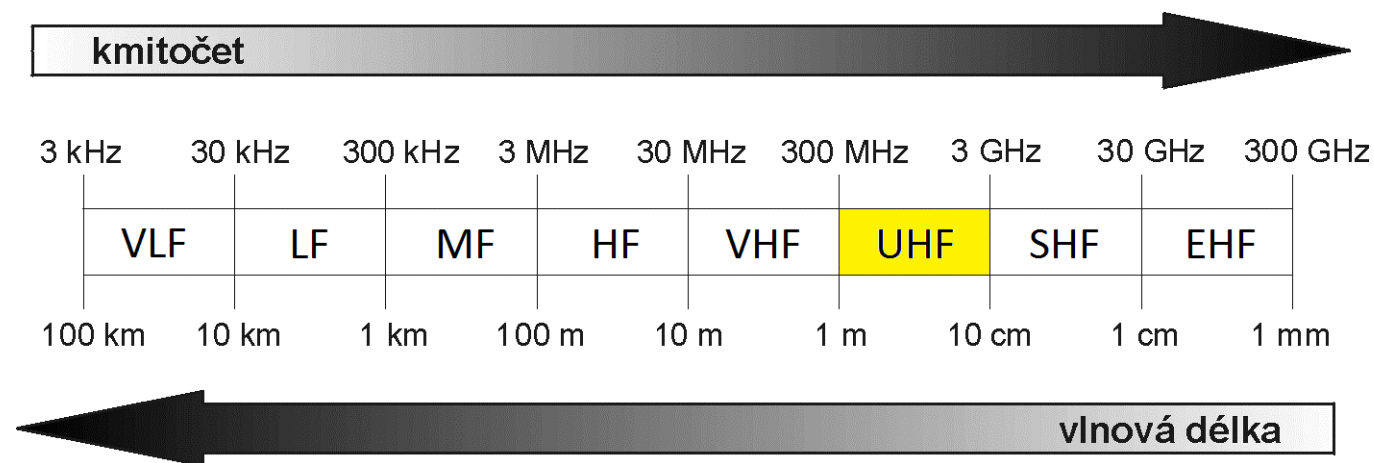


Mobilní rádiový spoj

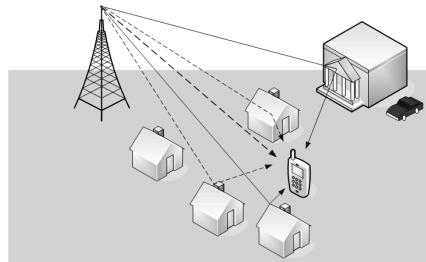
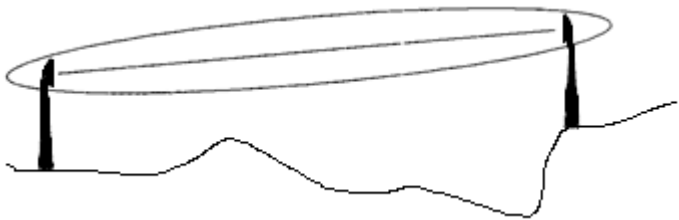
1



- Absorpce atmosférickými plyny
- Troposférická refrakce (lom)
- Úniky v troposféře (dešťové srážky, ...)
- Rozptyl
- Difrakce
- Odraz
- Vícecestné šíření

Slidy byly vytvořeny jako podpora při sledování výkladu přednášky. Proto je jejich využití pro samostudium či jako podklad k přípravě na zápočtový text velmi omezené, neboť některé klíčové poznatky a ukázkové příklady jsou vysvětlovány na tabuli a většina obrázků vyžaduje slovní doprovod. Pro samostudium je na Moodlu k dispozici samostatný učební text.

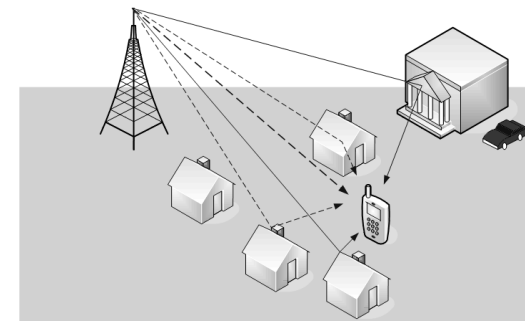
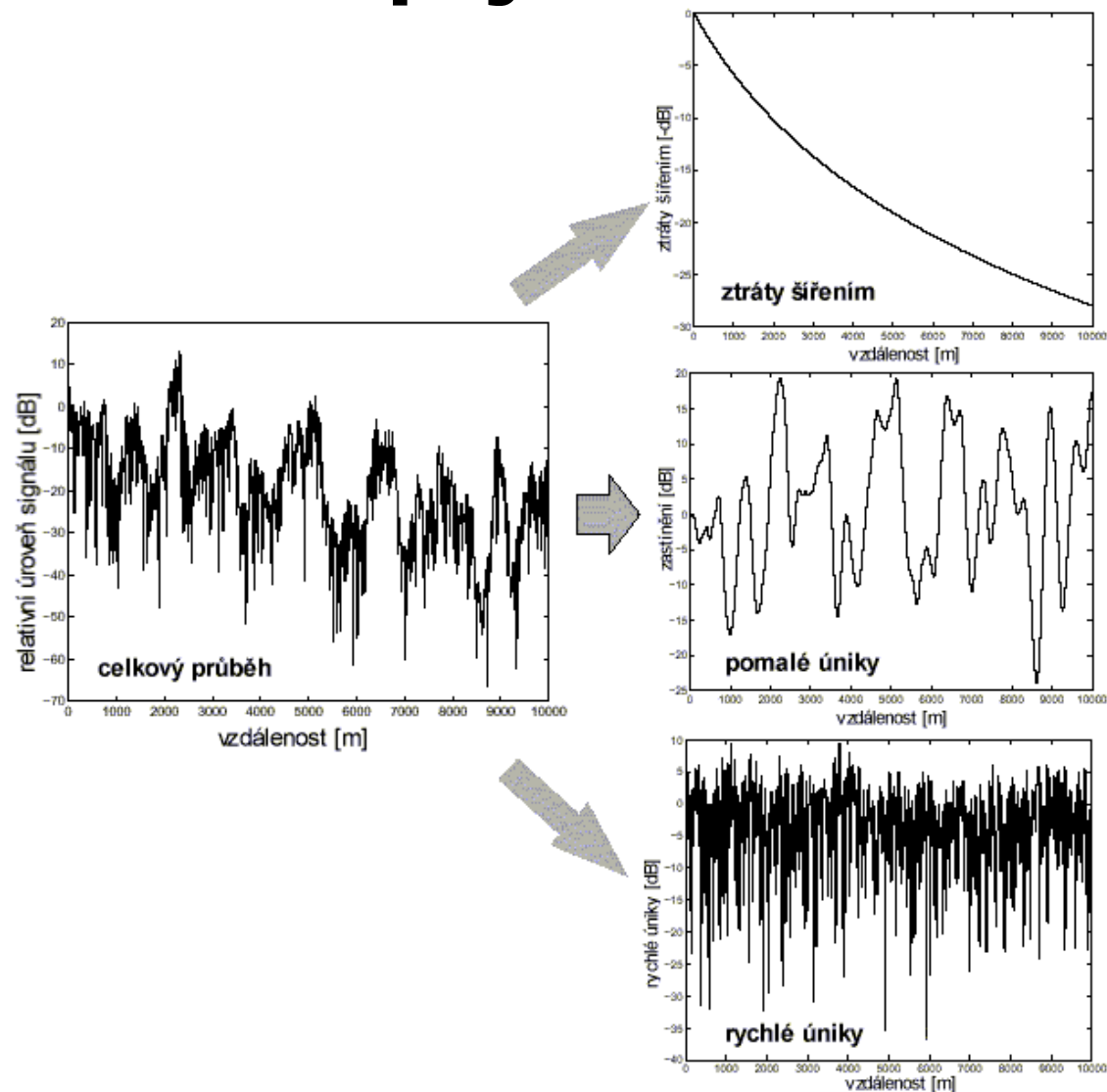
Aspekty šíření vln pro pevné a mobilní spoje



