m
 - Dobitek mobilne antene G_2 v dBi
 - Frekvenca f v MHz
-

Popravki:

- Višina bazne antene $K_1 = (h_b/30,48)^2$
- Dobitek bazne postaje $K_2 = (G_1/4)$
- Višina mobilne antene $K_3 = h_m/3, h_m > 3$
 $(h_m/3)^2, h_m < 3$
- Dobitek mobilne antene $K_4 = G_2$
- Frekvenčna korekcija $K_5 = (f/900)^{-n}, n=2-3$

Višina bazne antene h_b :

Višina nad terenom, ki ga dobimo z ekstrapolacijo terena okoli mobilne antene (slika)

Model je prilagojen za frekvenčno območje 900 MHz.

Leejev empirični model za makrocelice

Lee model is a power law model with parameters taken from measurements in a number of locations

$$P_R = -61.7 - 38.4 \log R - n \log \left(\frac{f}{900} \right) + \alpha_0 \quad \textit{suburban}$$

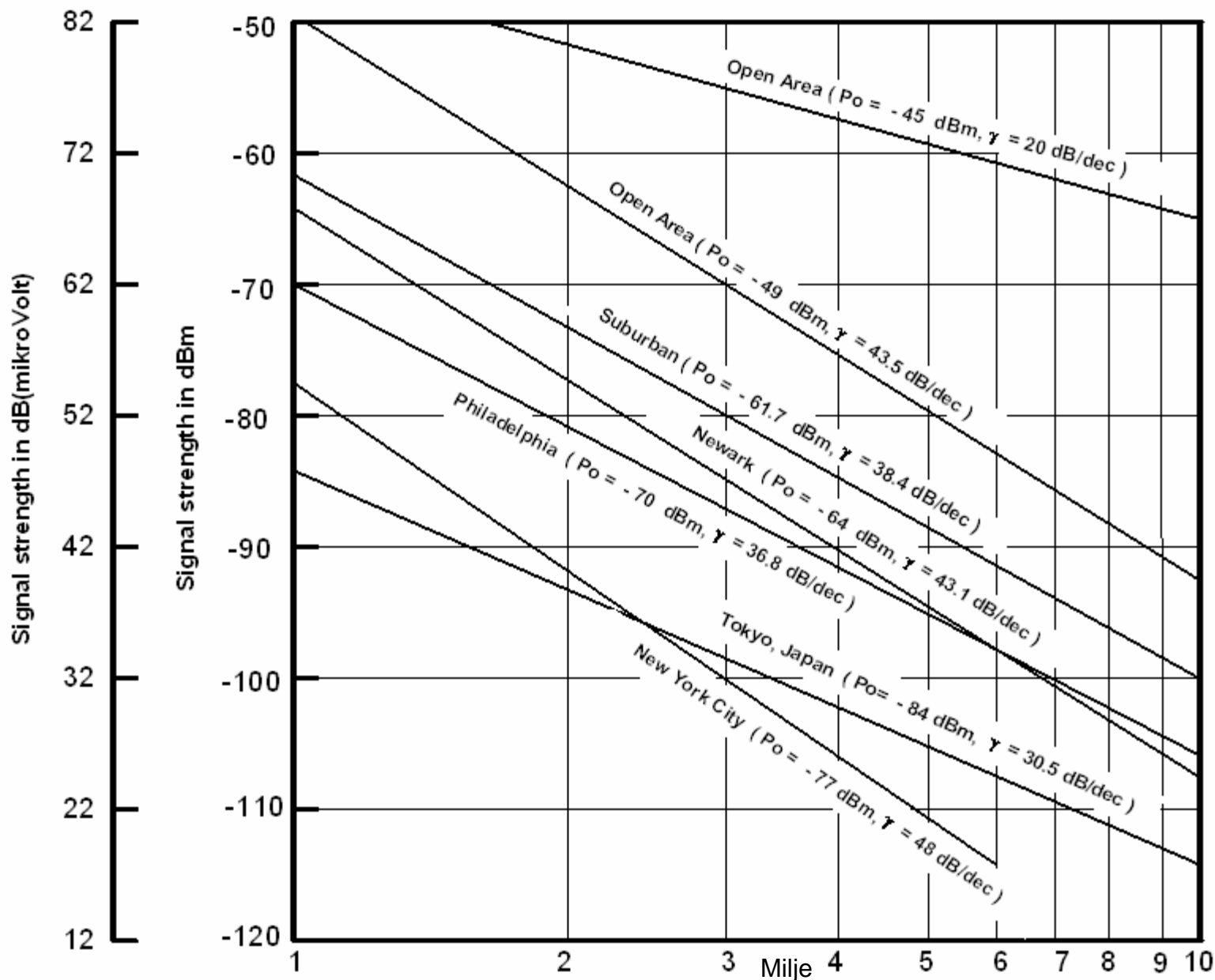
$$P_R = -70 - 36.8 \log R - n \log \left(\frac{f}{900} \right) + \alpha_0 \quad \textit{Philadelphie}$$

$$P_R = -64 - 43.1 \log R - n \log \left(\frac{f}{900} \right) + \alpha_0 \quad \textit{Newark}$$

$$\alpha_0 = 20 \log \left(\frac{h_b}{100} \right) + 10 \log \left(\frac{P_T}{10} \right) + (G_b - 6) + G_m + 10 \log \left(\frac{h_m}{10} \right)$$

h_b, h_m in feet; P_T in Watts, f in MHz, R in miles ($R > 1$ mile)

Leejev model predikcije v ZDA



Model Longley-Rice – neregularni teren

Model obravnava:

- večkratni uklon na klinastih ovirah
- uklon na zaobljenih ovirah
- difrakcijo na neregularnem terenu
- slabljenje in razprševanje v troposferi
- slabljenje padavin
- polarizacijske pojave
- odboj od tal pri razliki dolžin žarkov $> \lambda/4$
- trase z radijsko vidljivostjo (dvožarkovni model)
- uklonske trase (2 oviri, nereg. teren)
- razpršilne trase pri veliki razdalji

Model temelji na:

- NBS Tech. Note 101, pt.1 in 2, 1967
- Podatkovna baza TAP (Terrain Analysis Package)
- PTP je novejša izboljšava programa

Vhodni podatki:

- frekvenca 20 MHz – 40 GHz
- razdalja 1 – 2000 km
- višina anten 0,5 – 300 m
- model reliefa
- površinska lomnost v N enotah
- klimatski pogoji

Izračunani podatki:

- efektivna višina antene h_{ef}
- parameter neravnosti terena Δh
- horizontna razdalja in horizontna elevacija

Izhodni podatki:

- odvisnost slabljenja od razdalje (do horizonta in preko) in smeri

Pomen:

- FCC uporablja model kot standard

Model ITU-R P. 370-7 (RTV distribucija)

Vhodni podatki:

- frekvenca VHF in UHF 30 – 1000 MHz (30 - 250MHz in 450 - 1000 MHz)
- razdalja 10 - 1000 km
- višina anten 37,5 – 1200 m in 1,5 – 40 m

Izračunani podatki:

- parameter neravnosti terena Δh

Izhodni podatki:

- Poljska jakost v dB glede na $\mu\text{V}/\text{m}$ (1kW, 1 - 50% časa, 50% lokacij, popravki) nad zemljo ali nad morjem

Uporaba:

- Radiodifuzija v zmernih klimatskih področjih pri normalnem atmosferskem lomu

Sorodni modeli:

ITU-R P.1146,
1000 - 3000 MHz

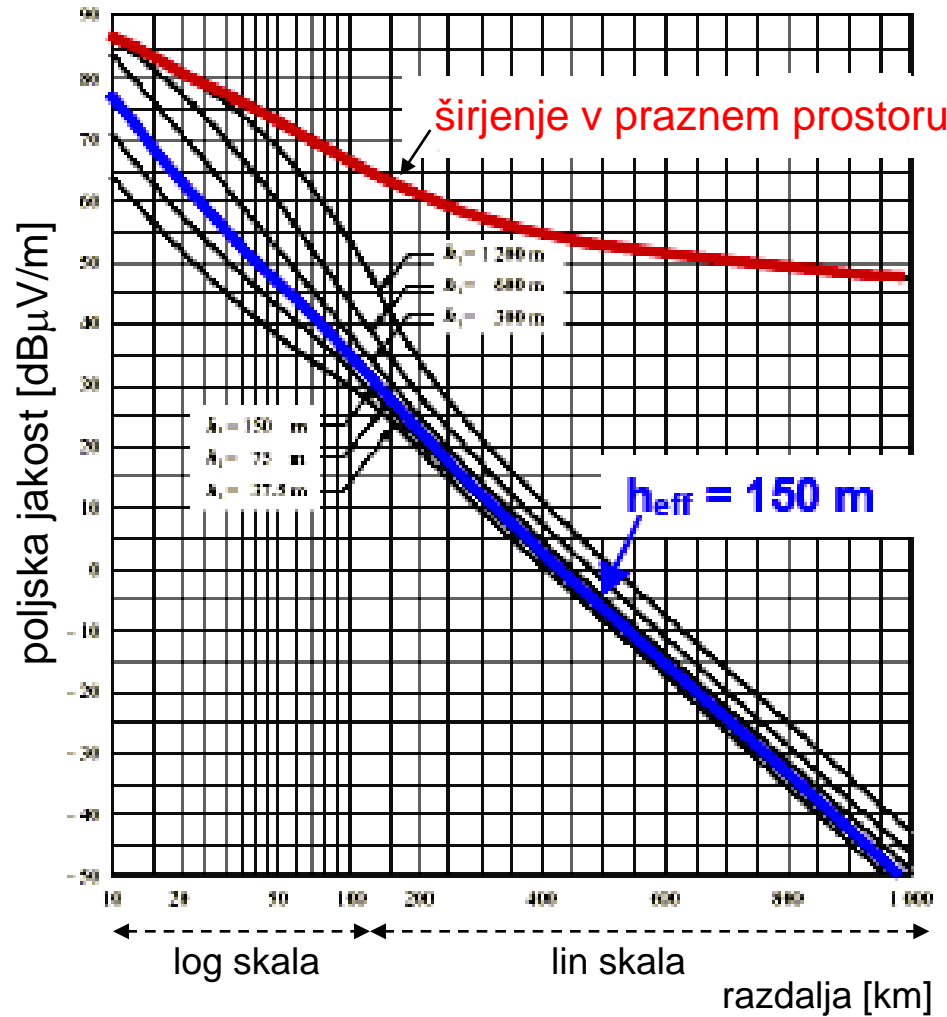
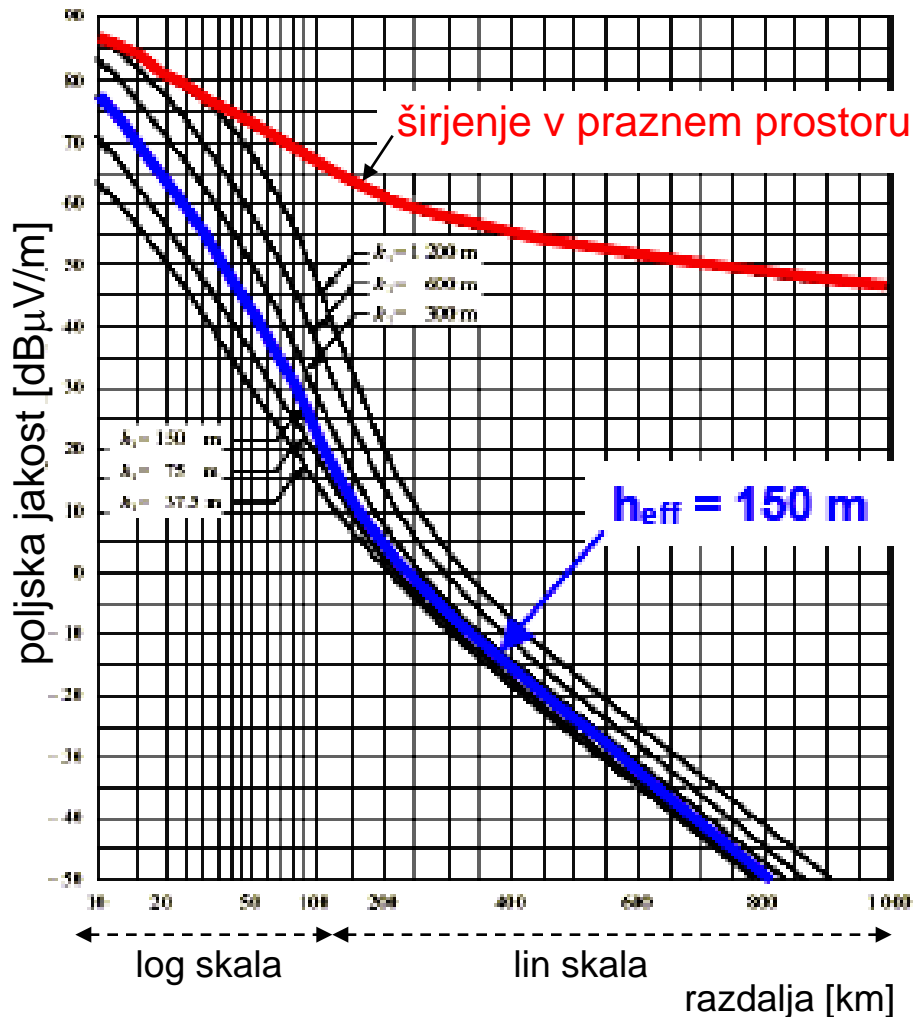
ITU-R P.1546,
30 – 3000 MHz

Model ITU-R P. 370-7 (RTV distribucija)

$f = 30 - 250$ MHz, $P = 1$ kW ($\lambda/2$ dipol), $H = 37,5 - 1200$ m, $h = 10$ m, $\Delta h = 50$ m, 50% lokacij

50 % časa

1 % časa



Model ITU-R P.526-8

Model temelji na teoretičnih izračunih uklonjenega polja.

Program določi velikost Fresnelove cone in površinsko **admitanco**.

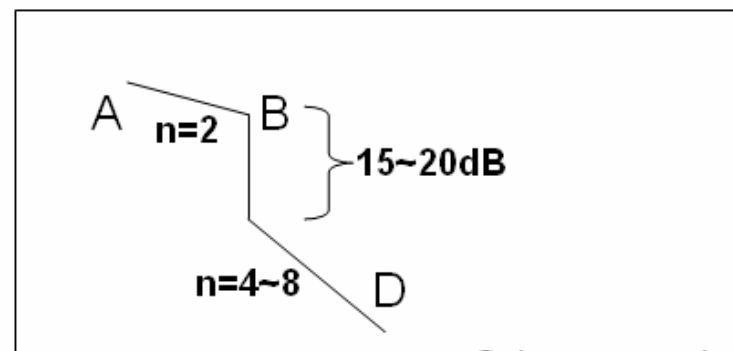
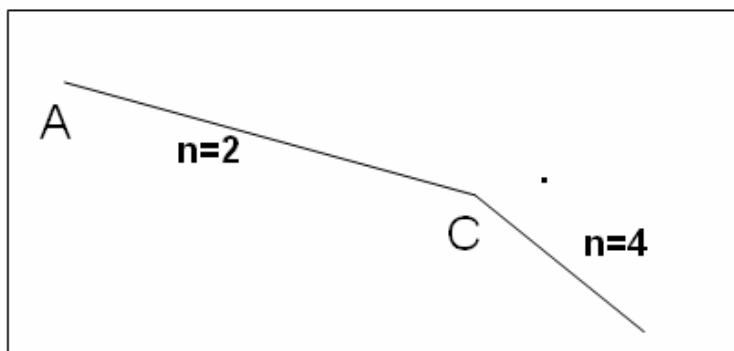
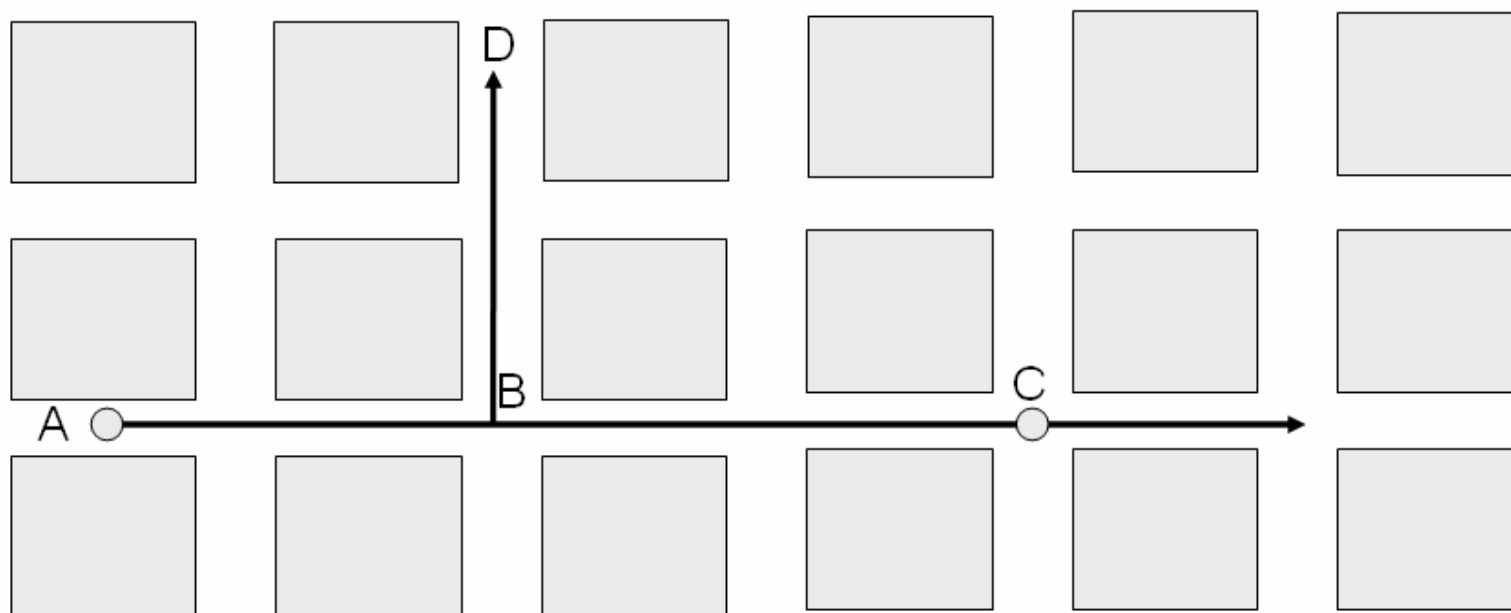
Vhodni podatki:

- Frekvenca 30 MHz – 15 GHz
- Razdalja 10 – 1000 km
- Višina anten nad tlemi 3 – 2000 m