- pevné optimální umístění obou antén
- směrové antény
- přímá viditelnost
- relativně stabilní útlum
- vícecestné šíření
 - ◆ malé % času
 - ◆ většinou max 2 cesty s malým směrovým rozdílem
 - ◆ malá časová zpoždění (max cca 6 ns)
 - ◆ při prostorové diverzitě je třeba odstupů řádově stovek λ
- interference
 - ◆ plánování, koordinace

- proměnlivé umístění mobilní antény
- nesměrové antény
- přímá viditelnost v malém % času
- velké kolísání útlumu o desítky dB
- vícecestné šíření
 - ◆ stále
 - ◆ více cest ze všech směrů s rozdílným zpožděním
 - ◆ velké rozpětí časových zpoždění (až řádu desítek μs)
 - ◆ při prostorové diverzitě postačí odstup i menší než λ
- interference
 - ◆ opakování kmitočtů, problém

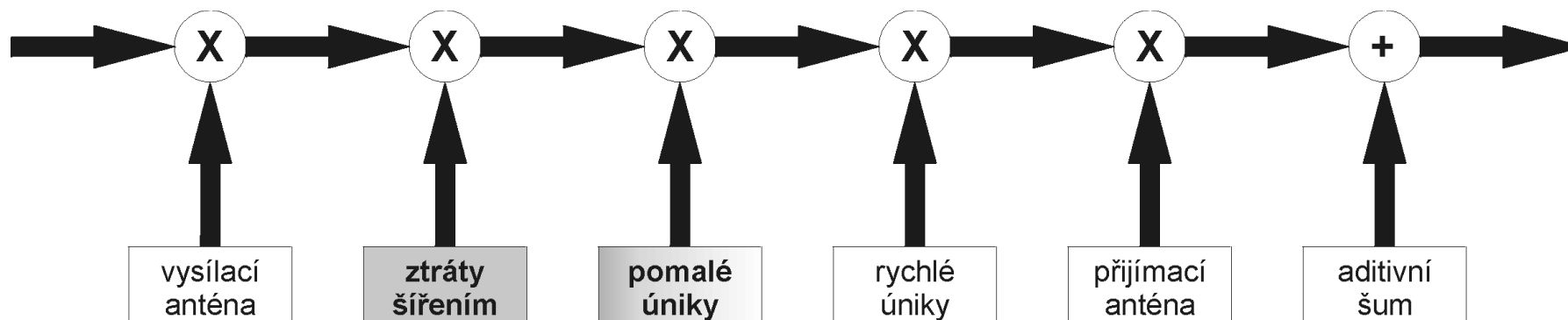
Mobilní spoj



- **pomalý únik** (*large-scale, long-term, slow fading*)
 - ◆ pozvolné změny střední hodnoty signálu
 - ◆ zastínění terénem, zástavbou, vegetací...
- **rychlý únik** (*small scale, short-term, fast fading*)
 - ◆ rychlé ($0,5\lambda$) změny okamžité hodnoty signálu
 - ◆ vícecestné šíření, pohybující se objekty

Převzato z Saunders, S.: *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, Wiley, 1999.

Mobilní spoj - výkonová rozvaha



$$L_c(p, t) = L(p) + X(t)$$

$L_c(p, t)$ je celkový útlum šíření v dB pro mobilní anténu v místě p a čase t

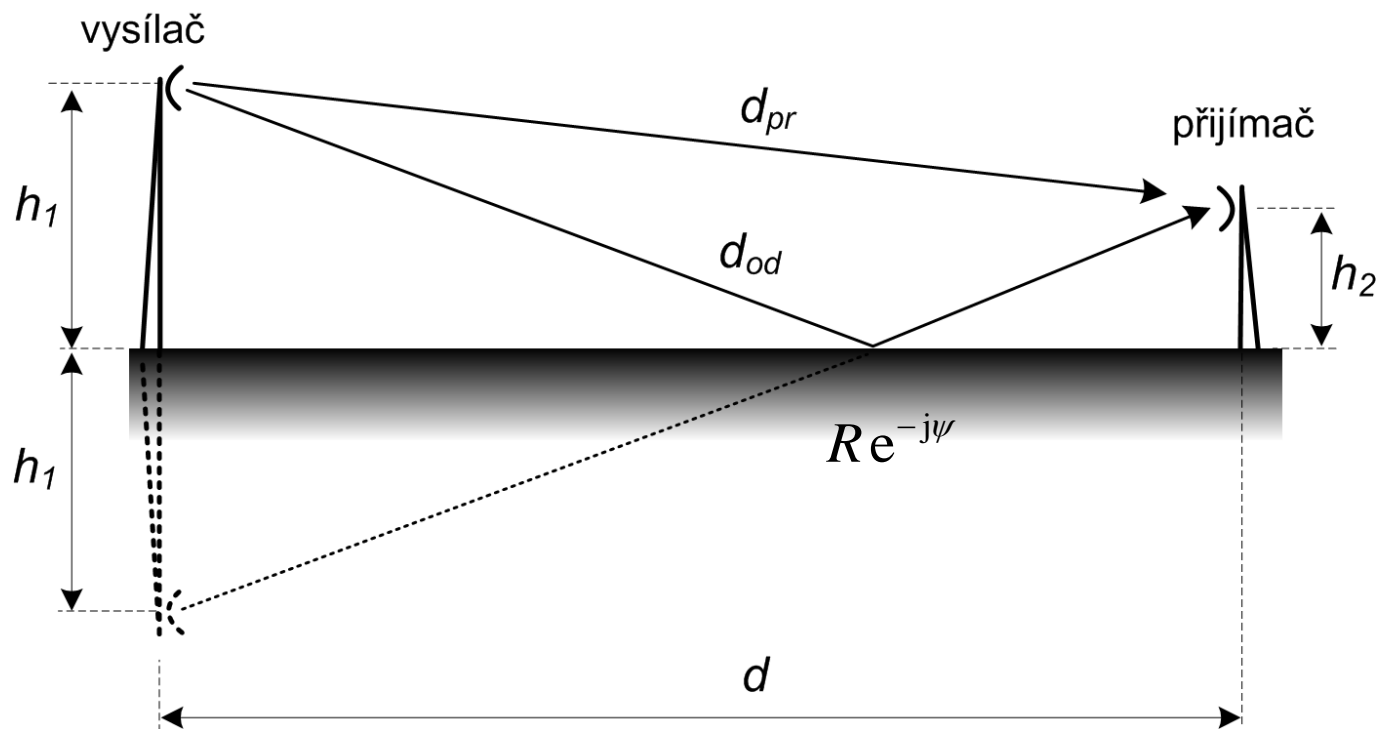
p poloha mobilní antény (souřadnice, vzdálenost od pevné antény apod.)

$L(p)$ střední hodnota útlumu v dB daná pozicí mobilní antény p

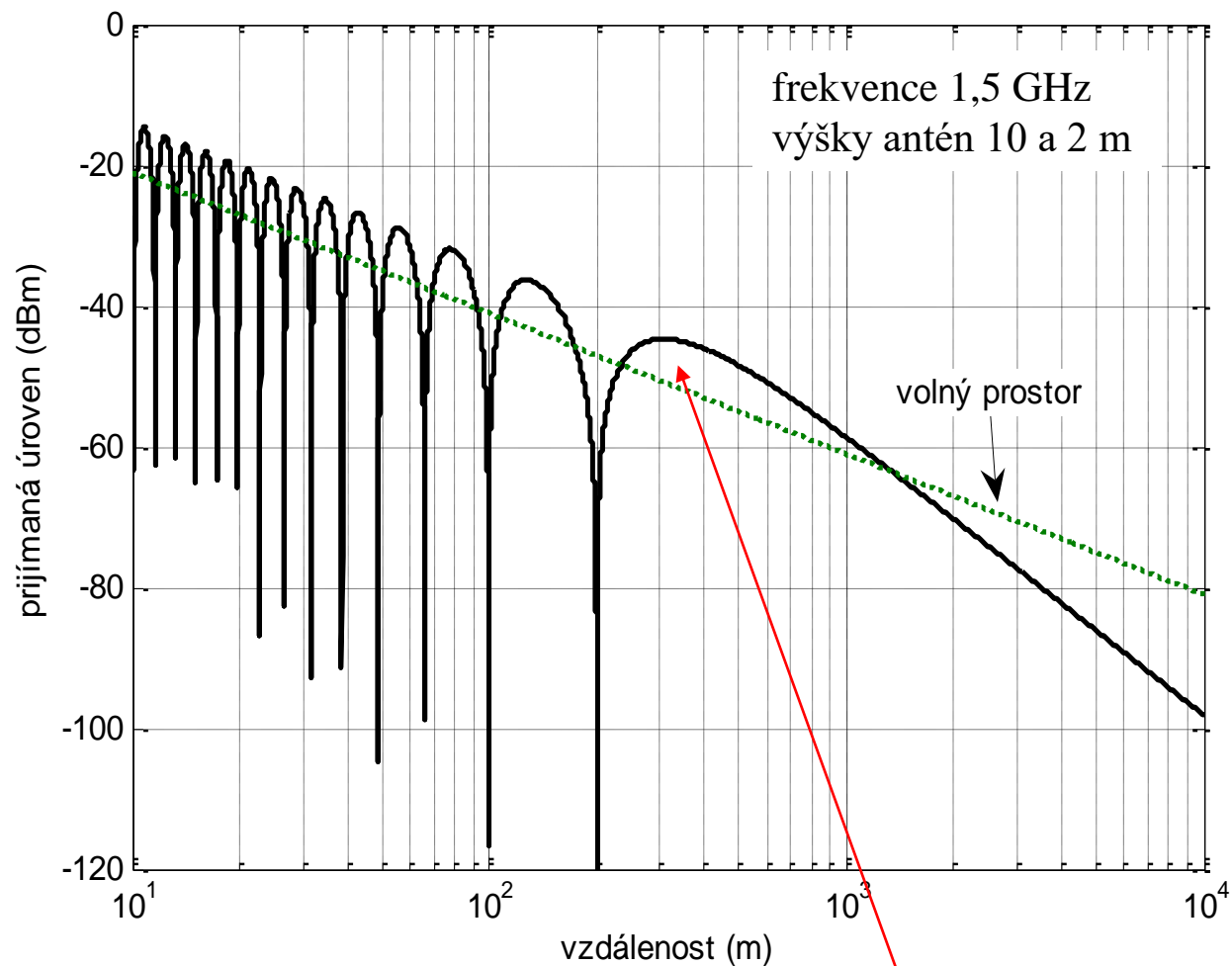
$X(t)$ časově proměnlivá náhodná složka útlumu v dB s nulovou střední hodnotou daná statistickým rozložením úniků v čase

Šíření nad rovinnou zemí

5



Šíření nad rovinnou zemí



$$\left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d_0} \right) = \frac{\pi}{2} \Rightarrow d_0 = \frac{4h_1 h_2}{\lambda}$$

$$\Delta d = d_{od} - d_{pr} \approx \frac{2h_1 h_2}{d} = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \text{Fresnelův zlom}$$

$$F = 2 \left| \sin \left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d} \right) \right|$$

Činitel tlumení $F = \langle 0, 2 \rangle$

pro velké d :

$$F \cong 2 \left| \left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d} \right) \right| \approx \frac{1}{d}$$