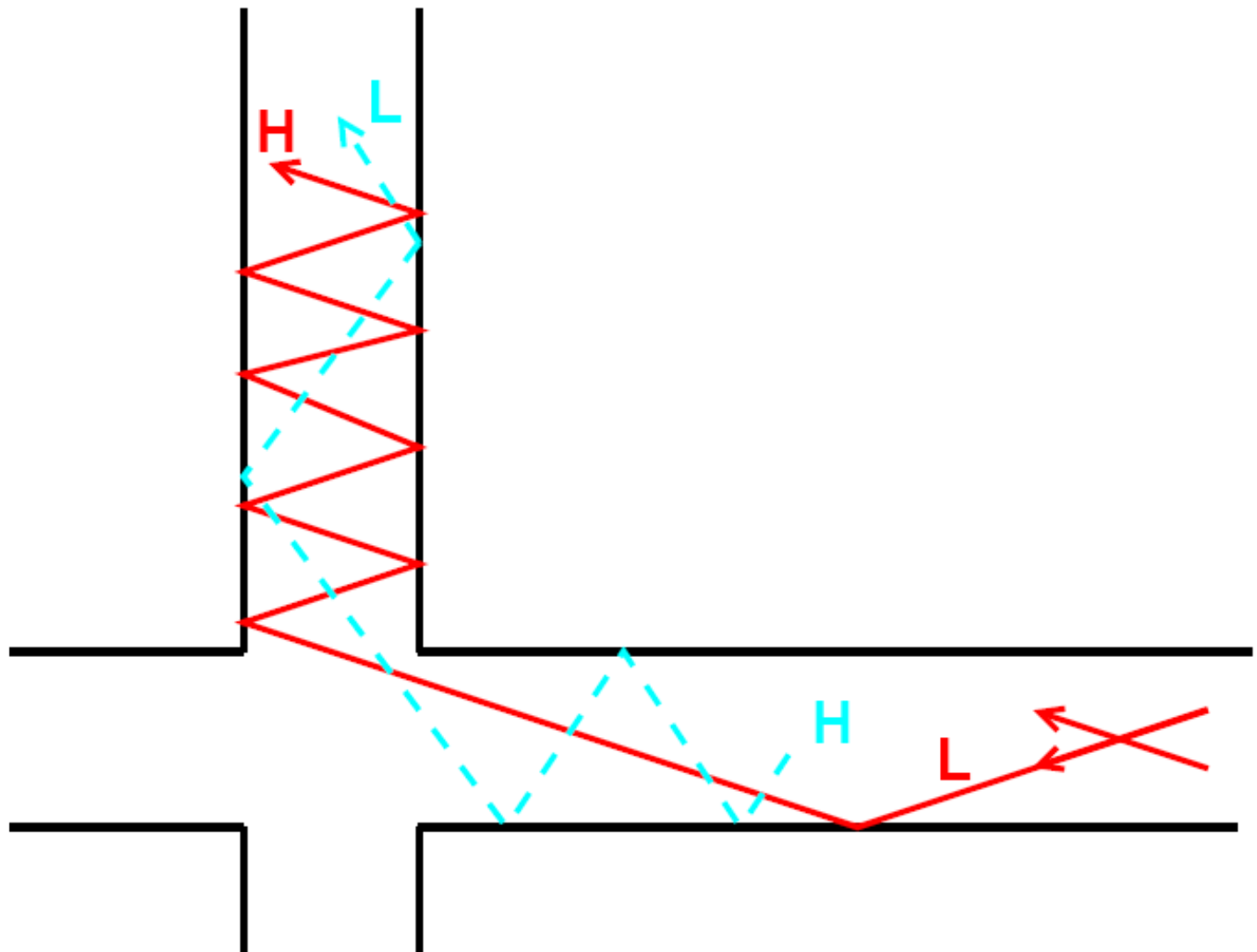
Izhodni podatki:

- Uklonsko slabljenje na zemljini obli pri HP in VP
- Uklonsko slabljenje na ovirah in neregularnem terenu
 - klinasta ovira
 - zaobljena ovira
 - dvojna ovira

Dvopotenčni model slabljenja vzdolž ulic v urbanem okolju

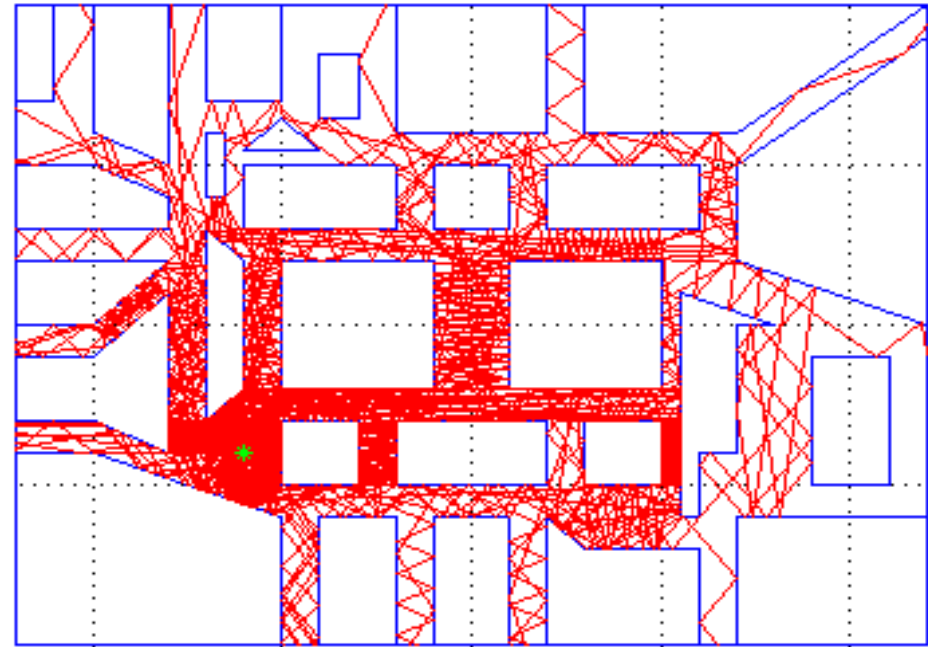
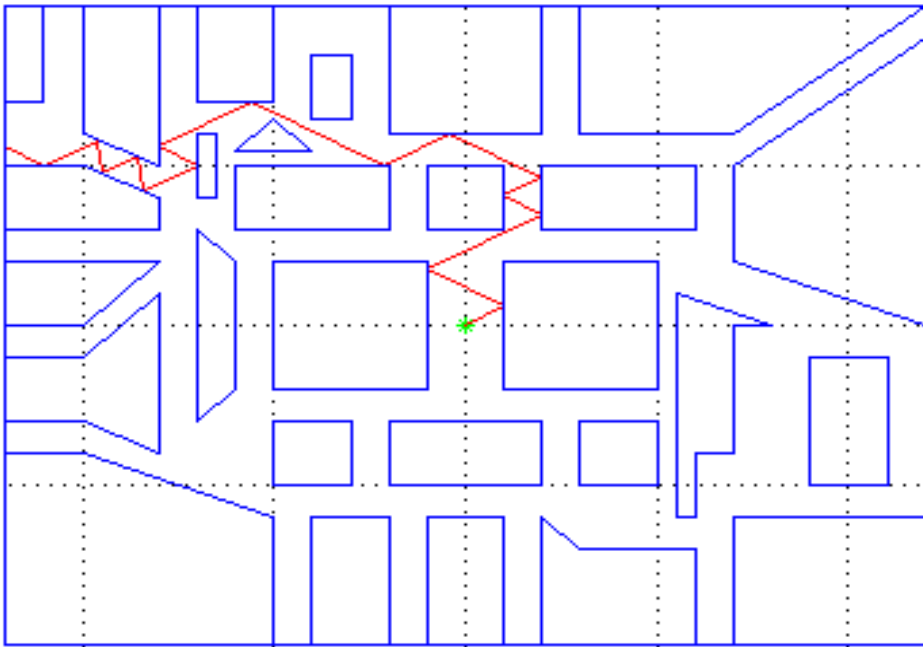


Ulični valovodni pojavi



Žarkovno sledenje v urbanem okolju - težavnost modela

Težavnost uporabe žarkovnih modelov v urbanem okolju



Model CCIR

- Manjše do srednje mesto:

$$L_{dB} = 69,55 + 26,16 \log f_{\text{MHz}} - 13,82 \log h_b - \\ - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log d_{\text{km}} - B$$

kjer so:

$$a(h_m) = (1,1 \log f_{\text{MHz}} - 0,7) h_m - (1,56 \log f_{\text{MHz}} - 0,8)$$

$$B = 30 - 25 \log(\% \text{ terena pokritega s stavbami})$$

h_b in h_m višina bazne in višina mobilne antene v m

- Pokritost 15%; $B = 0$
20%; $B = -2,5 \text{ dB}$

Okumura

Okumura – Hata

Hata

Model Okumura, 1968, (1/3)

- Umirjen teren (odprt, delno odprt, predmestni, mestni)
- $f = 100 - 3000$ MHz
- $d = 1 - 100$ km
- Ref. višina bazne antene $h_{br} = 200$ m (nad strehami!)
- Ref. višina mobilne antene $h_{mr} = 3$ m

$$L_{dB} = L_{0,dB} + A(f,d) - B(f,t) - K_1(h_b) - K_2(h_m)$$

L_0 ... osnovno slabljenje

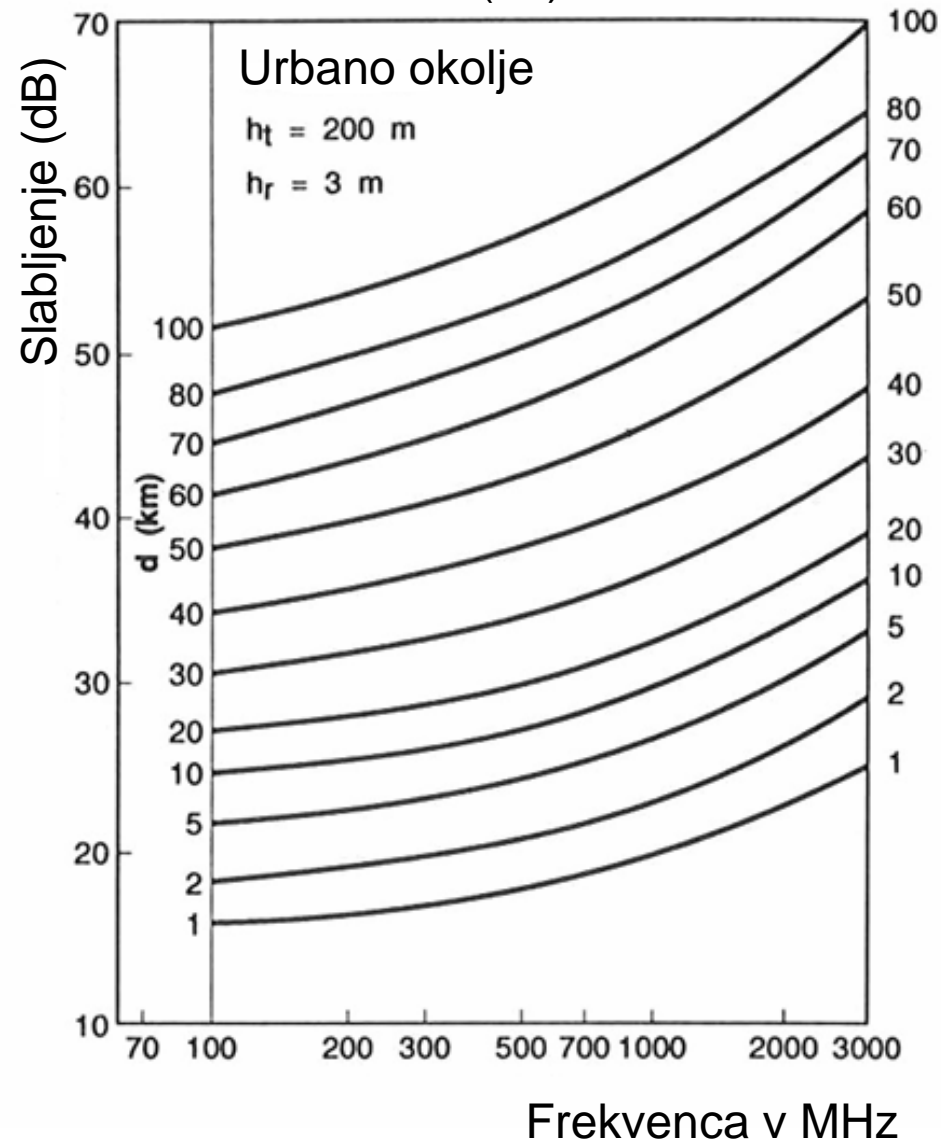
A ... popravek slabljenja odvisno od f in d

B ... Popravek slabljenja odvisno od frekvence
in vrste terena

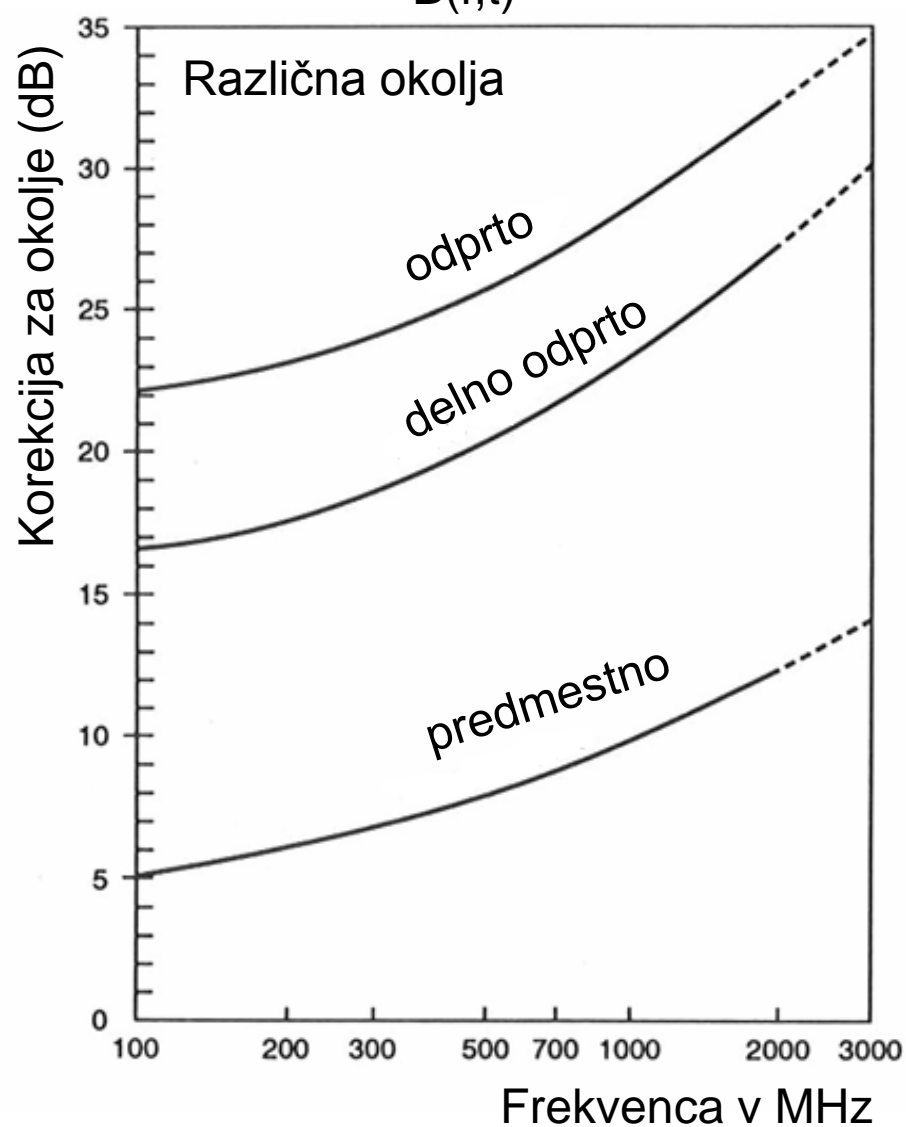
$K_1(h_b)$ in $K_2(h_m)$ korekcijska faktorja za višini anten

Model Okumura (2/3)

A(f,d)



B(f,t)



Model Okumura (3/3)

Korekcijski faktorji v dB za višino anten:

$$K(h_b) = 20 \log (h_b/200)$$

$$K(h_m) = 10 \log (h_m/3), \quad h_m < 3\text{m}$$

$$= 20 \log (h_m/3), \quad 3 < h_m < 10\text{m}$$

Model Okumura – Hata , 1980, 1/2

Značilnosti:

- **empirična metoda**
- podlaga so meritve Okumure na širšem področju Tokia (1968)
- numerični model dopolnil Hata
- preprosta in hitra metoda za grobo ocenitev pokritosti
- znaten pogrešek polja, zlasti na urbanem področju
- več kategorij zazidanosti področja
 - ruralno
 - predmestno
 - urbano (manjše, večje)

Vhodni podatki:

- frekvenca 150 MHz – 1500 MHz
- razdalja 1 – 20 km
- višina bazne antene 20 – 200 m
- višina mobilne antene 1 -10 m
- model ne uporablja podatkov o reliefu in drugih topografskih podatkov

Izhodni podatki:

- odvisnost slabljenja od razdalje
- slabljenje ni odvisno od smeri (pomanjkljivost metode)

Model Cost 231 Hata (model 2) je izboljšava modela Okumura – Hata za frekvence 150 do 2000 MHz

Model Okumura–Hata, 2/2

$$L_{dB} = A + B \log d - C$$

$$A = 69.55 + 26.16 \log f_{\text{MHz}} - 13.82 \log h_{\text{bm}}$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log h_{\text{bm}}$$

odprt prostor:

$$C = 4.78 (\log f_{\text{MHz}})^2 + 18.33 \log f_{\text{MHz}} + 40.94 + (1.1 \log f_{\text{MHz}} - 0.7) h_{\text{mm}} - (1.56 \log f_{\text{MHz}} - 0.8)$$

predmestje:

$$C = 2(\log(f_{\text{MHz}}/28))^2 + 5.4 + (1.1 \log f_{\text{MHz}} - 0.7) h_{\text{mm}} - (1.56 \log f_{\text{MHz}} - 0.8)$$

majhno mesto:

$$C = (1.1 \log(f_{\text{MHz}} - 0.7) h_{\text{mm}} - 1.56 \log(f_{\text{MHz}} - 0.8) + (1.1 \log f_{\text{MHz}} - 0.7) h_{\text{bm}} - (1.56 \log f_{\text{MHz}} - 0.8)$$

veliko mesto, objekti višji od 15 m, $f > 300$ MHz:

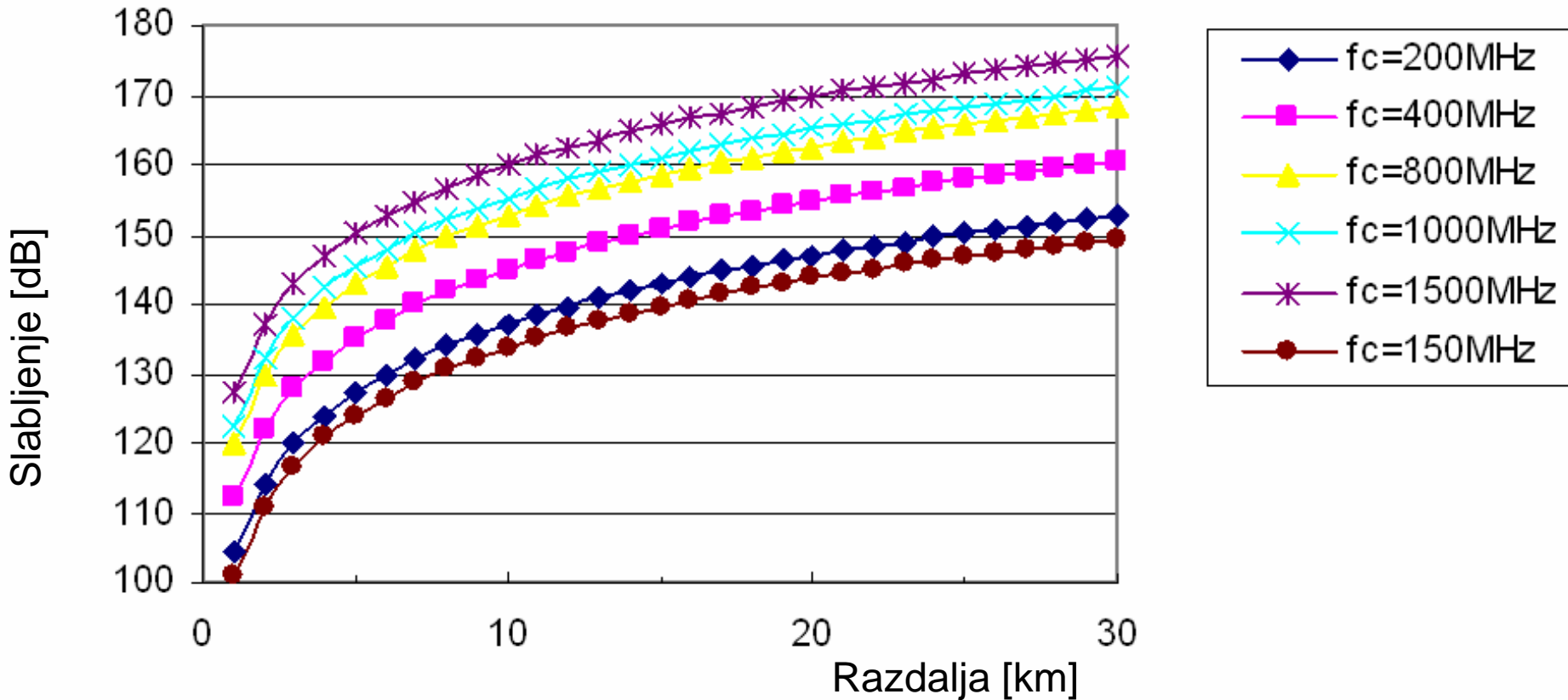
$$C = 3.2 (\log(11.75 h_{\text{mm}}))^2 - 4.97$$

veliko mesto, objekti višji od 15 m, $f < 300$ MHz:

$$C = 8.29 (\log(1.54 h_{\text{mm}}))^2 - 1.1$$

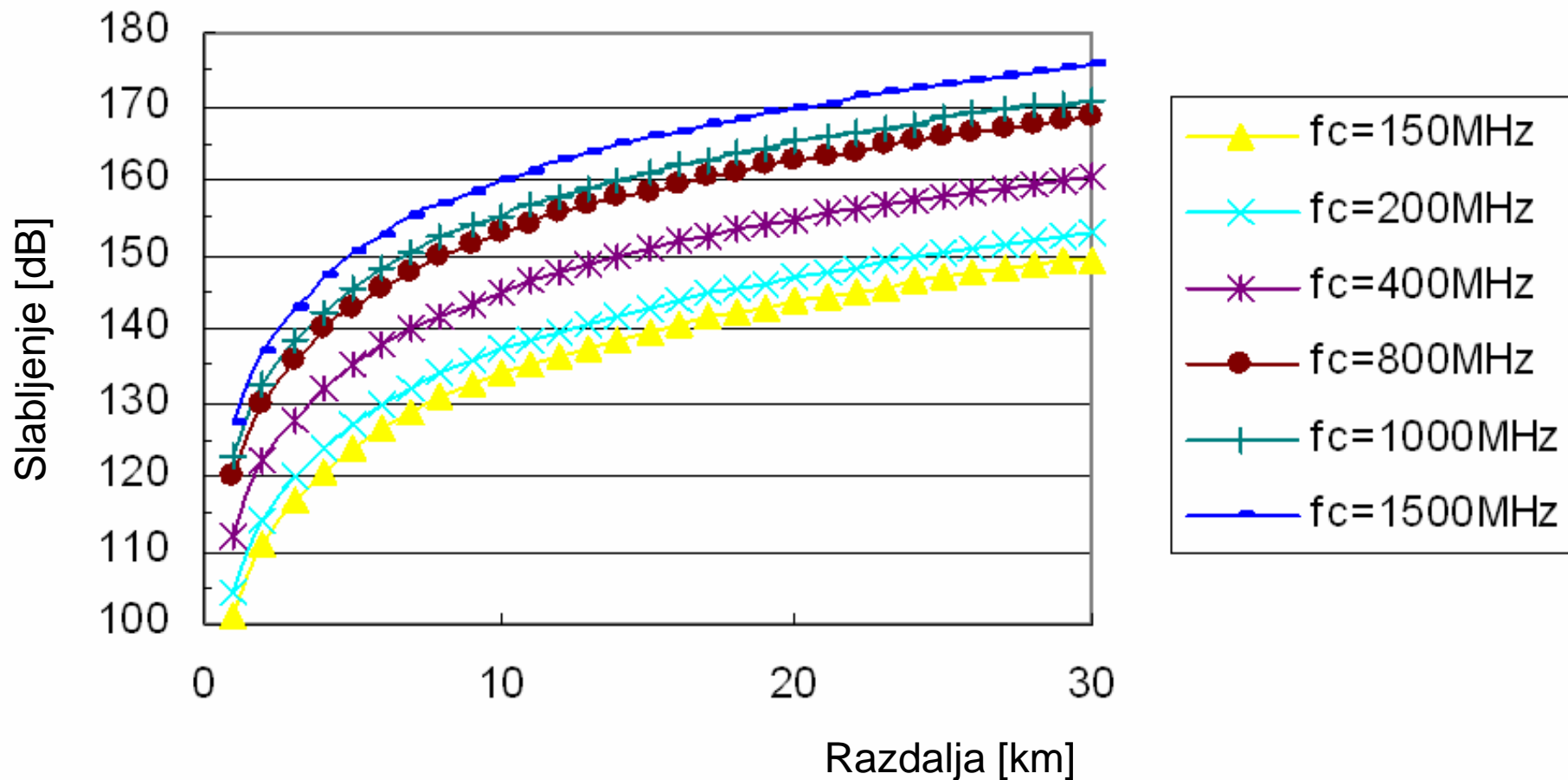
Primer Okumura-Hata (1/4)

Slabljenje na urbanem področju velikega mesta



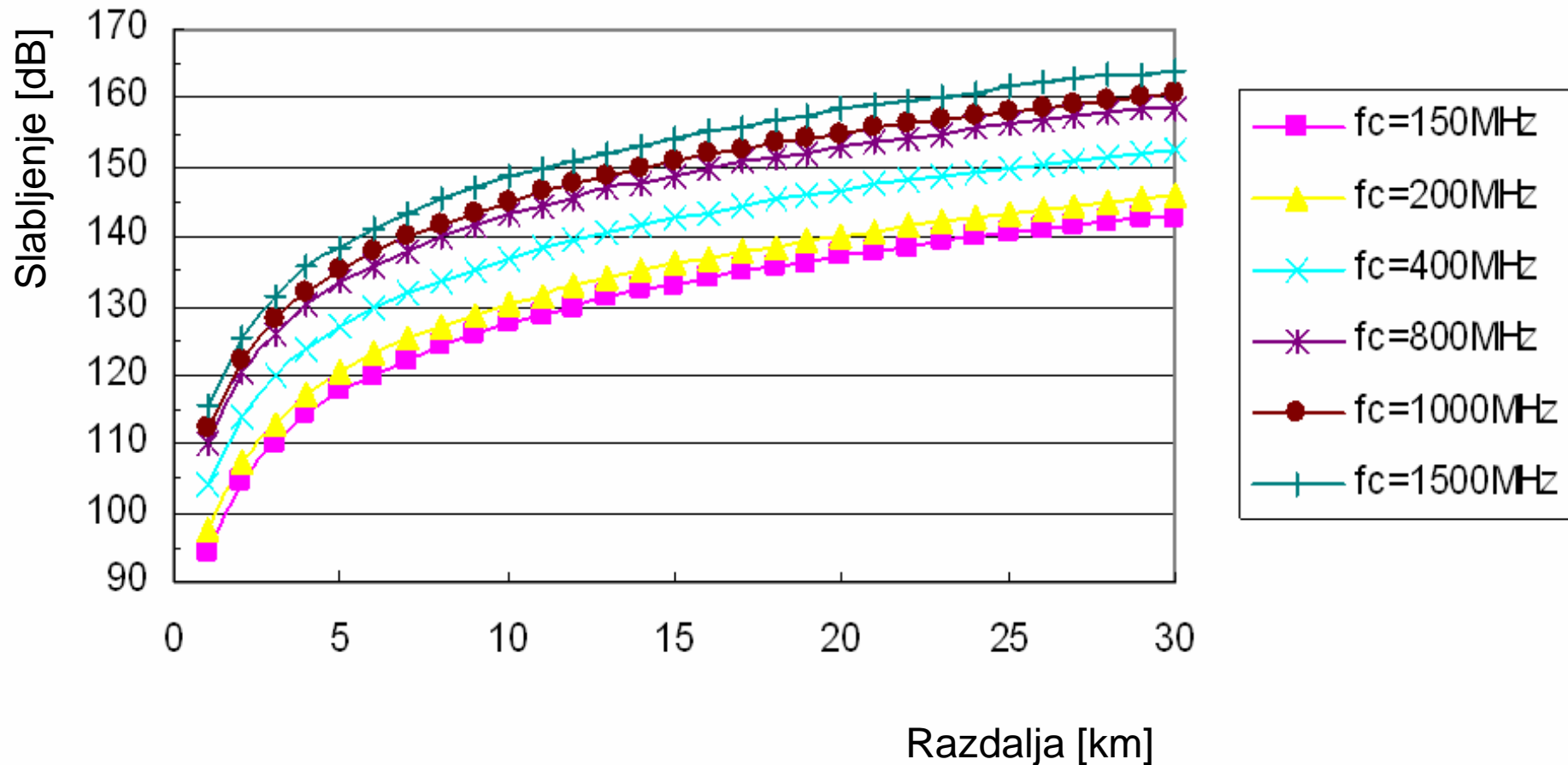
Primer Okumura-Hata (2/4)

Slabljenje na urbanem področju manjšega do srednjega mesta



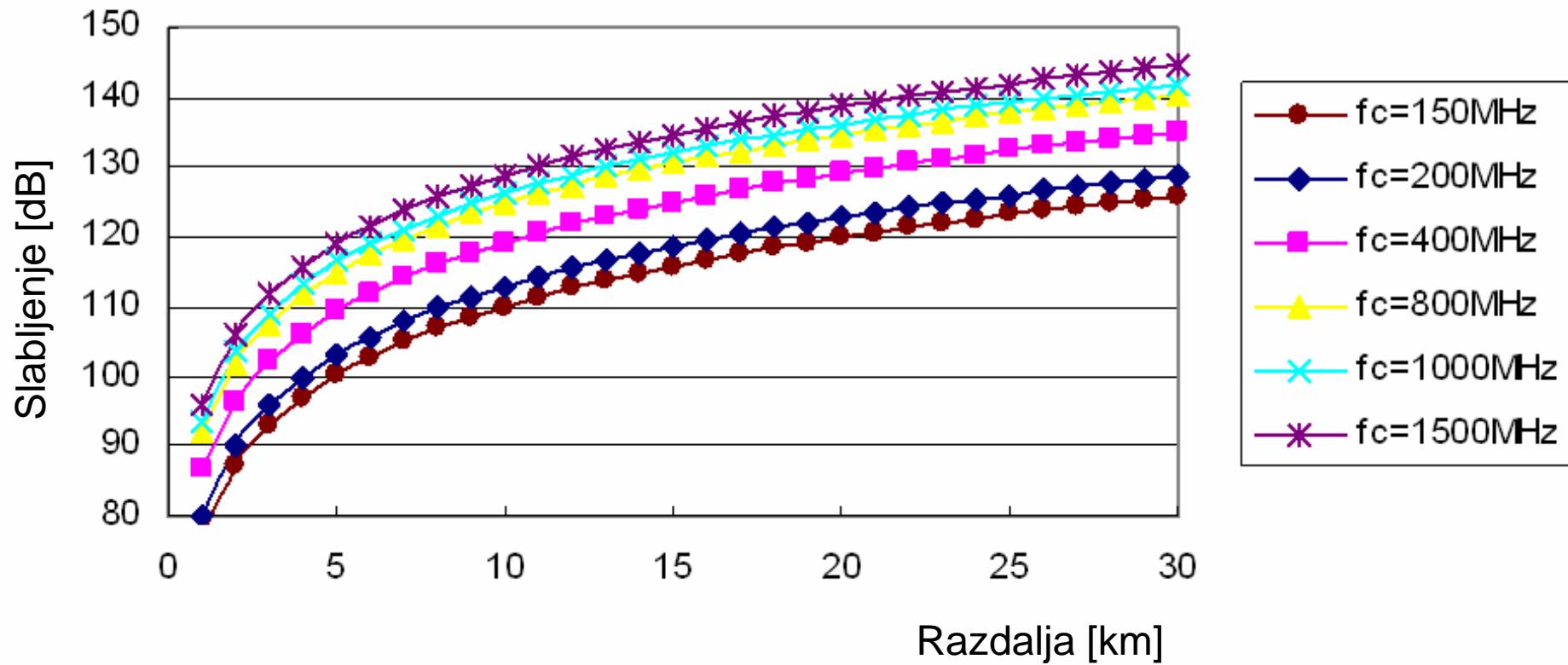
Primer Okumura-Hata (3/4)

Slabljenje na predmestnem področju



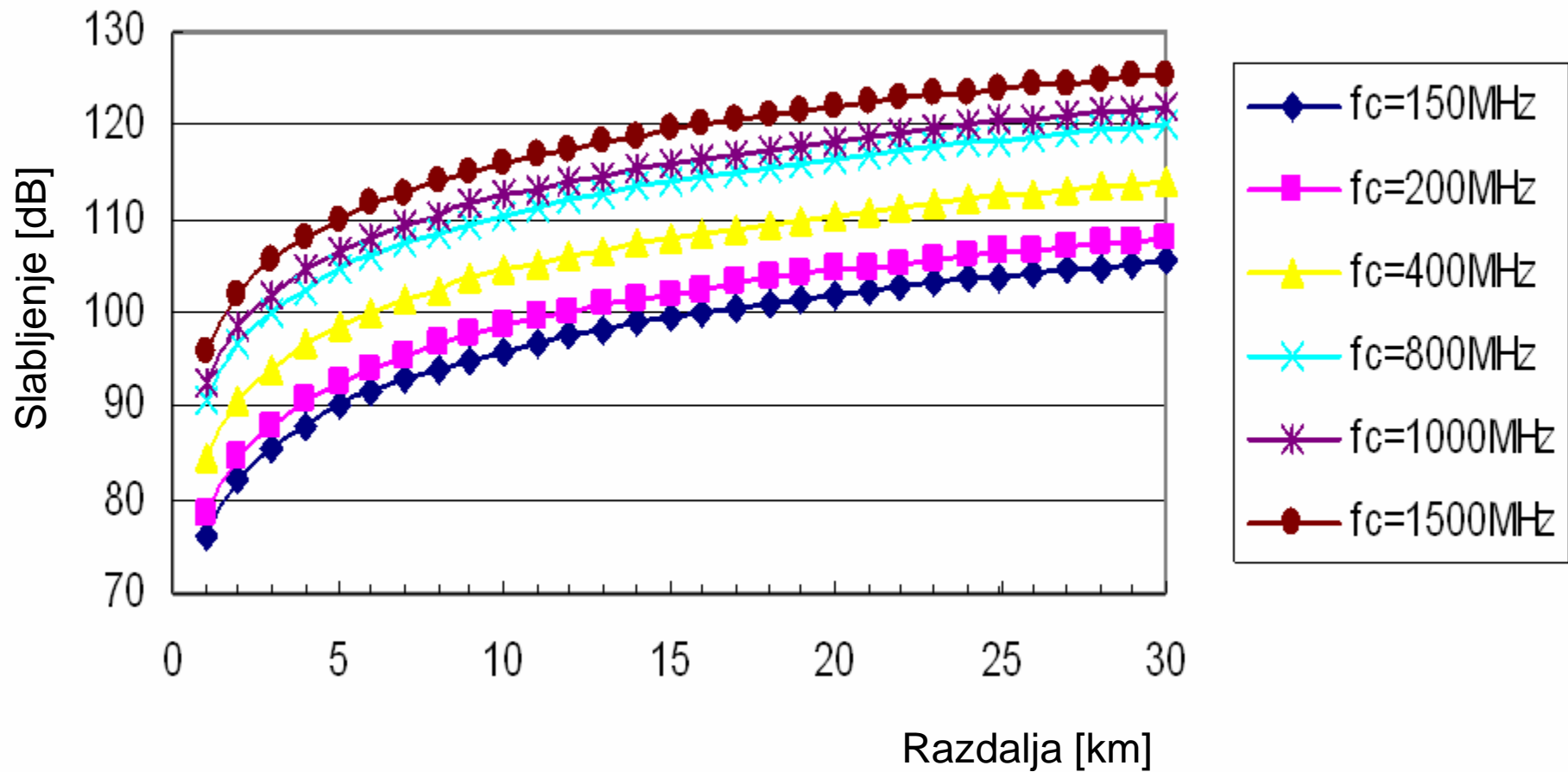
Primer Okumura-Hata (4/4)

Slabljenje na odprtem področju



Slabljenje v praznem prostoru

Slabljenje v praznem prostoru



Razširjen model COST 231 – Hata za urbana področja pri povišanih frekvencah (1999)

$$f_{\text{MHz}} = 1500 - 2000$$

$$h_{\text{bm}} = 30 - 200$$

$$h_{\text{mm}} = 1 - 10$$

$$d_{\text{km}} = 1 - 20$$

$$L = D + B \log d_{\text{km}} - E$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log h_{\text{b}}$$

$$C = 1,1 \log(f_{\text{MHz}} - 0,7)h_{\text{m}} - 1,56 \log(f_{\text{MHz}} - 0,8)$$