$$E_1 \approx \frac{1}{d}$$

$$E = E_1 F \approx \frac{1}{d^2}$$

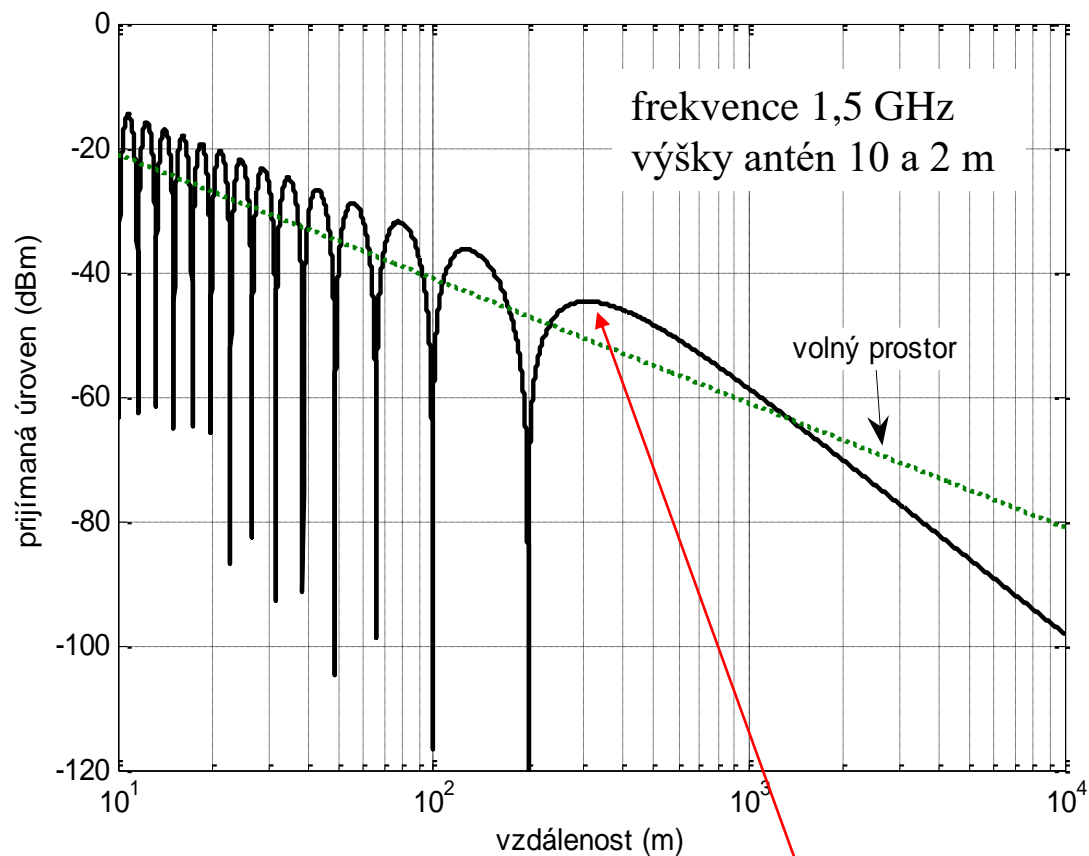
$$P_p \approx \frac{1}{d^4}$$

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda d}{2\pi h_1 h_2} \right) \right)^2$$

$$= \frac{d^4}{(h_1 h_2)^2}$$

Šíření nad rovinnou zemí

7



$$F = 2 \left| \sin \left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d} \right) \right|$$

Činitel tlumení F
 $= \langle 0, 2 \rangle$

pro velké d :

$$F \cong 2 \left| \left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d} \right) \right| \approx \frac{1}{d}$$

$$E_1 \approx \frac{1}{d}$$

$$E = E_1 F \approx \frac{1}{d^2}$$

$$P_p \approx \frac{1}{d^4}$$

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda d}{2\pi h_1 h_2} \right) \right)^2$$

$$= \frac{d^4}{(h_1 h_2)^2}$$

$$\left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d_0} \right) = \frac{\pi}{2} \Rightarrow$$

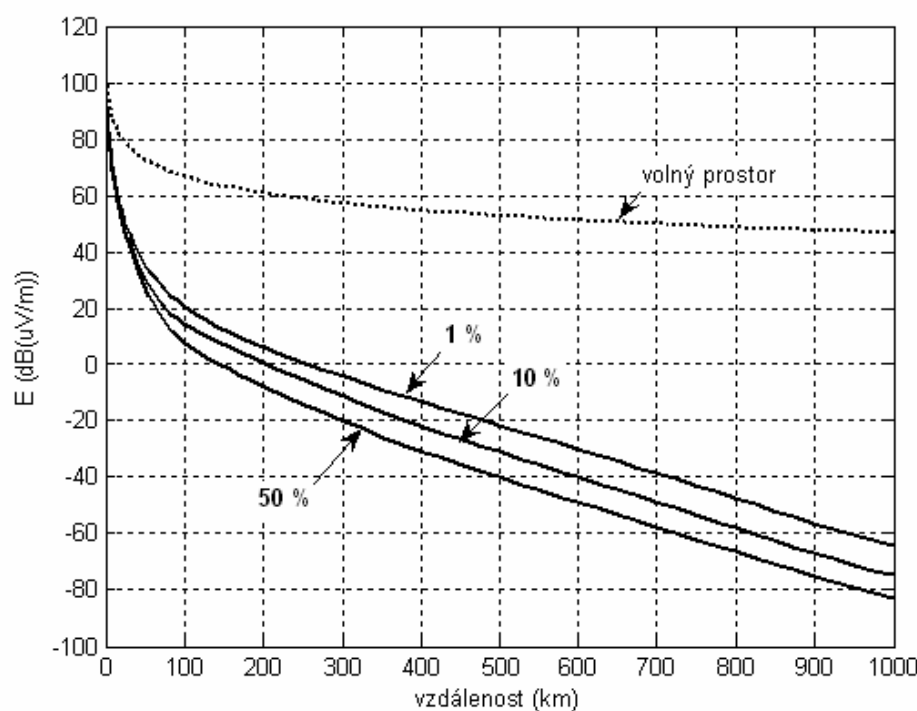
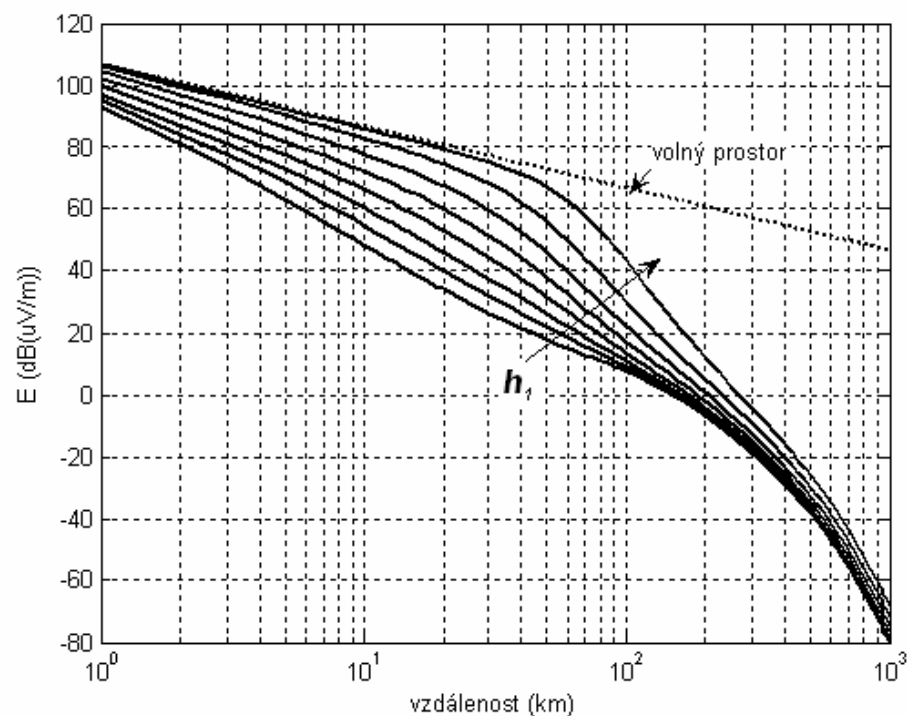
$$d_0 = \frac{4h_1 h_2}{\lambda}$$

$$\Delta d = d_{od} - d_{pr} \approx \frac{2h_1 h_2}{d} = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow$$

Fresnelův zlom

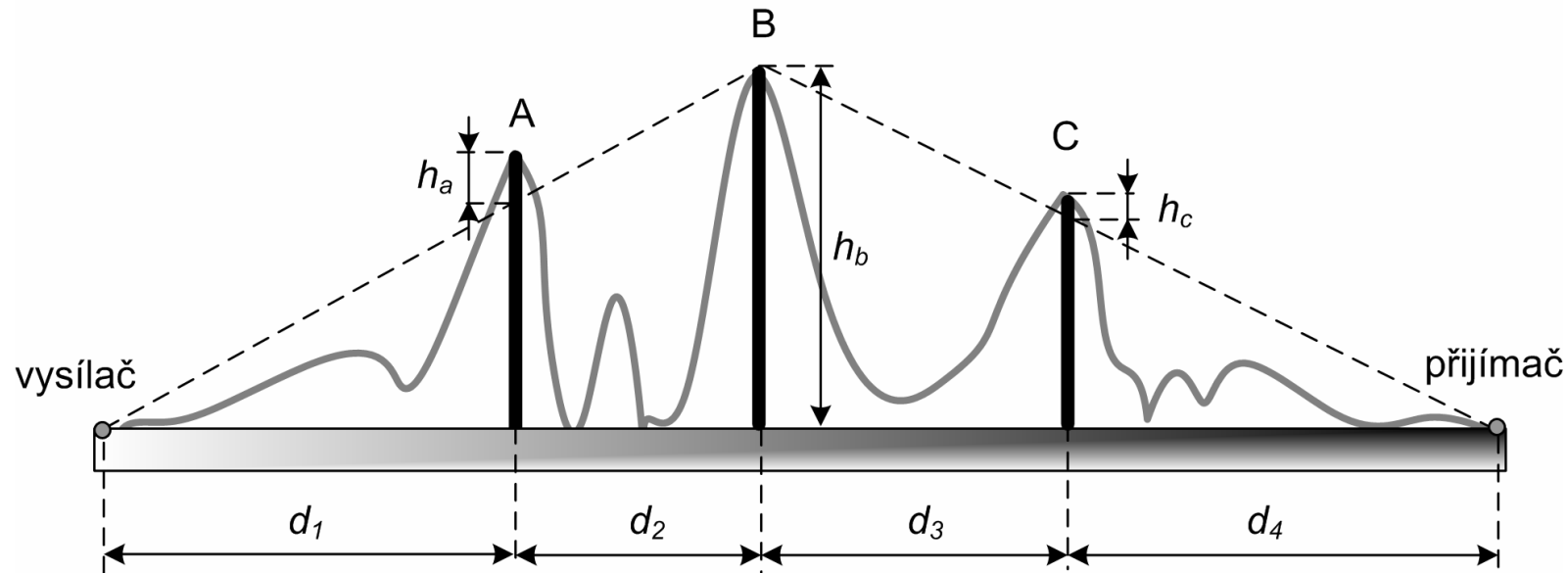
Modely šíření nad nerovným terénem

- Exaktní deterministický přístup – nereálné
- Empirický přístup na základě statistického zpracování velkého množství reprezentativních měření
 - ◆ ITU-R P.1546
 - základní spádové křivky pro referenční spoj (hodnota intenzity pole překročená v 50% bodů pro území cca 200x200 m pro různá časová procenta a další parametry)
 - korekce pro konkrétní terénní profil



Výpočet vícenásobné difrakce pomocí dílčích difrakcí na ostré překážce

- Bullingtonova metoda
- Epstein-Petersonova metoda
- Japonská metoda
- Deygoutova metoda



- Causebrook, Giovanelli,...

Šíření vlny v zástavbě

□ Odraz

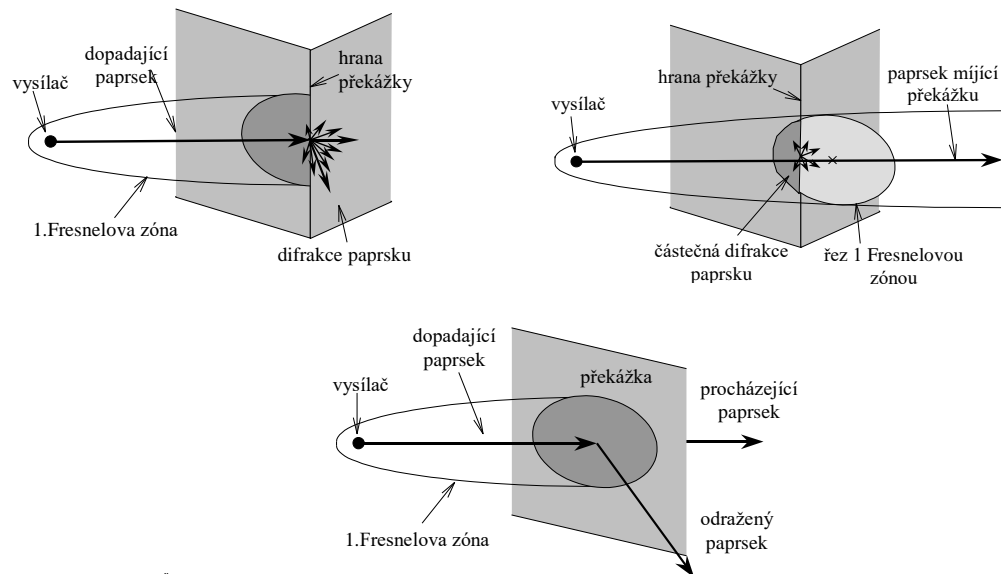
- ◆ země / stěny / ostatní objekty...
- ◆ Difúzní odraz (rozptyl)
- ◆ Neúplný odraz