$$D = 46,3 + 33,9 \log f_{\text{MHz}} - 13,82 \log h_{\text{b}}$$

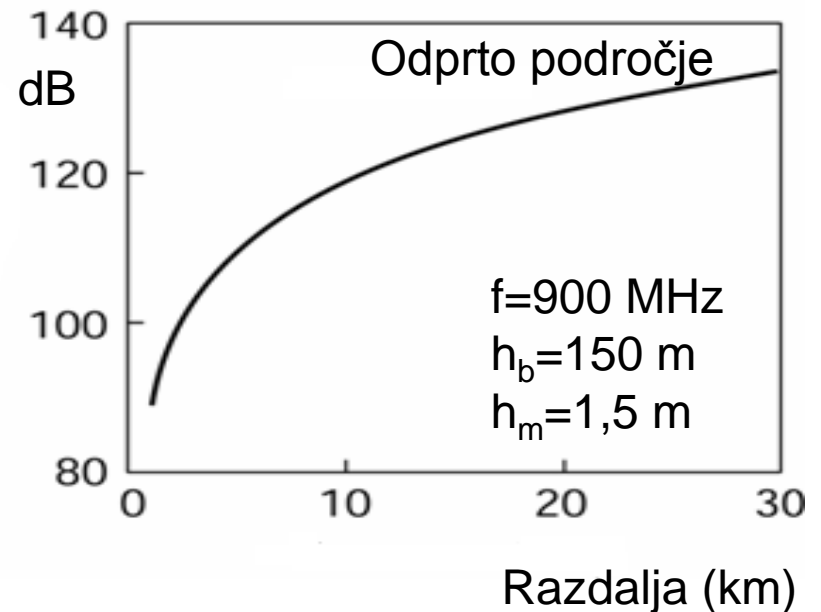
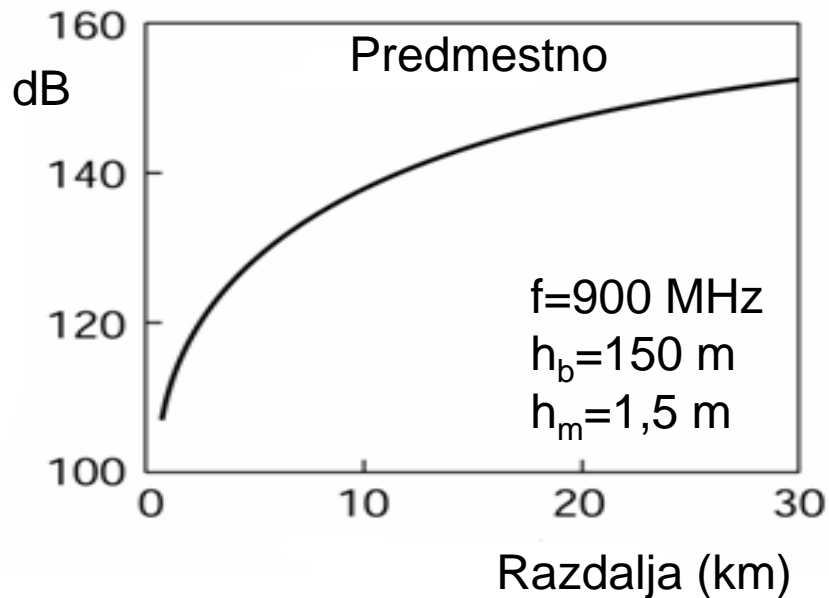
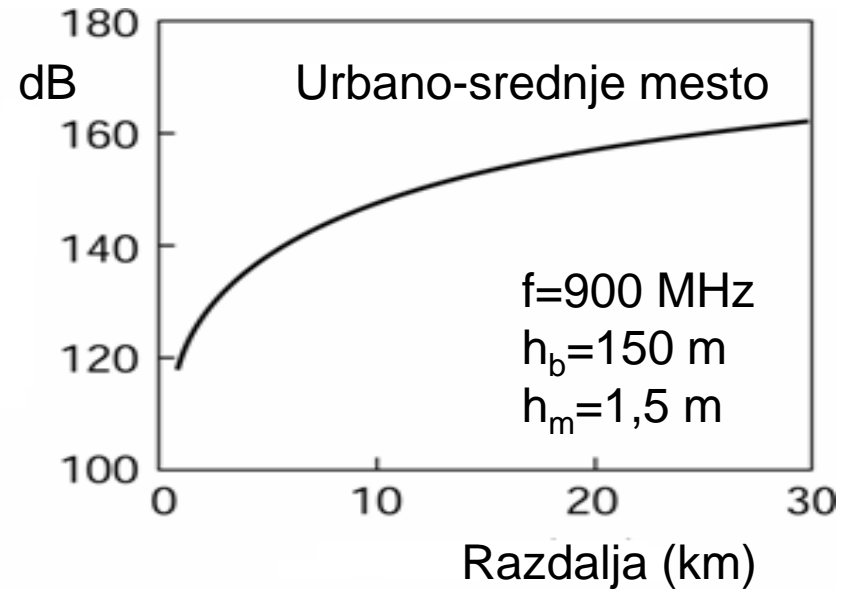
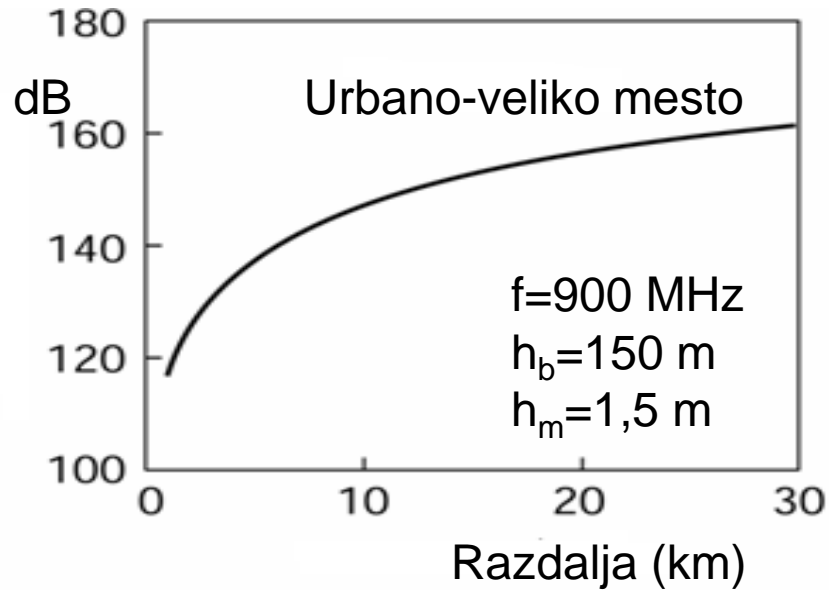
predmestje in majhno mesto:

$$E = (1,1 \log f_{\text{MHz}} - 0,7)h_{\text{m}} - (1,56 \log f_{\text{MHz}} - 0,8)$$

veliko mesto, center:

$$E = 3,2 (\log(11,75 h_{\text{m}}))^2 - 4,97 - 3$$

Primer slabljenja Okumura-Hata

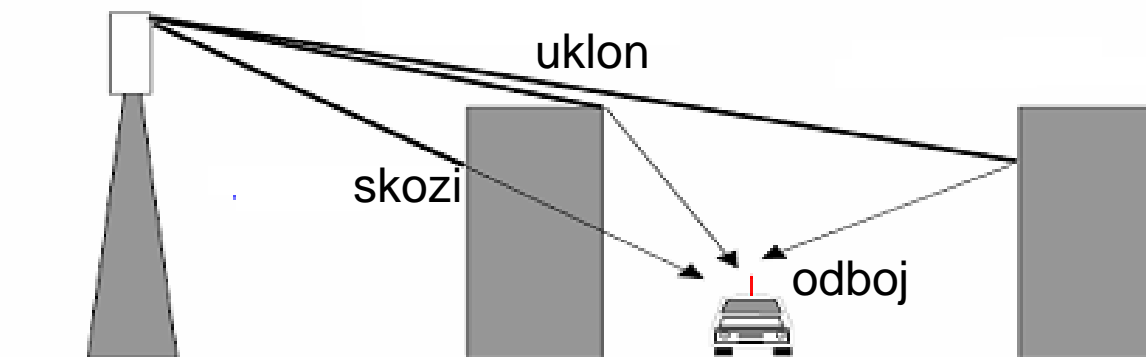


Walfish – Bertoni - Ikegami

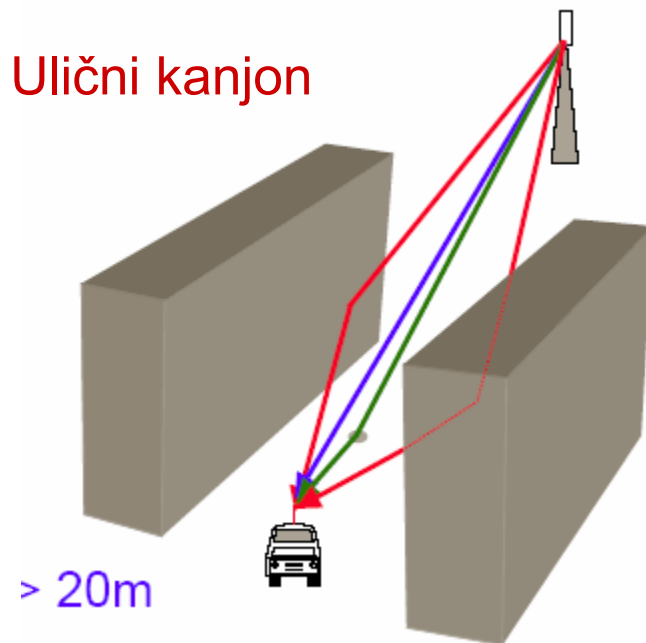
Pojavi in mehanizmi širjenja v urbanem okolju - osnove metode Walfish-Bertoni-Ikegami

- širjenje pod pogoji (delne) radijske vidljivosti (LOS) in radijske zastrtosti (NLOS)
- širjenje skozi stavbo
- uklon na vrhu ali ob strani stavbe
- odboj na stenah stavb
- širjenje vzdolž ulice po večžarkovnem modelu (ulični kanjon - valovodni pojav)

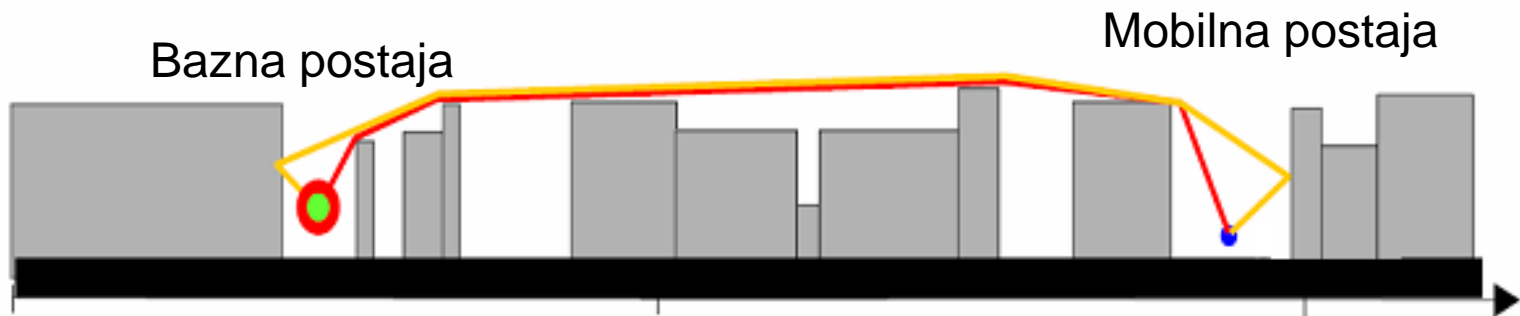
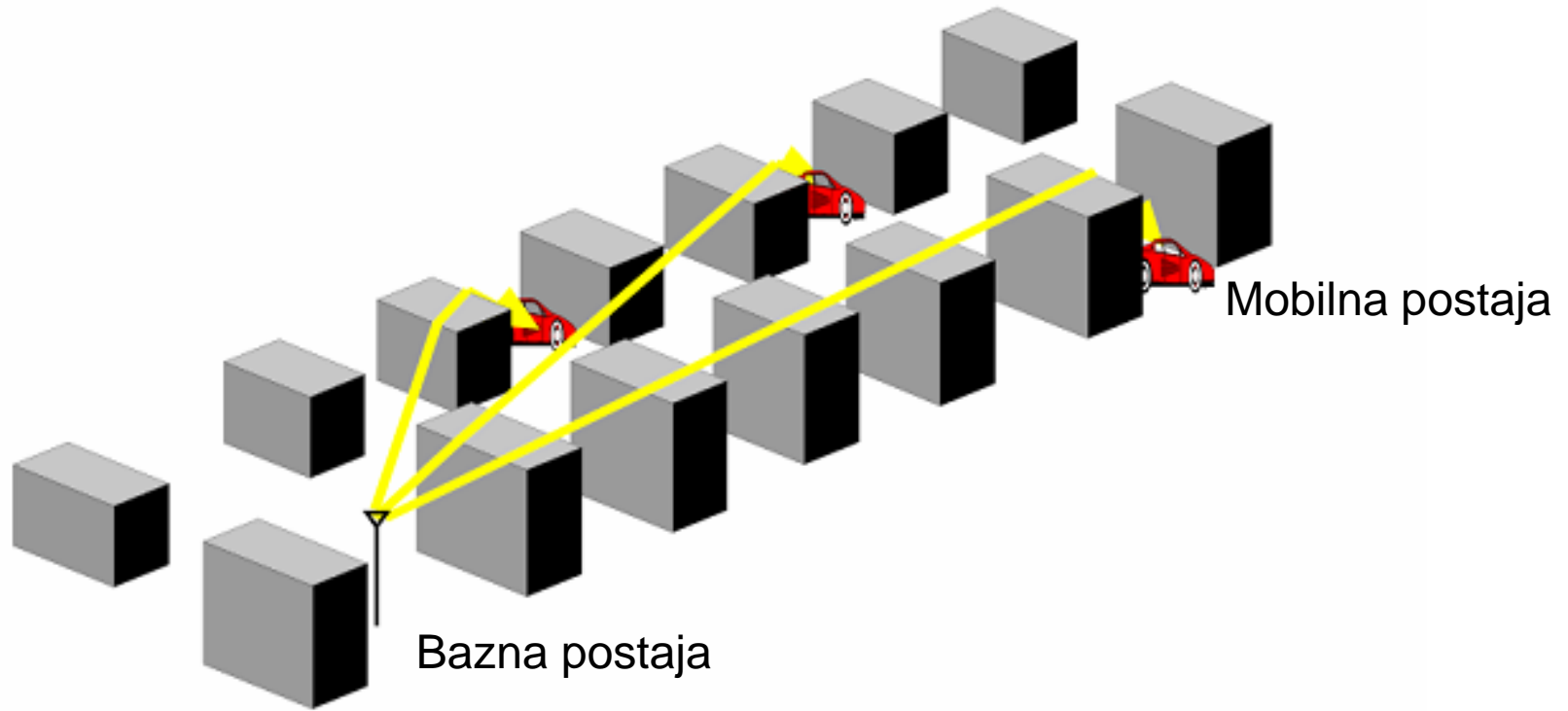
Širjenje nad strehami



Ulični kanjon



Poti razširjanja



Model Walfish-Bertoni-Ikegami 1/7

$$L = L_{\text{LOS}} + L_{\text{NLOS}} = L_{\text{LOS}} + L_{\text{mu}} + L_{\text{uo}}$$

Prazni prostor

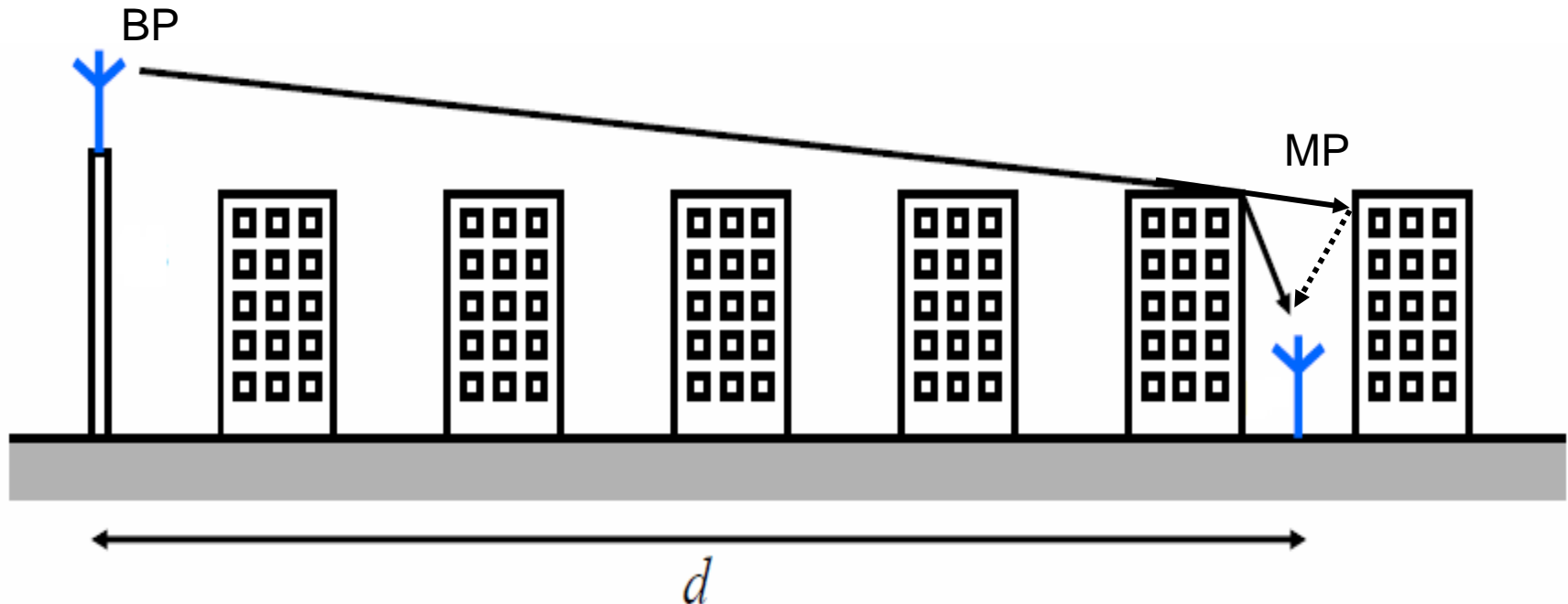
L_{LOS}

Niz ovir

L_{mu}

Uklon in odboj

L_{uo}



Model Walfish-Bertoni-Ikegami 2/7

Širjenje valov v celičnem omrežju znotraj urbanega področja:

- strnjeno zazidano območje visokih stavb
- antena bazne postaje **nad nivojem streh**
- antena mobilne postaje nizko pri tleh
- sprejem s strehe uklonjenega vala in od stene odbitega vala
- ulice učinkujejo kot valovod, ki vodi valove v vzdolžni smeri
- širjenje nad strehami (model večkratnih ovir, uklon na robu strehe, odboj od stene)
- valovodni način širjenja vzdolž ulice (model uličnega kanjona)

Model COST 231 Walfish-Bertoni-Ikegami 3/7

Značilnosti:

- **Pol-empirična metoda**
- na osnovi meritev v Stockholmu
- bazna antena nad strehami
- uklon čez stavbe in ob njih
- uporaba za mobilne zveze na urbanem področju
- radijska vidljivost in zaslonjenost
- učinek uličnih “kanjonov”
- model: LOS + večkratni uklon + uklon na robu + odboj
- Model ni uporaben, ko sta obe anteni pod nivojem streh
- Popravek za primer nizkih baznih anten ima model UMP (urban model of propagation, US army)

Vhodni podatki:

- frekvenca 800 – 2000 MHz
- razdalja 20 m – 5 km
- višina anten 4 – 50 m in 1 -3 m
- povprečna višina stavb in razdalja med njimi
- povprečna širina stavb in širina ulic
- orientacija ulic glede na smer proti bazni postaji
- vrsta terena
 - predmestje, manjše mesto
 - srednje in veliko mesto

Izhodni podatki:

- slabljenje pri radijski vidljivosti (LOS)
- slabljenje pri radijski zaslonjenosti (NLOS)

Model Walfish - Bertoni – Ikegami 4/7

1. Dvožarkovni model radijske vidljivosti (LOS):

$L_{LOS} = L_0$ (slabljenje v praznem prostoru) + dodatno upadanje zaradi odboja

$$L_{LOS} = L_0 + 10,19 + 6 \log d_{km} = 42,64 + 26 \log d_{km} + 20 \log f_{MHz} \quad (\text{potenca } n = 2,6!)$$

$L_0 = 32,45 + 20 \log d_{km} + 20 \log f_{MHz}$ je slabljenje v praznem prostoru.

2. Model brez radijske vidljivosti (NLOS):

$$L_{NLOS} = L_0 \text{ (prazni prostor)} + L_{mu} \text{ (mnogokratni uklon)} + L_{uo} \text{ (streha-cesta)}$$

2.1 Slabljenje zaradi mnogokratnega uklona na stavbah je:

$$L_{mu} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d_{km} + k_f \log f_{MHz} - 9 \log b, \quad \text{kjer so } L_{bsh} \text{ do } k_f \text{ konstante}$$

2.2 Slabljenje zaradi uklona na strehi in odboja na steni (pot streha-cesta):

$$L_{uo} = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f_{MHz} + 20 \log \Delta_{hm} + L_{ori}, \quad \text{kjer je } L_{ori} \text{ izračunana konstanta.}$$

Model Walfish-Bertoni-Ikegami 5/7

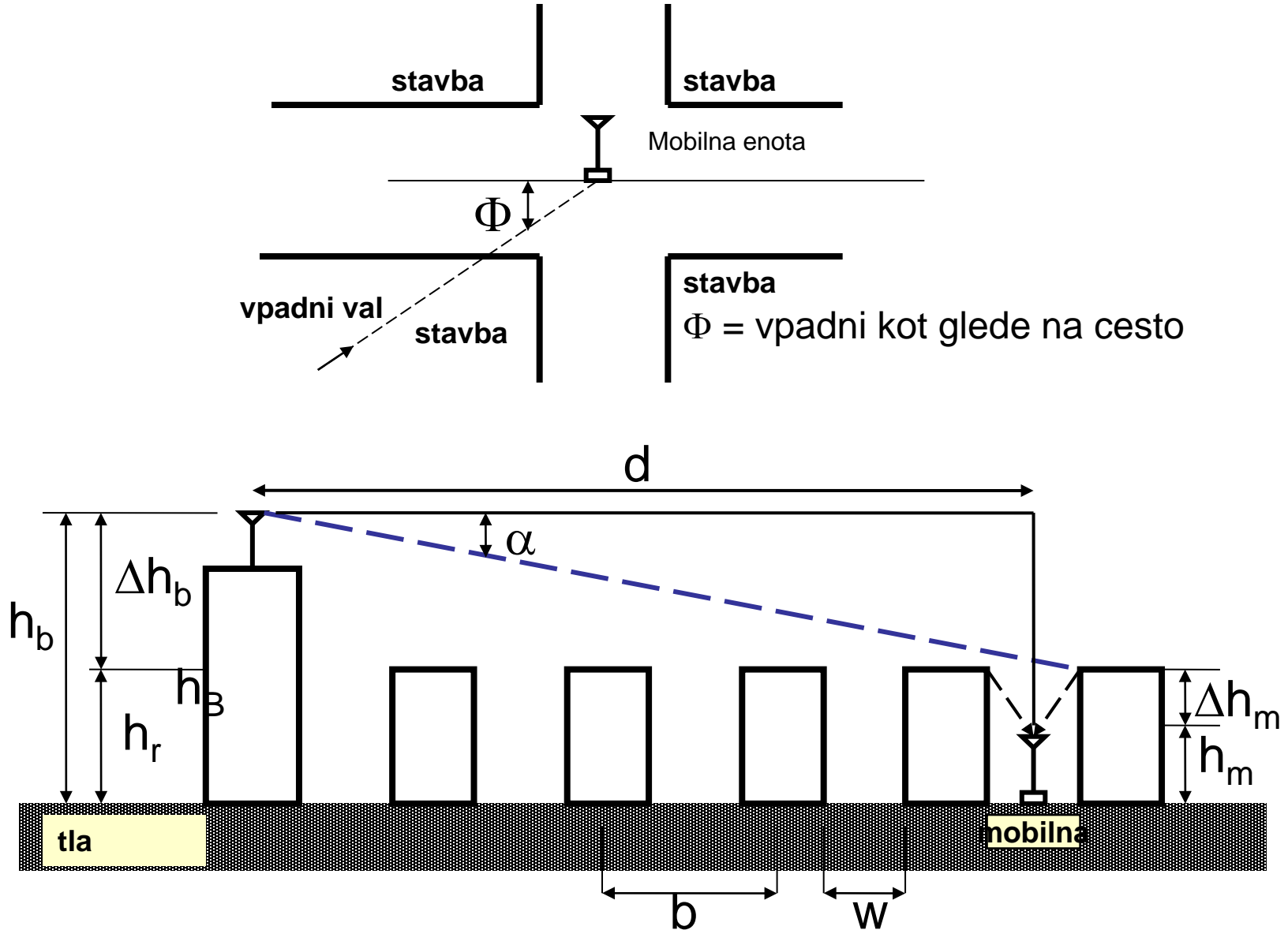
Slabljenje L_{mu} zaradi mnogokratnega uklona na stavbah:

$$\begin{aligned} L_{bsh} &= -18 \log(1+\Delta h_b), & \Delta h_b > 0, \\ &= 0, & \Delta h_b < 0. \\ k_a &= 54, & \Delta h_b > 0, \\ &= 54 + 0,8/\Delta h_b, & \Delta h_b < 0 \text{ in } d > 0,5 \text{ km}, \\ &= 54 + 0,8/\Delta h_b/d_{km}/0,5, & \Delta h_b < 0 \text{ in } d < 0,5 \text{ km}. \\ k_d &= 18 & \Delta h_b > 0, \\ &= 18 + 15(1/\Delta h_b/h_B) & \Delta h_b < 0. \\ k_f &= -4 + 0,7(f_{MHz}/925 - 1), & \text{predmestje in srednje mesto} \\ &= -4 + 1,5(f_{MHz}/925 - 1), & \text{veliko mesto} \end{aligned}$$

Slabljenje L_{uo} na poti streha-mobilna postaja (z odbojem)

$$\begin{aligned} L_{ori} &= -10 + 0,354 \phi, & 0 < \phi < 35^\circ, \\ &= 2,5 + 0,075(\phi - 35), & 35^\circ < \phi < 55^\circ, \\ &= 4,0 - 0,114(\phi - 55^\circ) & 55^\circ < \phi < 90^\circ. \end{aligned}$$

Model Walfish–Bertoni–Ikegami, prikaz podatkov 6/7



Model Walfish-Bertoni-Ikegami, preglednica podatkov 7/7

Podatki:

h_b ... višina bazne antene nad cesto (do 50 m)

h_m ... višina mobilne antene (1 do 3 m)

h_B ... višina stavbe do vrha strehe v m

Δh_b ...višina bazne antene nad streho v m

Δh_m ...višina mobilne antene pod streho v m

b razmik med stavbami v m

wširina ulice v m ($w \div b/2$)

ϕ vpadni kot žarka glede na ulico

Primer širjenja vzdolž ulic



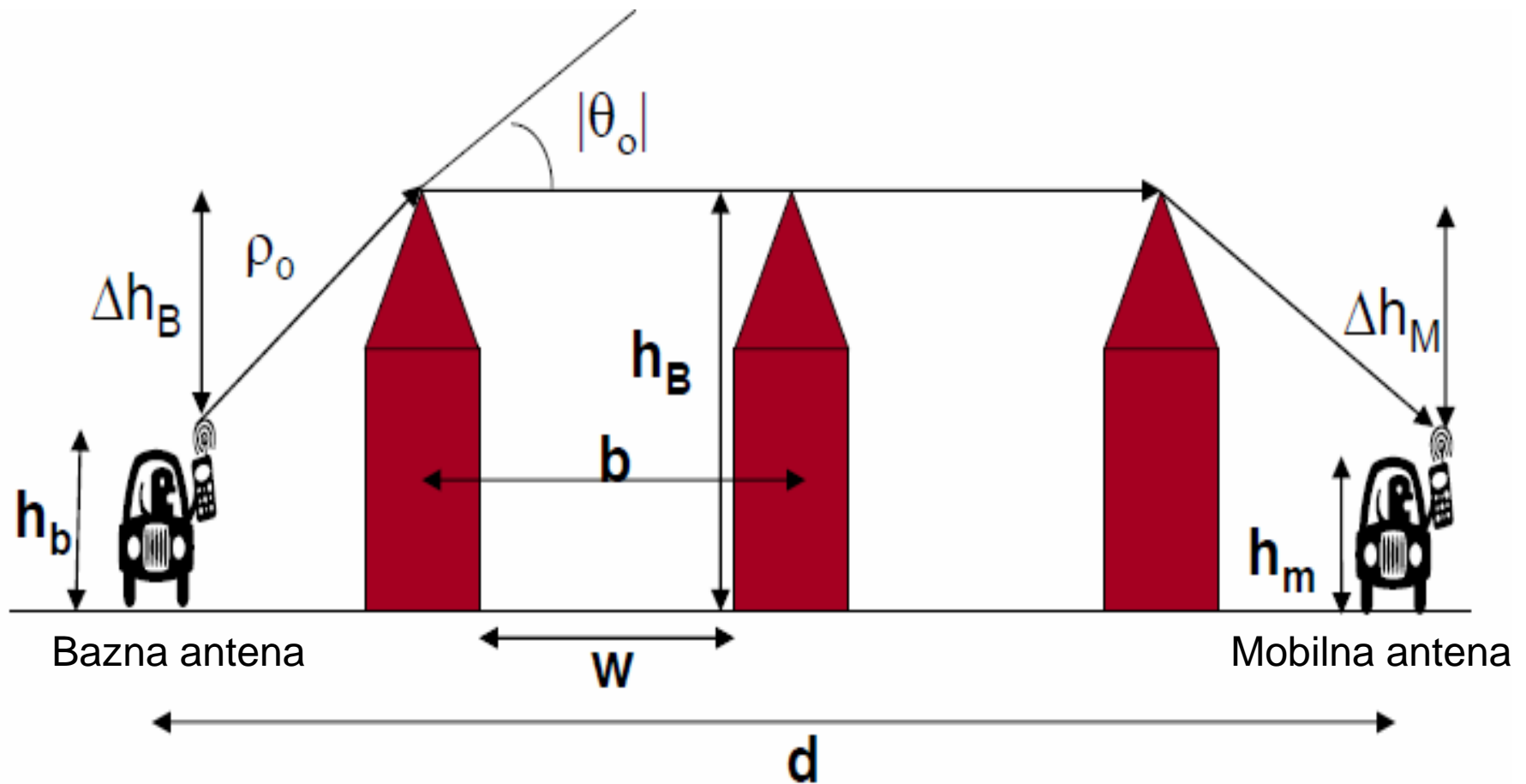
Primerjava med štirimi metodami 1/2

| Model | Frequency range | Terrain dependence | Antenna height above ground | Calculation speed |
|-----------------------------------|--|---|--|-------------------|
| Free space | No frequency limitation | No terrain dependence. Gives the same transmission loss in all directions. | The model assumes no ground influence. | Very fast |
| Longley-Rice | 20 MHz to 40 GHz | No terrain dependence. Terrain influence is given as a terrain roughness parameter to the model, entered by the operator. Gives the same transmission loss in all directions. | 0.5 – 3000 m. The 3000 m above ground level antenna height limitation does not significantly reduce accuracy for higher antenna heights. | Very fast |
| ITU-R P.370-7 | 30 – 1000 MHz | Terrain information is taken from the ITU Digitized World Map to determine the path lengths over land and over sea. The operator can enter a terrain roughness parameter. Gives the same transmission loss in all directions, if the path is wholly over land or sea. | One antenna in the interval 1.5 – 40 m and the other antenna 37.5 – 1200 m above ground. | Very fast |
| Okumura-Hata/COST-231-Hata | 150 – 2000 MHz (no hard limit at 2000 MHz – can be used for 2 GHz cellular applications) | No terrain dependence. The operator can enter a type of environment (urban, suburban, rural etc.). Gives the same transmission loss in all directions. The distance is limited to 1 – 20 km. | One antenna in the interval 30 – 200 m and the other antenna 1 – 10 m above ground. | Very fast |
| COST-231 – Walfish-Ikegami | 800 – 2000 MHz (no hard limit at 2000 MHz – can be used for 2 GHz cellular applications) | No terrain dependence. The operator can enter the type of environment and parameters describing the buildings and streets. Gives the same transmission loss in all directions. The distance is limited to 0.02 – 5 km. | One antenna in the interval 4 – 50 m and the other antenna 1 – 3 m above ground. | Very fast |

Primerjava med štirimi metodami 2/2

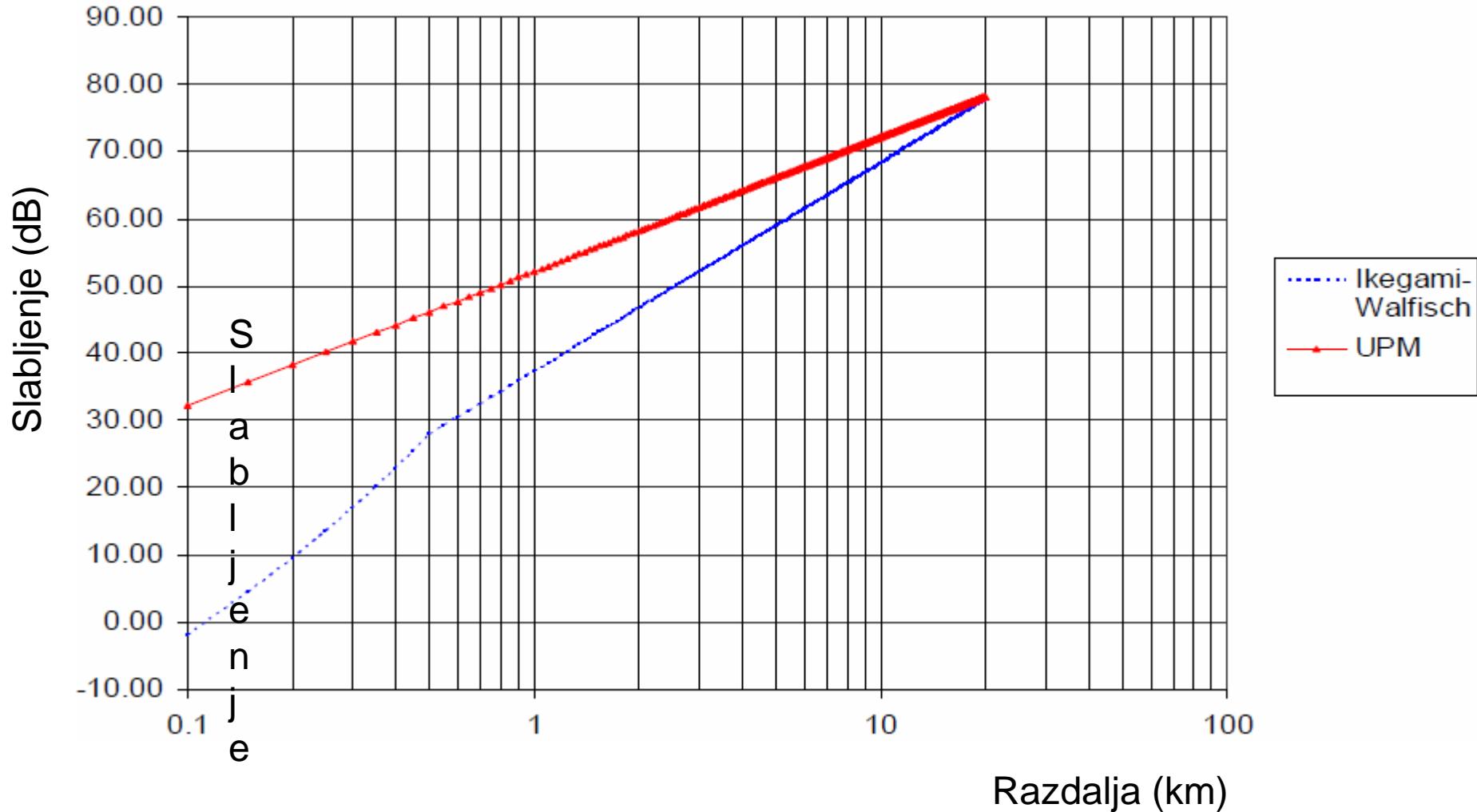
| Model | Frequency range | Terrain dependence | Antenna height above ground | Calculation speed | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--|--|---|-------------------|--------|--------|-------|-----|-----|-----|----|------|----|------|----|--|
| ITU-R P.526-6 | From about 500 MHz to above 100 GHz. For situations where one or both of the antennas are high above ground (such as in ground-to-air and air-to-air links) it can be used from 100 MHz. | Terrain information taken from the height and terrain classification databases. Gives fully terrain dependent transmission loss, however neglecting the electrical characteristics of the ground and ground reflections. | Valid for all antenna heights. | Fast | | | | | | | | | | | | |
| Detvag-90/FOI | 10 kHz to above 100 GHz. Ionosphere propagation is not considered. | Terrain information taken from the height and terrain classification databases. Gives fully terrain dependent transmission loss. <i>Note that Detvag includes a number of selectable models and can be set to be non-terrain dependent as well. This is however not the normal use.</i> | The fast methods (non-GR ground wave) have limitations on the maximum antenna height: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Frequency</th> <th>Height</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 MHz</td> <td>300 m</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>125</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>59</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>3000</td> <td>13</td> </tr> </tbody> </table> <i>Note that for most practical cases the influence of the ground (apart from diffraction) can be neglected above 1 GHz even at low antenna heights. The default methods of Detvag ("Quick" settings) therefore do not have the above limitations above 1 GHz.</i> | Frequency | Height | 30 MHz | 300 m | 100 | 125 | 300 | 59 | 1000 | 26 | 3000 | 13 | Fast-to-medium for most settings. Very slow when used with the GR methods (for ground wave below about 30 MHz) |
| Frequency | Height | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 MHz | 300 m | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100 | 125 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 300 | 59 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1000 | 26 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3000 | 13 | | | | | | | | | | | | | | | |

Primer nizke bazne antene



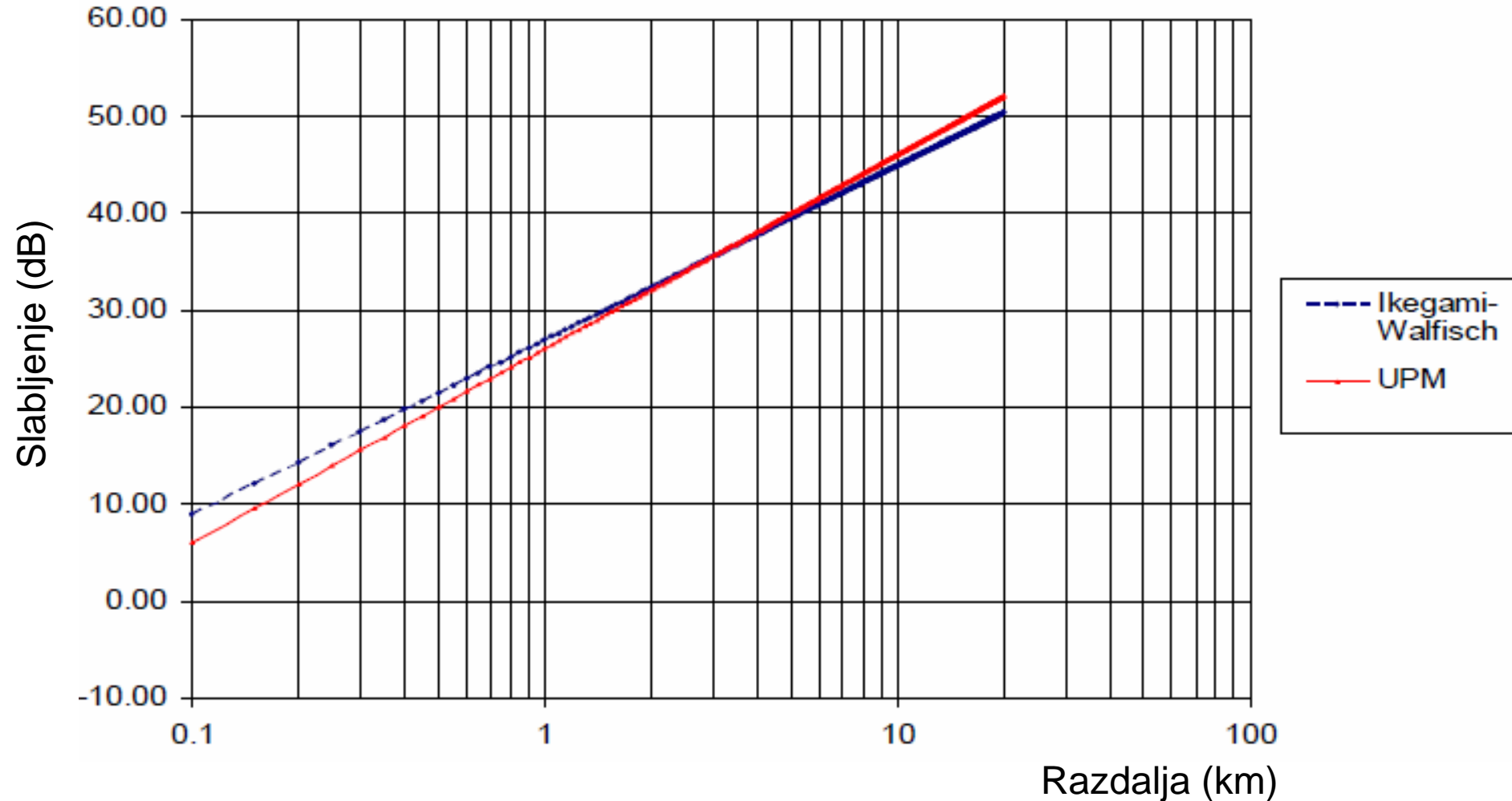
Slabljenje nad strehami – primerjava 1/3