□ Průchod

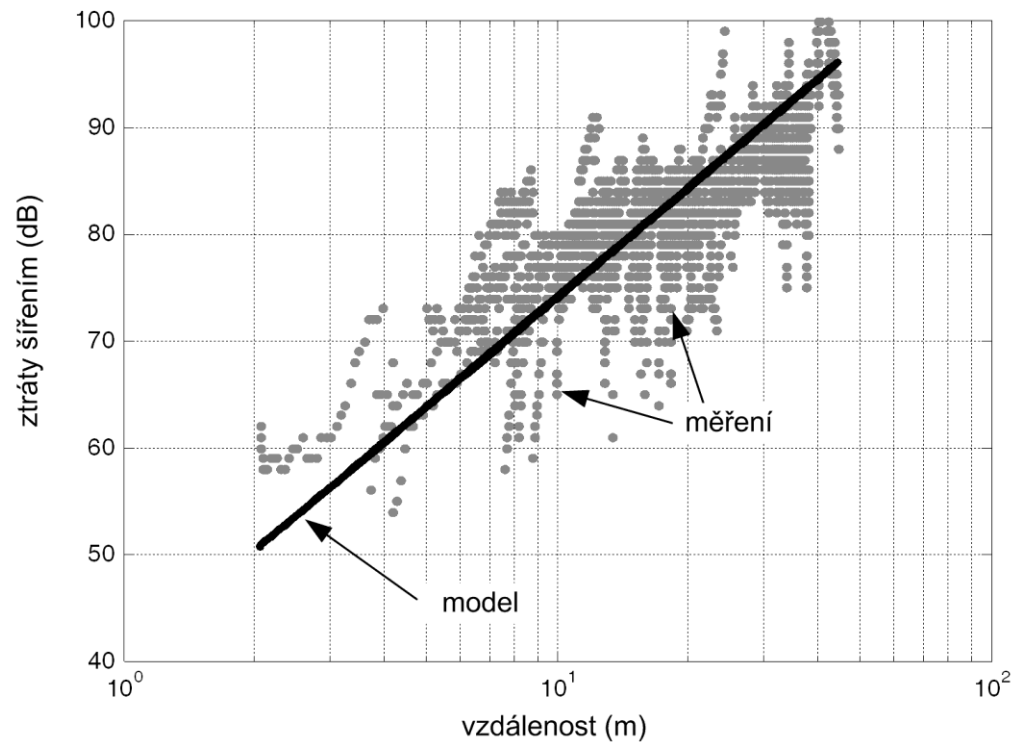
- ◆ stěny / ostatní objekty...

□ Difrakce

- ◆ hrany stěn a střech / ostatní objekty...



Základní empirický model „ d^n “



$$P_p \approx \frac{1}{d^n}$$

$$L(d) = L_1(d_1) + 10n \log\left(\frac{d}{d_1}\right)$$

prostředí	n (-)
volný prostor	2,0
předměstská zástavba	2,5 – 4,0
hustá městská zástavba	3,0 – 5,0
uvnitř budov – přímá optická viditelnost	1,6 – 1,8
uvnitř budov – zastínění	3,0 – 6,0

Okumura-Hata Model

$$L_p = L_0 + 10n \log(d) \quad L_p[dB] \approx 10n \log(d)$$

$$L_p \approx \frac{1}{d^n} \quad n = 3.5 \div 4$$

$$L_0 = C_1 + C_2 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + C_0 \quad \text{intercept [dB]}$$

$$n = [4.49 - 6.55 \log(h_b)] / 10 \quad \text{path - loss slope}$$

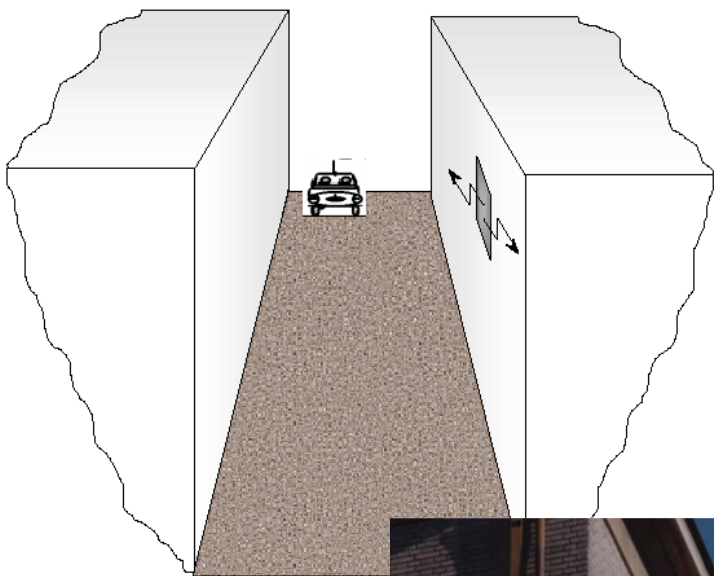
$$L_{suburban} = L_p - 2 \log^2\left(\frac{f}{28}\right) - 5.4 \quad \text{pro předměstské/venkovské prostředí}$$

$$L_{openareas} = L_p - 4.78 \log^2(f) + 18.33 \log(f) - 40.94 \quad \text{pro otevřenou krajinu}$$

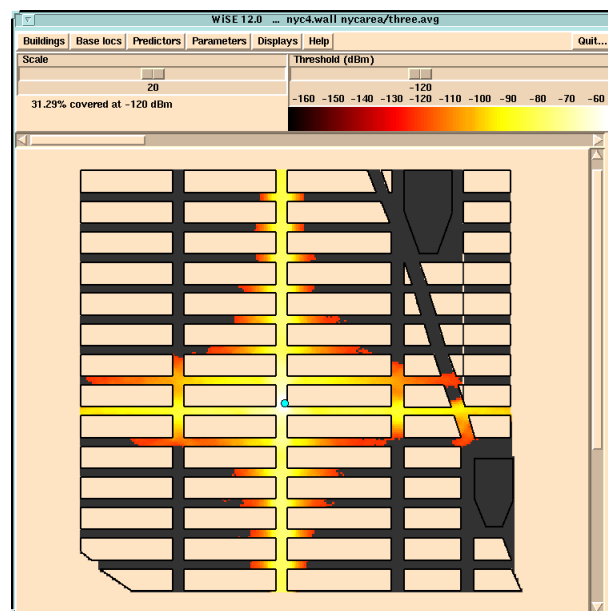
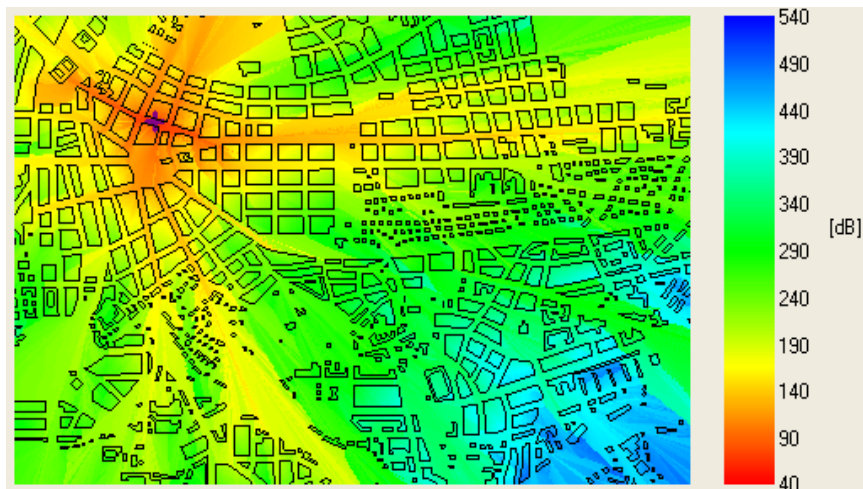
□ Limity použitelnosti Okumura-Hata modelu

- ♦ $f = 150 - 2000 \text{ MHz}$
- ♦ $h_b = 30 - 200 \text{ m}$
- ♦ $h_m = 1 - 10 \text{ m}$
- ♦ $d = 1 - 20 \text{ km}$
- ♦ $h_b > h_{\text{roof}}$

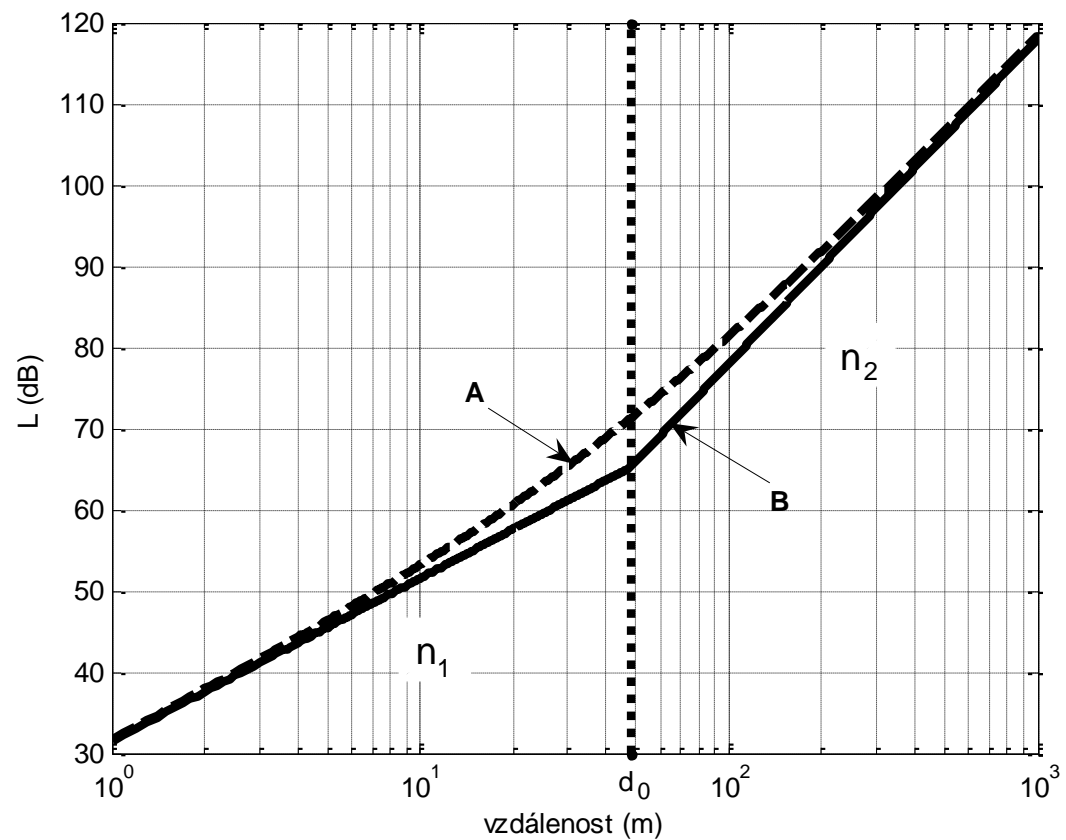
Modely šíření v mikrouhňkách



Modely šíření v mikroučinkách



Základní empirický model – Dual Slope



$$L(d) = L_1 + 10n_1 \log d \quad d \leq d_0$$

$$L(d) = L_1 + 10n_1 \log d_0 + 10n_2 \log \frac{d}{d_0} \quad d > d_0$$

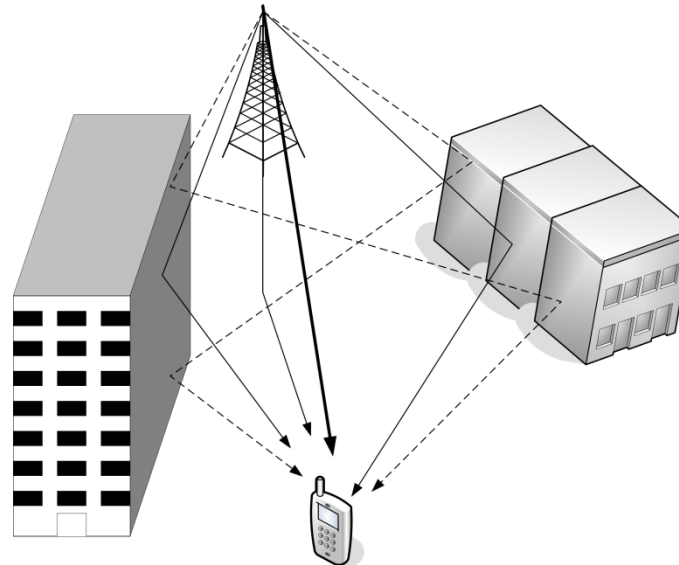
$$L(d) = L_1 + 10n_1 \log d + 10(n_2 - n_1) \log \left(1 + \frac{d}{d_0} \right)$$

$$d_0 = \frac{4h_1h_2}{\lambda}$$

Deterministické (fyzikální) optické modely

$$\vec{\mathbf{E}} = \sum_i \vec{\mathbf{E}}_i$$

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{E}_0 F(\vartheta, \varphi) \frac{e^{-jkd}}{d} \prod_{m=1}^M \mathbf{R}_m \prod_{n=1}^N \mathbf{D}_n \prod_{q=1}^Q \mathbf{P}_q$$