Podatki: $h_b = 2$ m, $h_m = 2$ m, $h_B = 15$ m, $w = 50$ m, $f = 900$ MHz



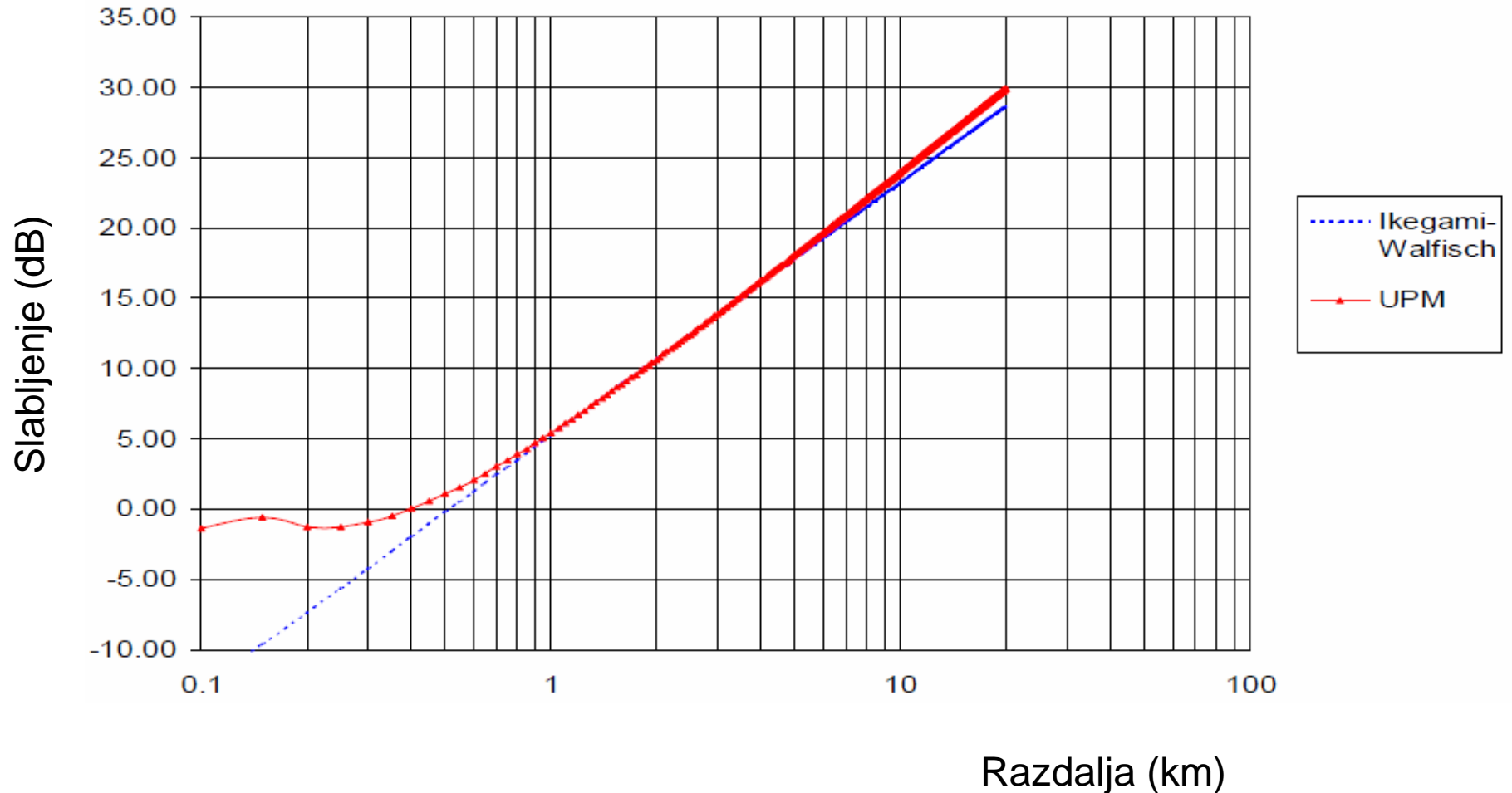
Slabljenje nad strehami – primerjava 2/3

Podatki: $h_b = 30$ m, $h_m = 2$ m, $h_B = 15$ m, $w = 50$ m, $f = 900$ MHz

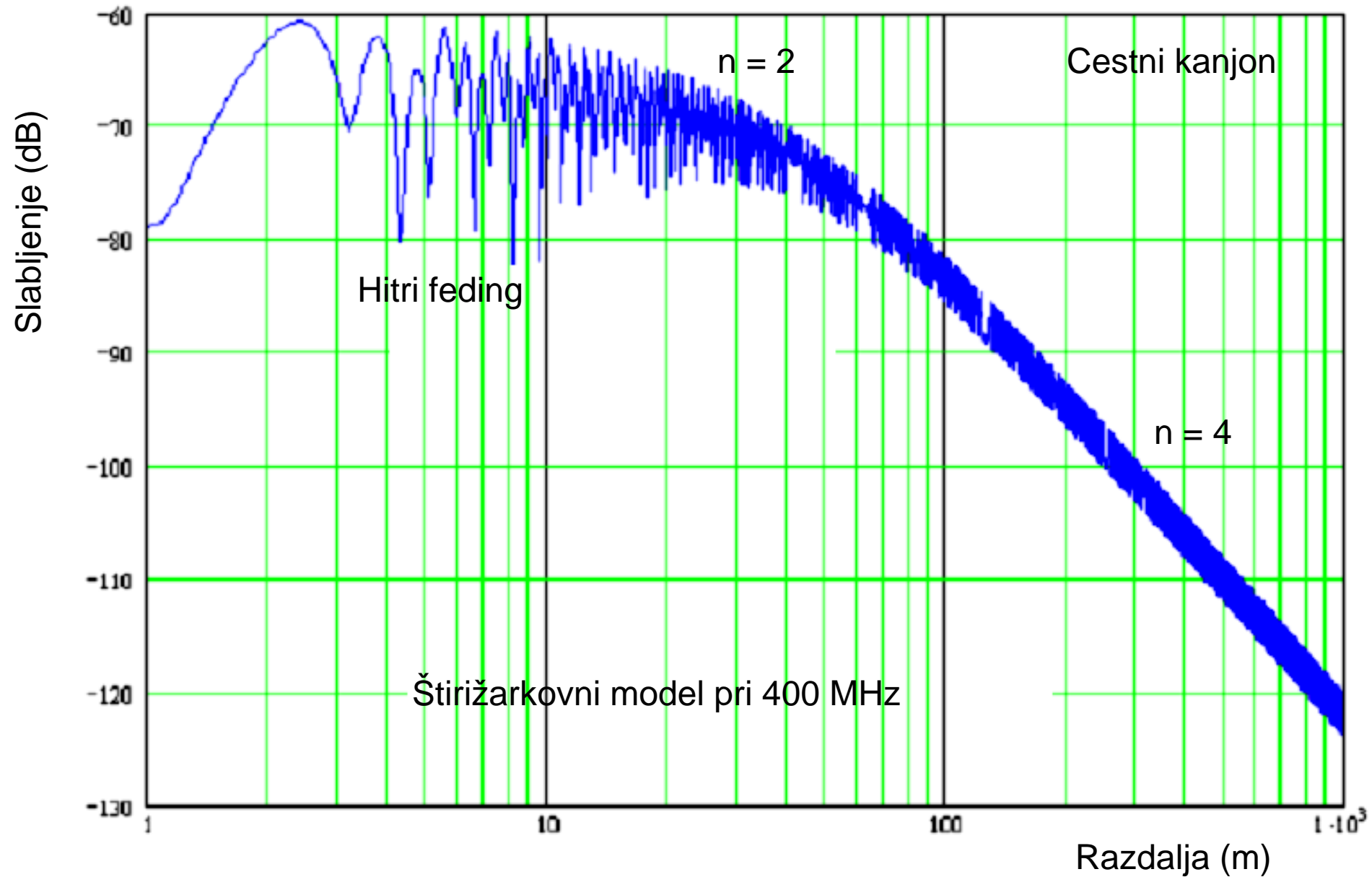


Slabljenje nad strehami – primerjava 3/3

Podatki: $h_b = 30$ m, $h_m = 2$ m, $h_B = 15$ m, $w = 50$ m, $f = 900$ MHz



Model cestnega kanjona



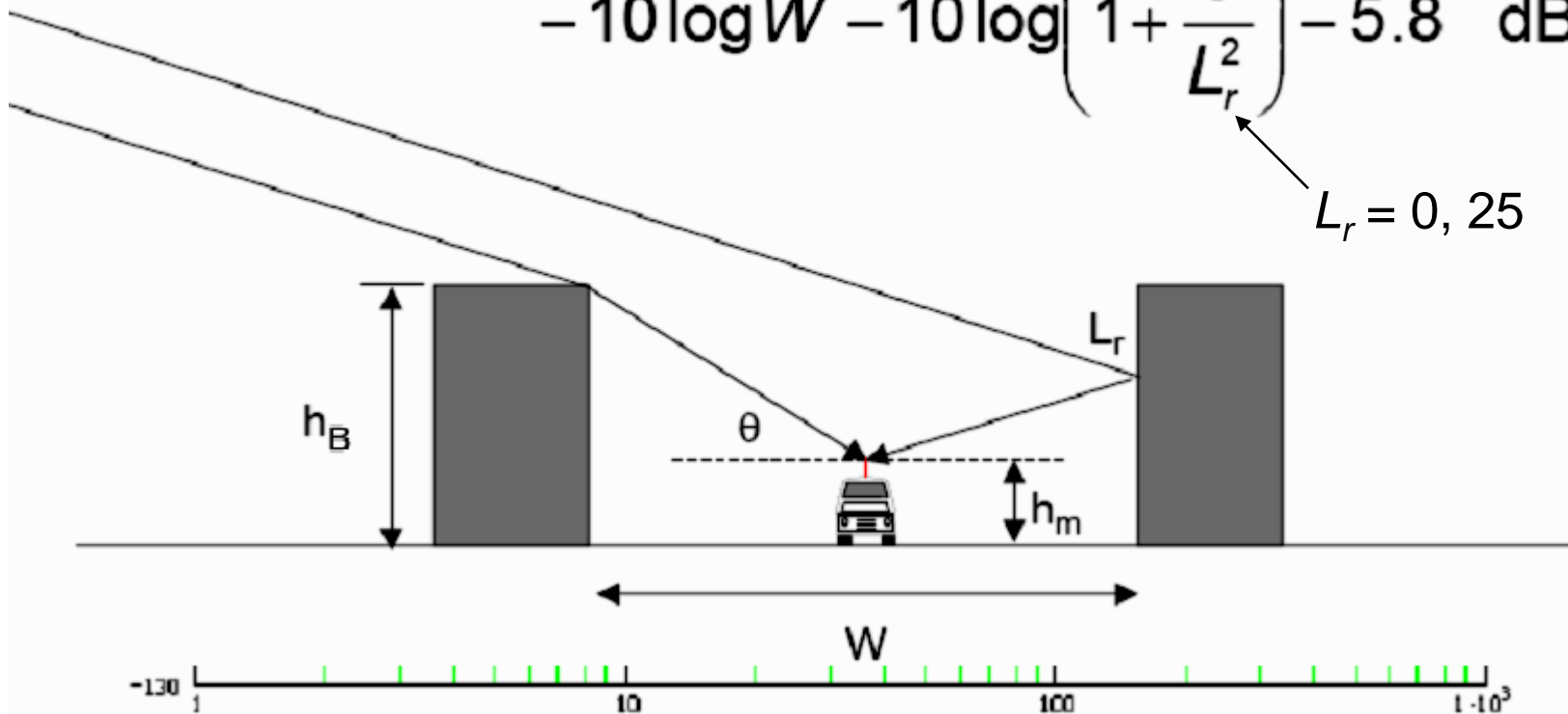
Dodatno slabljenje pri širjenju NLOS nad strehami (visoki bazni anteni)

Dodatno slabljenje

$$L = 10 \log f + 10 \log(\sin \theta) + 20 \log(h_B - h_m)$$

$$- 10 \log W - 10 \log \left(1 + \frac{3}{L_r^2} \right) - 5.8 \text{ dB}$$

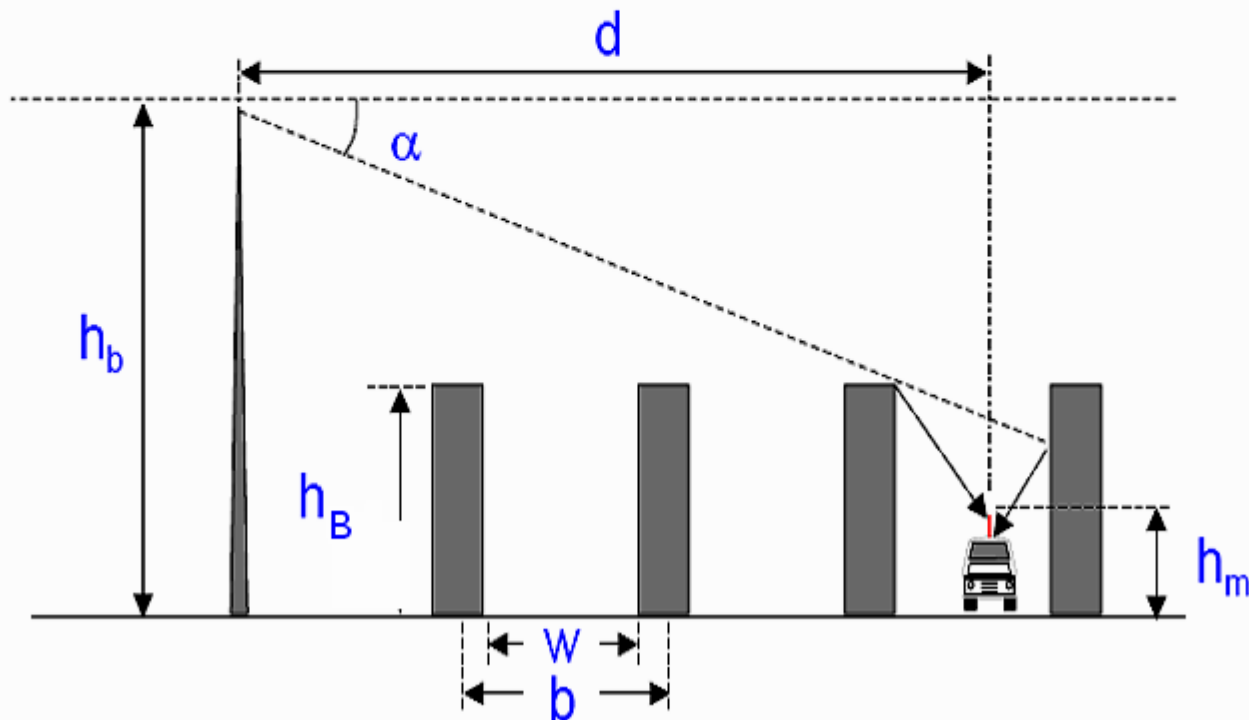
$$L_r = 0,25$$



Dodatno slabljenje streha - vozilo

$$L_{rts} = \begin{cases} -16.9 + 10 \log(w) + 10 \log(f) + 2 - \log(h_B - h_m) + L_{ori} & h_B > h_m \\ 0 & \text{drugod} \end{cases}$$

Orientacija cest



Mnogokratni uklon na strehah

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log(d_{km}) + k_f \log(f_{MHz}) - 9 \log(b_m)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \\ 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \end{cases}$$

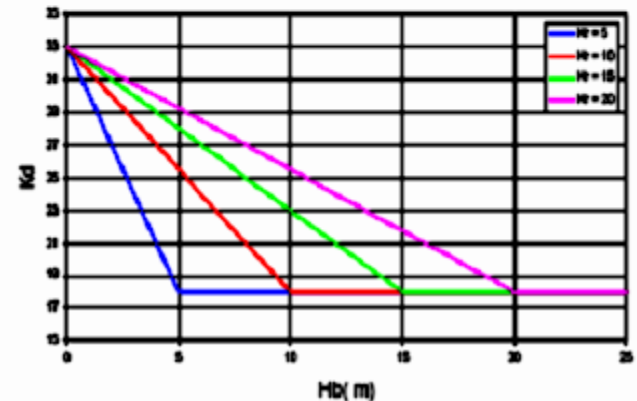
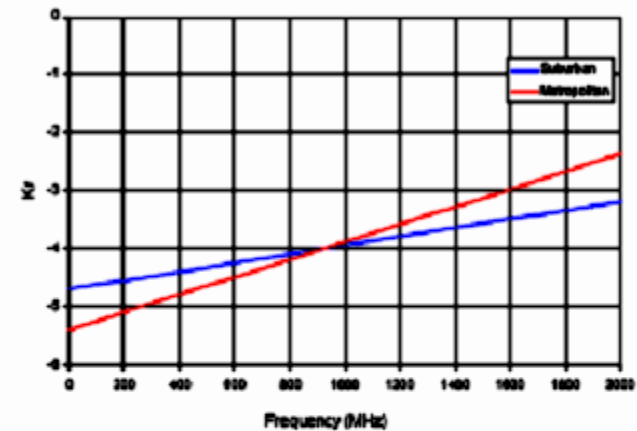
Srednje veliko mesto

Veliko mesto

$$k_d = \begin{cases} 18 \\ 18 - 15 \left[\frac{\Delta h_b}{h_B} \right] \end{cases}$$

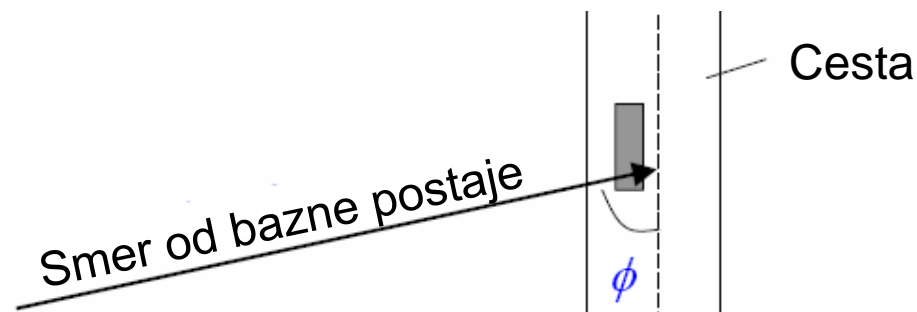
$$h_b > h_B$$

$$h_b \leq h_B$$

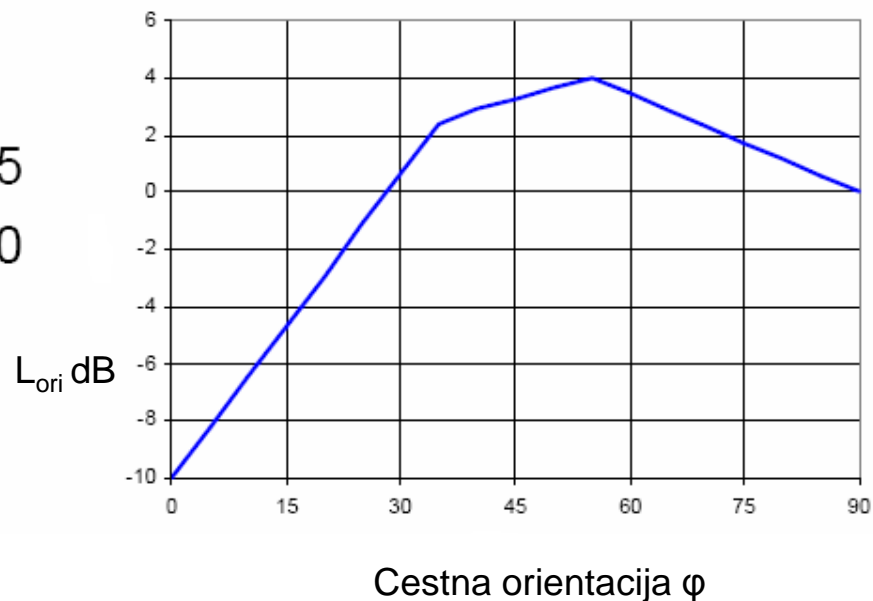


Popravek pri poševnem vpadu na streho

Vrednosti -10 do 4 dB
Popravek je 0 pri 90°



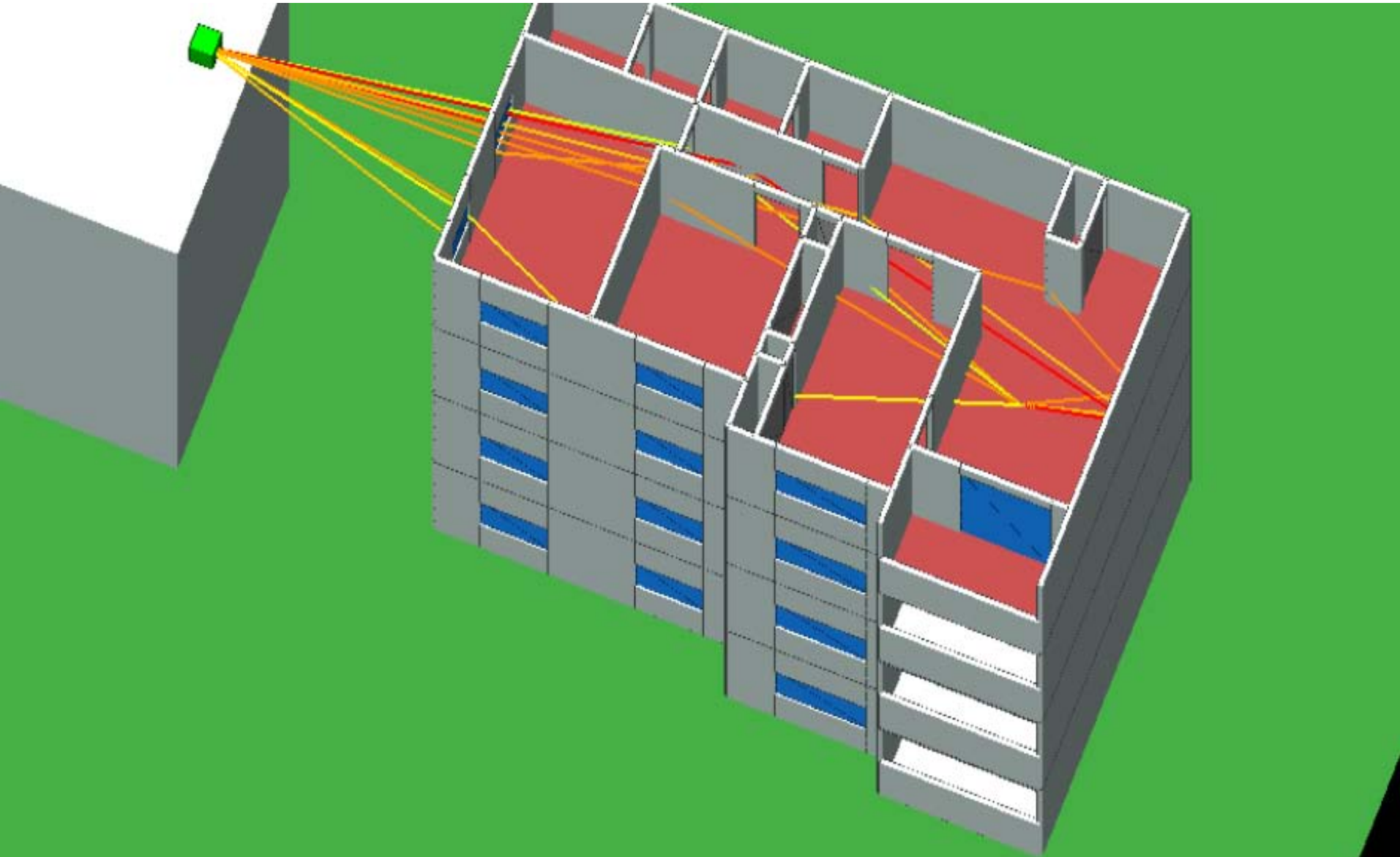
$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354 \phi & \text{for } 0 \leq \phi < 35 \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35) & \text{for } 35 \leq \phi < 55 \\ 4 - 0.114(\phi - 55) & \text{for } 55 \leq \phi \leq 90 \end{cases}$$



Razširjanje v notranjih prostorih

- Pikocelice (10 – 100 m)
- Femtocelice (< 10 m)

Prehod med zunanjim in notranjim prostorom



Slabljenje pri prehodu v stavbo

Polje prehaja pretežno skozi okna. Tabela daje grobo ocenitev za nekaj različnih vrst stavb:

| Building type | Attenuation (dB) | Attenuation (dB) |
|---------------------------|------------------|------------------|
| | 880 MHz | 1922 MHz |
| Office complex | 7.9 | 9.5 |
| Shopping arcade | 12.9 | 10.8 |
| Two floor shopping arcade | 12.3 | 8.3 |
| Hotel | 11.3 | 11.2 |
| Average | 11.1 | 10.0 |

Značilnosti širjenja v notranjih prostorih

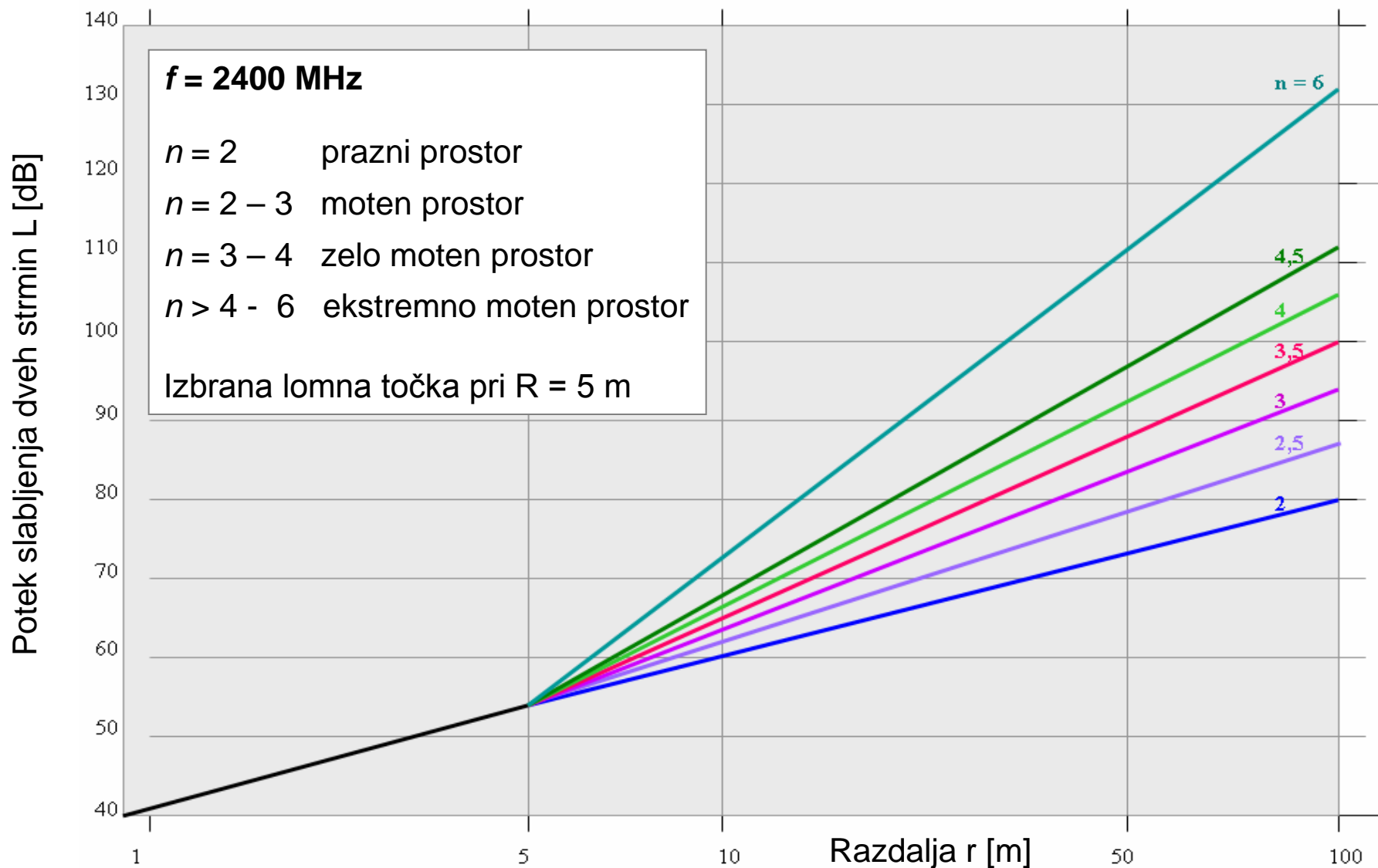
Odvisnost od razdalje:

- Veliki odprti prostori, dvorane $n \div 2$
- Hodniki, gladke stene $n < 2$ (npr. 1,8)
- Manjši prostori, zidane stene $n \div 4$
- Večji prostori z ovirami (model dveh strmin) $n_1 = 2, n_2 = 4$

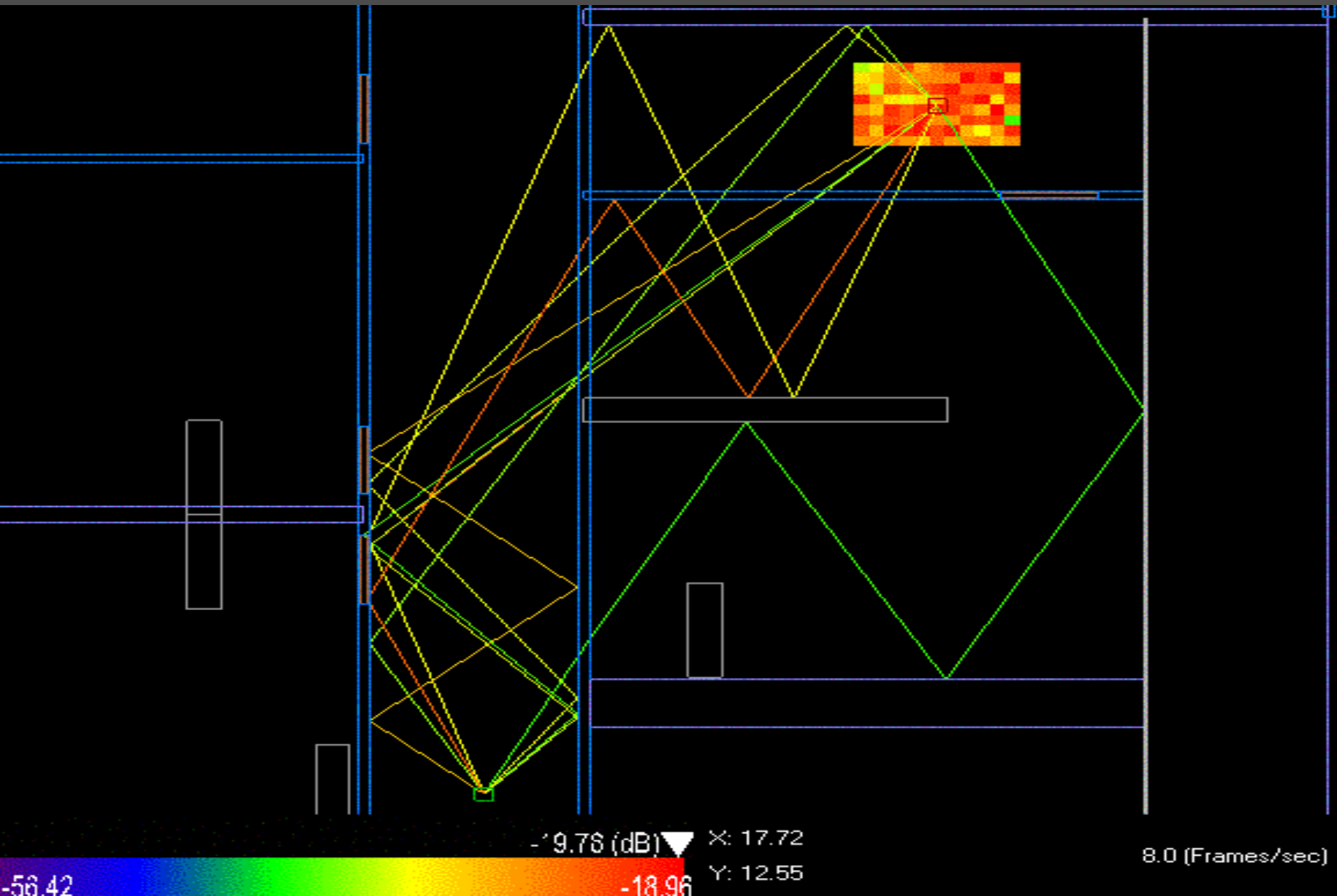
Odvisnost od frekvence:

- Slabljenje zidov narašča s frekvenco
- Prepustnost odprtin (oken) narašča s frekvenco

Model dveh strmin naraščanja slabljenja v notranjem prostoru



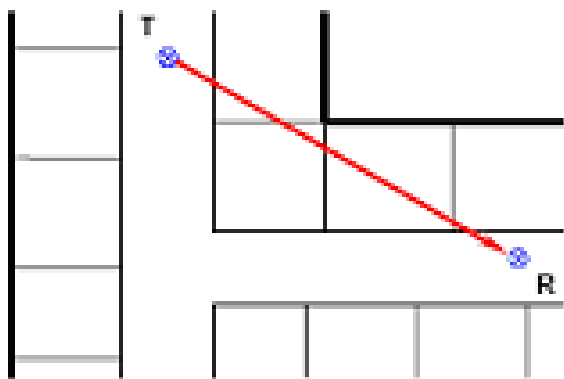
Model žarkov v notranjih prostorih



Razvrstitev modelov širjenja v notranjih prostorih

Empirični model

Direktna metoda
Keenan-Motley

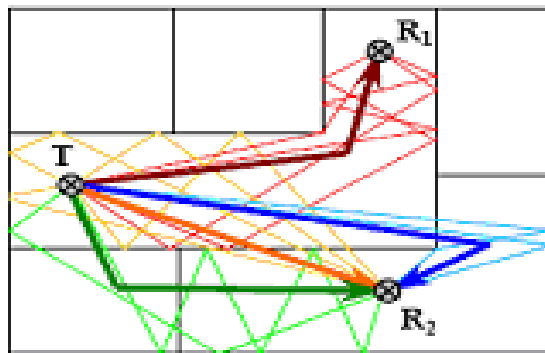


COST 231 Multi Wall /Floor

- groba ocena slabljenja
- empirična prilagoditev potence upadanja dejanskim pogojem širjenja

Pol-deterministični pol-empirični model

Model prevladujoče poti

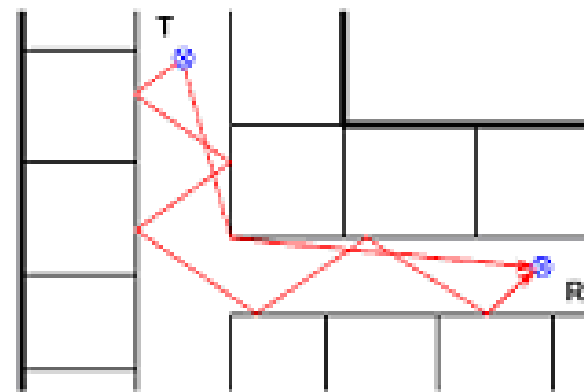


Dominant Path Model

- slabljenje
- izbira prevladujočih poti
- potrebne izkušnje

Deterministični model

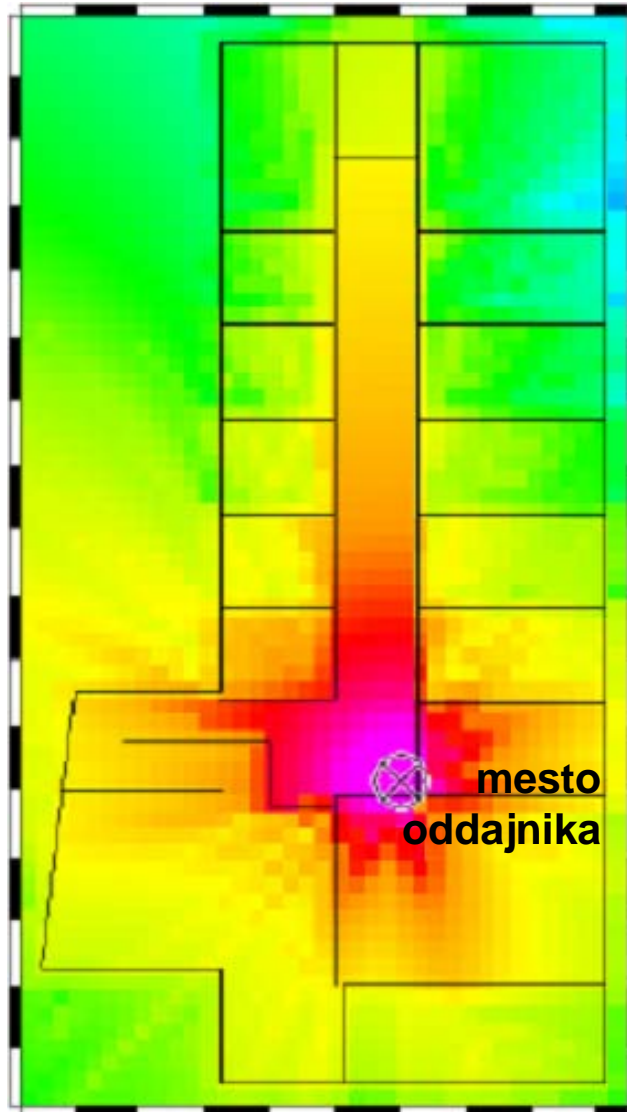
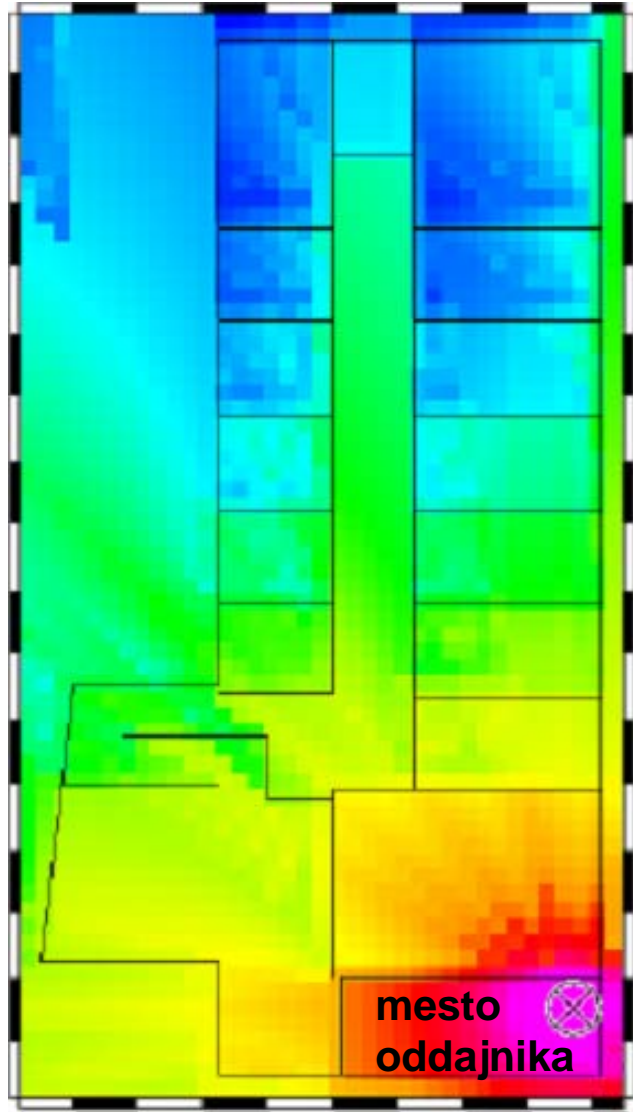
Žarkovni model



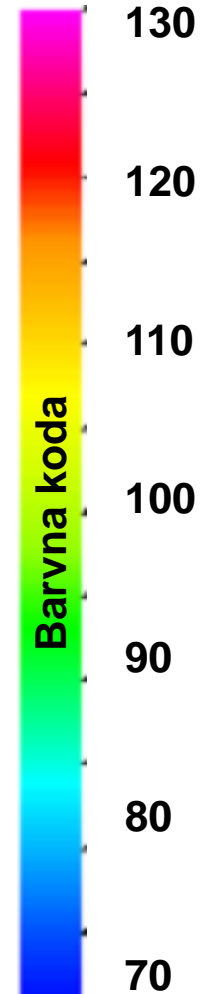
Ray Tracing/launching Model

- slabljenje
- razpršitev zakasnitve
- zahtevnost metode

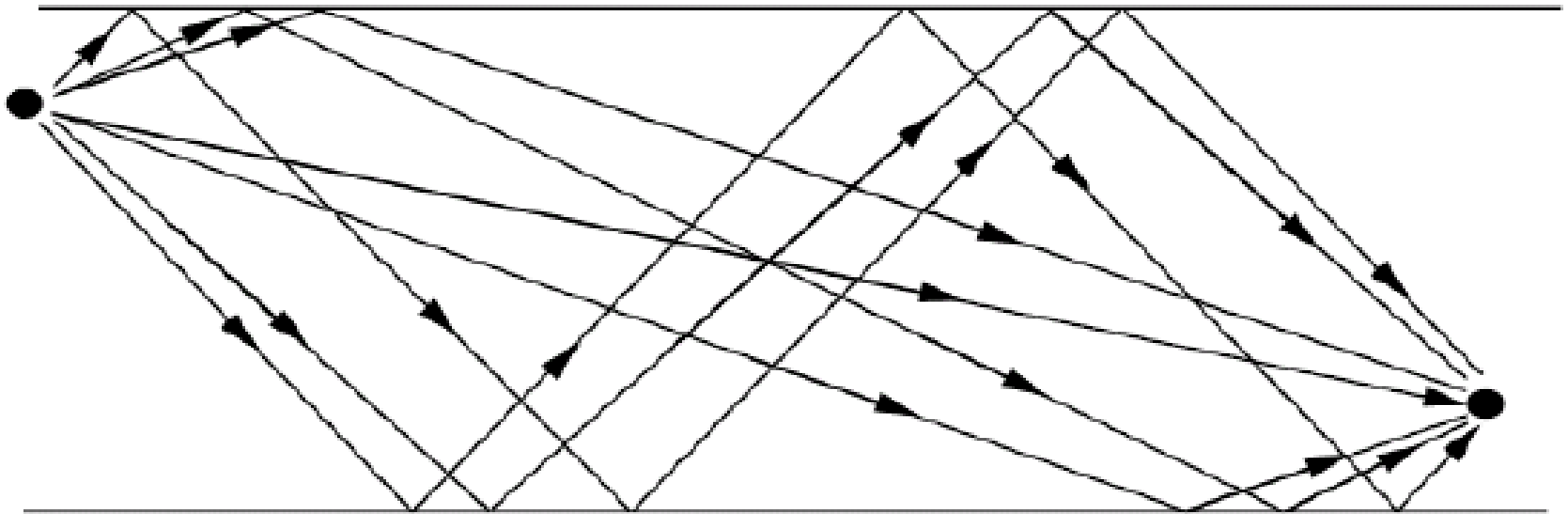
Primer porazdelitve polja v notranjih prostorih



Poljska jakost
[dB μ V/m]



Razširjanje po hodnikih



Propagacija v notranjih prostorih – empirični model

Radijska zveza v individualni hiši

Zveza med točkama v istem ali bližnjih nadstropjih

Direktna pot prebada steno slabljenja W in strop slabljenja F .

Ocena (2,4 GHz):

$W = 5 - 10$ dB (zidana stena)

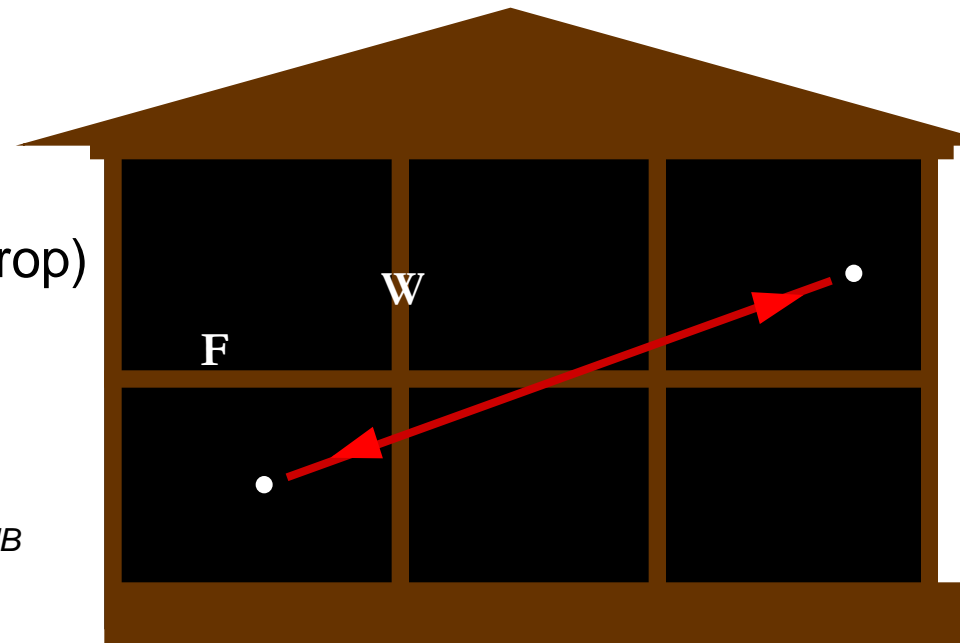
$F = 15 - 20+$ dB (armirano-betonski strop)

ppotenca upadanja

$$L_{dB} = 20 \log \frac{4\pi}{\lambda} + 10p \log r + \sum_{i=1}^m W_{i,dB} + \sum_{j=1}^n F_{j,dB}$$

$f = 2,4$ GHz:

$$L_{dB} = 40 + 10p \log r + \sum_{i=1}^m W_{i,dB} + \sum_{j=1}^n F_{j,dB}$$



Propagacija v notranjih prostorih – empirični model

Slabljenje po uklonski poti:

$$L_{dB} = 20 \log \frac{4\pi}{\lambda} + 10 p \log r + \sum_{i=1}^m W_{i,dB} + F \cdot n \left(\frac{n+2}{n+1} - 0,46 \right)$$

$$L_{dB} = 40 + 10 p \log r + \sum_{i=1}^m W_{i,dB} + F \cdot n \left(\frac{n+2}{n+1} - 0,46 \right)$$

pri $f = 2,4 \text{ GHz}$

Opomba:

F je srednji faktor slabljenja stropov. Število stropov je n.

Upoštevamo slabljenje sten in izberemo $p = 2$

Ne upoštevamo slabljenja sten in izberemo $p = 2,5$ do 3

Propagacija v notranjih prostorih – empirični model

Radijska zveza v večnadstropni stavbi

Zveza med točkama v oddaljenih nadstropjih:

Veliko slabljenje F_{dB} stropov preprečuje širjenje po direktni poti, ki bi prebadala več stropov. Zveza se vzpostavi s širjenjem skozi okenske odprtine, uklonom navzgor in širjenjem ob stavbi.

Slabljenje:

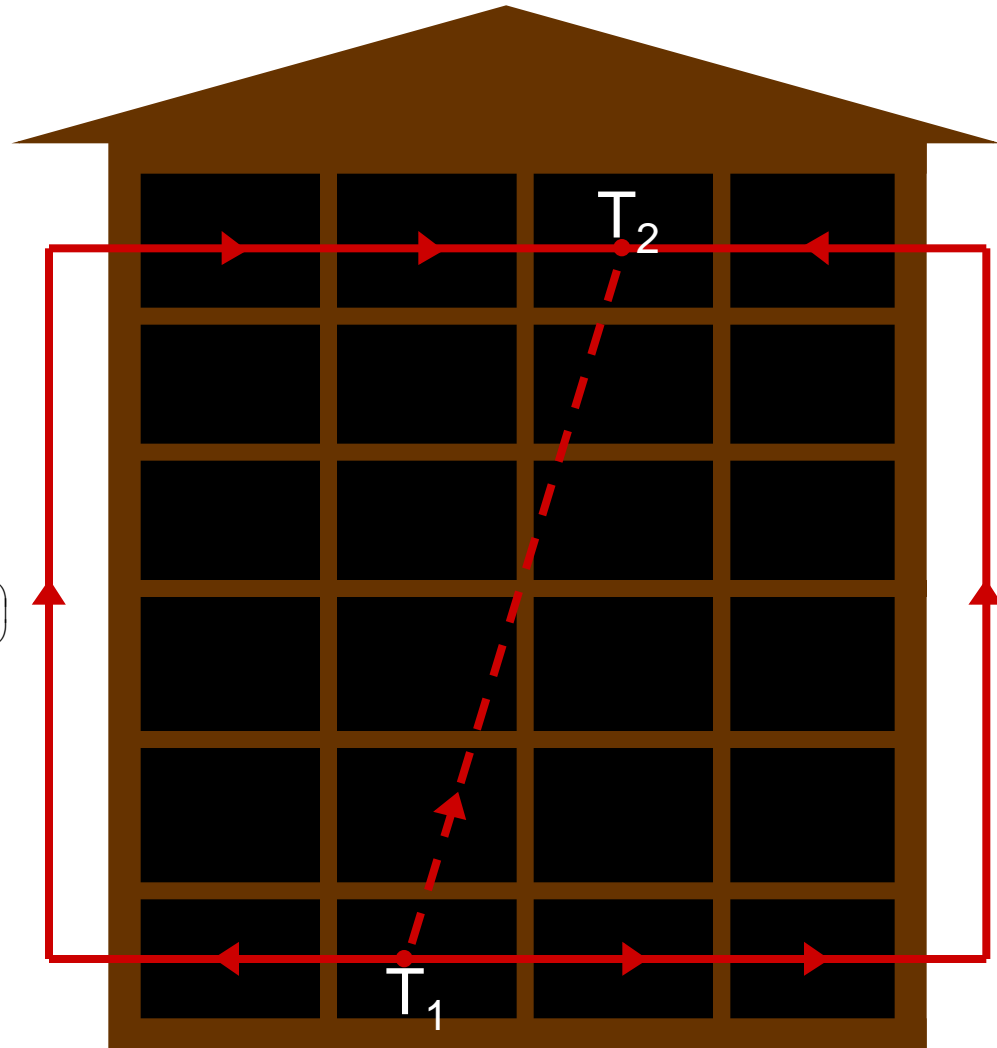
$$L_{dB} = 20 \log \frac{4\pi}{\lambda} + 10 p \log r + \sum_{i=1}^m W_{i,dB} + F_{dB} \cdot n \left(\frac{n+2}{n+1} - 0,46 \right)$$

Slabljenje pri frekvenci 2,4 GHz

$$L_{dB} = 40 + 10 p \log r + \sum_{i=1}^m W_{i,dB} + F_{dB} \cdot n \left(\frac{n+2}{n+1} - 0,46 \right)$$

n.....število vmesnih stropov

p.....potenca slabljenja



Primeri širjenja v notranjih prostorih 1/2

$$PL(d)[dB] = \underbrace{20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)}_{\text{Free space path loss at reference distance}} + \underbrace{10 \cdot n \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right)}_{\text{Path loss exponent at relative distance } d} + \underbrace{kL_{Wall}}_{\text{Wall loss factor}} \quad d \geq d_0$$

| Reference | Scenario | Center Freq. [GHz] | n | Environment | Comments |
|-----------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|--|--|
| [Kaj95] | LOS LOS NLOS NLOS | 21.6 37.2 21.6 37.2 | 1.2 1.65 2.95 3.3 | Corridor Corridor 1-4 wall obstructions 1-4 wall obstructions | 30m x 45m floor size with rooms and hallways of various sizes. Steel doors, double plaster board internal wall and 1ft ² tile floor. Tx- Biconical Omni Rx-Biconical Omni. Both at 1.5m height |
| [Kaj97] | LOS LOS NLOS | 94 94 94 | 1.2-1.8 1.2-1.8 3.6-4.1 | In a hall and a room Corridor Office building floor | 17m x 14.5m hall, 12.6m x 6m room and 3m width corridor. Plaster board walls and concrete floor. Tx-Horn with 25dBi (3dB beamwidth 10°) Rx-Slot with 11dBi. Both at 0.9m height |
| [Bal98] | < 25m 25-40m | 40 40 | 1.5 4 | Open concept office Open concept office | Furnished with 1.22m high semi-permanent partitions dividing many work spaces Tx-Rx -Omnis |
| [SmCol97] | <15 | 60 | 4.4 | Office building | 3dB beamwidth 5° in vertical plane and 90° in horizontal plane |
| [Xu02] | LOS | 60 | 1.88-2.0 | Hallway | 102 x 2.1 x 4.3m TX-open-ended waveguide with 6.7-dB HPBW are 90° azimuth and 125° elevation Rx- Horn antenna with 29-dB HPBW are 7° in azimuth and 5.6° in elevation |

(1) The value n could be less than free-space power-law exponent ($n = 2$) due wave guiding effect

(2) The number of walls ($k = 0$) a best-fit value (in the root-mean-square sense) for n was obtained to satisfy the path-loss equation

Primeri širjenja v notranjih prostorih 2/2

| Reference | Scenario | Environment | n | σ_L | Comments |
|-----------|--------------------------|--|------------------------------|-------------|--|
| [And02] | LOS NLOS | Typical office / laboratory | 2.1 | 7.9 | Tx and Rx – Horn 25dBi Typical office cubical and chairs |
| [Mat97] | LOS | Corridor (45x2.2.4m) Amphitheater (18/12x15m) Grass field (2 sides with bldgs) | 1.87-188 0.78-1.27 1.9 | NA | Omni-Tx, Rx-Direct. (19.5dBi, 15°), Omni Omni-Tx, Rx-High AP, Low AP |
| [Tho94] | LOS (330m) NLOS (60m) | Outdoor-street along axis of propagation | 3.6 10 | 3.2 | Tx-Horn (25dBi, 10°), Rx-horn (6dBi, 120°) Traffic density is about 25-50 cars. |
| [Mor04] | LOS NLOS | Laboratory 19.5x7.5m | 1.8 2 | NA | $d_o=1.5m$ |
| [Fia98] | LOS | Small medium size room | 1.67-1.72 | NA | Omni-Tx and HW dipole-Rx |
| | LOS NLOS | Cell office | 1.32 2.83 | 10.1 7.1 | Tx-Omni, Rx-Horn |
| | LOS NLOS | Open office and cellular office | 1.77 3.83 | 6 7.6 | |
| | LOS NLOS | Open office with partition walls | 1.16 3.74 | 5.4 8.6 | Tx-Omni, Rx-Horn |
| [Rad98] | LOS | Office building | 2 | 1.25 | Tx-Omni, Rx-Horn (20dBi, 3dB beamwidth 20°) |
| [Boh00] | LOS | Corridor | 1.51 | 1.79 | Tx-Rx-Omni biconical at 1.8m |
| | | Canteen | 1.79 | 1.88 | |
| | | Office | 1.26 | 0.74 | |
| | NLOS | Corridor | 1.97 | 1.44 | |
| | | Office | 3.77 | 3.45 | |
| [Kob00] | | Empty room (20x20x3m) | NA | 4-8 | Tx-Rx-Omni |
| [Cla02] | | Small room (7x5m) | NA | 2.98 | Tx-Rx-Microstrip |

HATA MODEL (1980)

Established empirical mathematical forms to
Okumura curves

Quasi-smooth terrain

$$L_{50} = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log h_b - A(h_m) \\ + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log d$$

$$150 \leq f \leq 1500 \text{ MHz}$$

$$30 \leq h_b \leq 200 \text{ m}$$

$$1 \leq h_m \leq 10 \text{ m}$$

$$1 \leq d \leq 20 \text{ km}$$

- COST231-Hata[1999]

- extension to 1500-2000 MHz band

$$L_{50} = F + B \log r - E + G$$

$$1500 \text{ MHz} < f_c < 2000 \text{ MHz}$$

$$F = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82 \log h_b$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log h_b$$

$$E = 3.2(\log(11.75 h_m))^2 - 4.97$$

centers, $f_c \geq 300 \text{ MHz}$

$$E = 8.29(\log(1.54 h_m))^2 - 1.1$$

centers, $f_c < 300 \text{ MHz}$

$$E = (1.1 \log f_c - 0.7) h_m - (1.56 \log f_c - 0.8) \quad \text{medium city and suburban}$$

$$G = \begin{cases} 0 \text{ dB} & \text{Medium sized city and suburban areas} \\ 3 \text{ dB} & \text{metropolitan centers} \end{cases}$$

Hata

Small or medium sized city

$$A(h_m) = (1.1 \log(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log(f) - 0.8)$$

Large city

$$A(h_m) = \begin{cases} 8.29(\log 1.54h_m)^2 - 1.1 & f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3.2(\log 11.75h_m)^2 - 4.97 & f \geq 400 \text{ MHz} \end{cases}$$

Suburban area

$$L_{50} = L_{50}(\text{urban}) - 2[\log(f/28)]^2 - 5.4$$

Walfish

$$L_{\text{tot}} = \begin{cases} L_0 + L_{\text{rts}} + L_{\text{msd}} \\ L_0 & \text{se } L_{\text{rts}} + L_{\text{msd}} \leq 0 \end{cases}$$

- L_0 : attenuazione di spazio libero

- L_{rts} : attenuazione dovuta alla diffrazione roof-to-street (Ikegami)

$$L_{\text{rts}} = -16.9 - 10 \log(w \text{ [m]}) + 10 \log(f \text{ [MHz]}) + 20 \log(\Delta h_{\text{mobile}}) + L_{\text{ori}}$$

$$L_{\text{ori}} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi(^{\circ}) & \text{per } 0^{\circ} \leq \varphi < 35^{\circ} \\ 2.5 + 0.075(\varphi(^{\circ}) - 35) & \text{per } 35^{\circ} \leq \varphi < 55^{\circ} \\ 4.0 - 0.114(\varphi(^{\circ}) - 55) & \text{per } 55^{\circ} \leq \varphi \leq 90^{\circ} \end{cases}$$

- L_{msd} : attenuazione dovuta alla diffrazione da schermi multipli (Walfish-Bertoni)

$$L_{\text{msd}} = L_{\text{bsh}} + k_a + k_d \log(R \text{ [km]}) + k_f \log(f \text{ [MHz]}) - 9 \log(b \text{ [m]})$$

I termini L_{bsh} e k_a non erano presenti nel modello originale e sono stati introdotti in ambito COST 231

$$L_{\text{bsh}} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_{\text{base}}[\text{m}]) & \text{per } h_{\text{base}} > h_{\text{roof}} \\ 0 & \text{per } h_{\text{base}} \leq h_{\text{roof}} \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{per } h_{\text{base}} > h_{\text{roof}} \\ 54 - 0.8 \Delta h_{\text{base}} & \text{per } R \geq 0.5 \text{ km e } h_{\text{base}} \leq h_{\text{roof}} \\ 54 - 0.8 \Delta h_{\text{base}} R[\text{km}]/0.5 & \text{per } R < 0.5 \text{ km e } h_{\text{base}} \leq h_{\text{roof}} \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{per } h_{\text{base}} > h_{\text{roof}} \\ 18 - 15 \Delta h_{\text{base}}/h_{\text{roof}} & \text{per } h_{\text{base}} \leq h_{\text{roof}} \end{cases}$$

$$k_f = \begin{cases} 0.7 \left(\frac{f [\text{MHz}]}{925} - 1 \right) & \text{per città medie} \\ 1.5 \left(\frac{f [\text{MHz}]}{925} - 1 \right) & \text{per centri metropolitani} \end{cases}$$