\mathbf{E}_0 konstanta závislá na výkonu vysílače

ϑ, φ sférické souřadnice určující směr šíření paprsku od vysílací antény

$F(\vartheta, \varphi)$ normovaná amplitudová vyzařovací charakteristika vysílací antény

d celková délka dráhy paprsku

k konstanta šíření

M celkový počet odrazů na dráze paprsku

\mathbf{R}_m koeficient m -tého odrazu

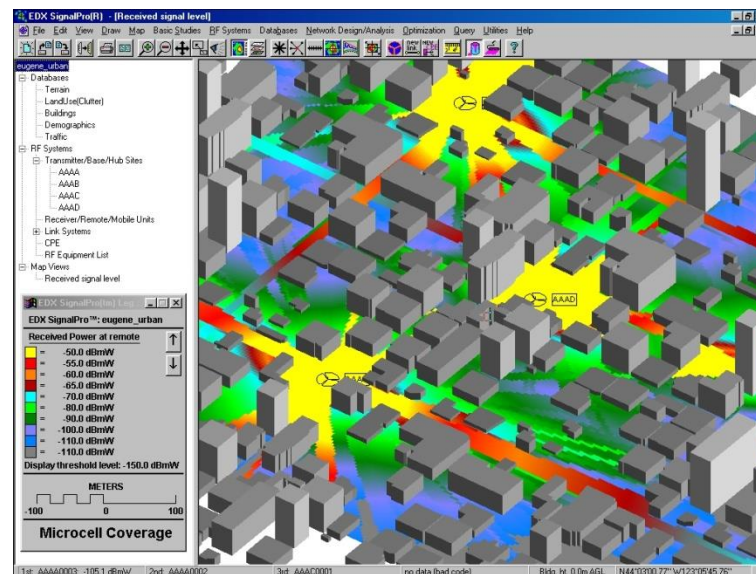
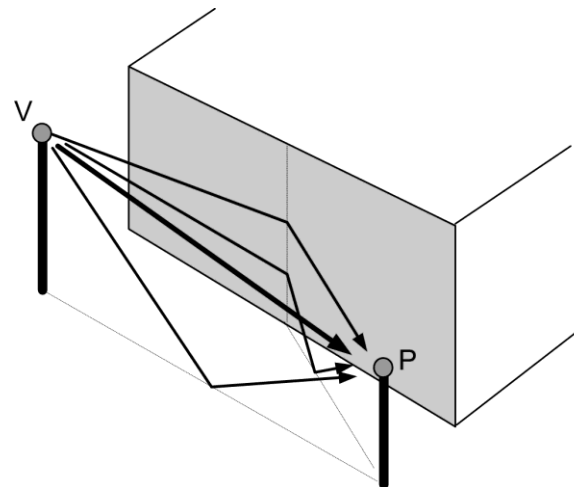
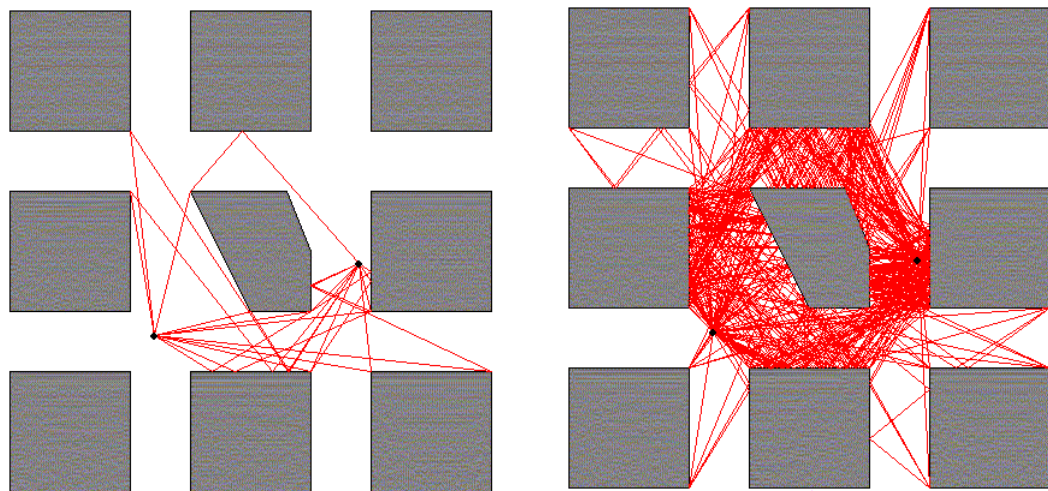
N celkový počet difrakcí na dráze paprsku

\mathbf{D}_n koeficient n -té difrakce

Q celkový počet prostupů překážkami (např. stěnami) na dráze paprsku

\mathbf{P}_k je koeficient q -tého prostupu

Optické modely – 2D, 3D, 2,5D



ITU-R P.1411 Semi-empirický UHF model pro mikrobuňky

LOS:

$$L_{\min}(d) = L_{BP} + 20 \log \frac{d}{d_0} \quad d \leq d_0$$

$$L_{\max}(d) = L_{BP} + 20 + 25 \log \frac{d}{d_0} \quad d \leq d_0$$

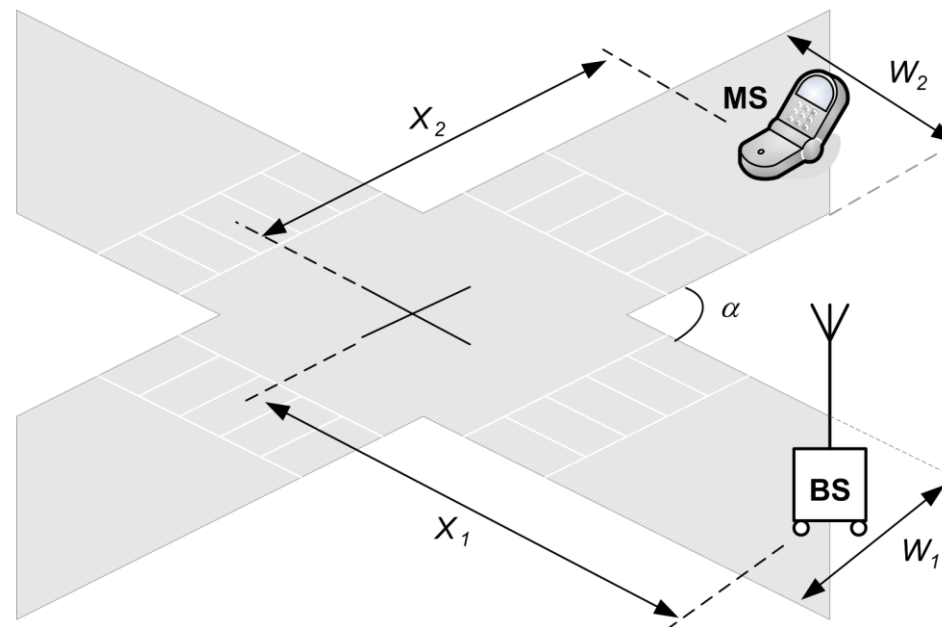
$$L_{\min}(d) = L_{BP} + 40 \log \frac{d}{d_0} \quad d > d_0$$

$$L_{\max}(d) = L_{BP} + 20 + 40 \log \frac{d}{d_0} \quad d > d_0$$

$$d_0 = \frac{4h_1h_2}{\lambda}$$

$$L_{BP} = 20 \log \frac{4\pi d_0}{\lambda} = 20 \log \frac{8\pi h_1h_2}{\lambda^2}$$

NLOS:

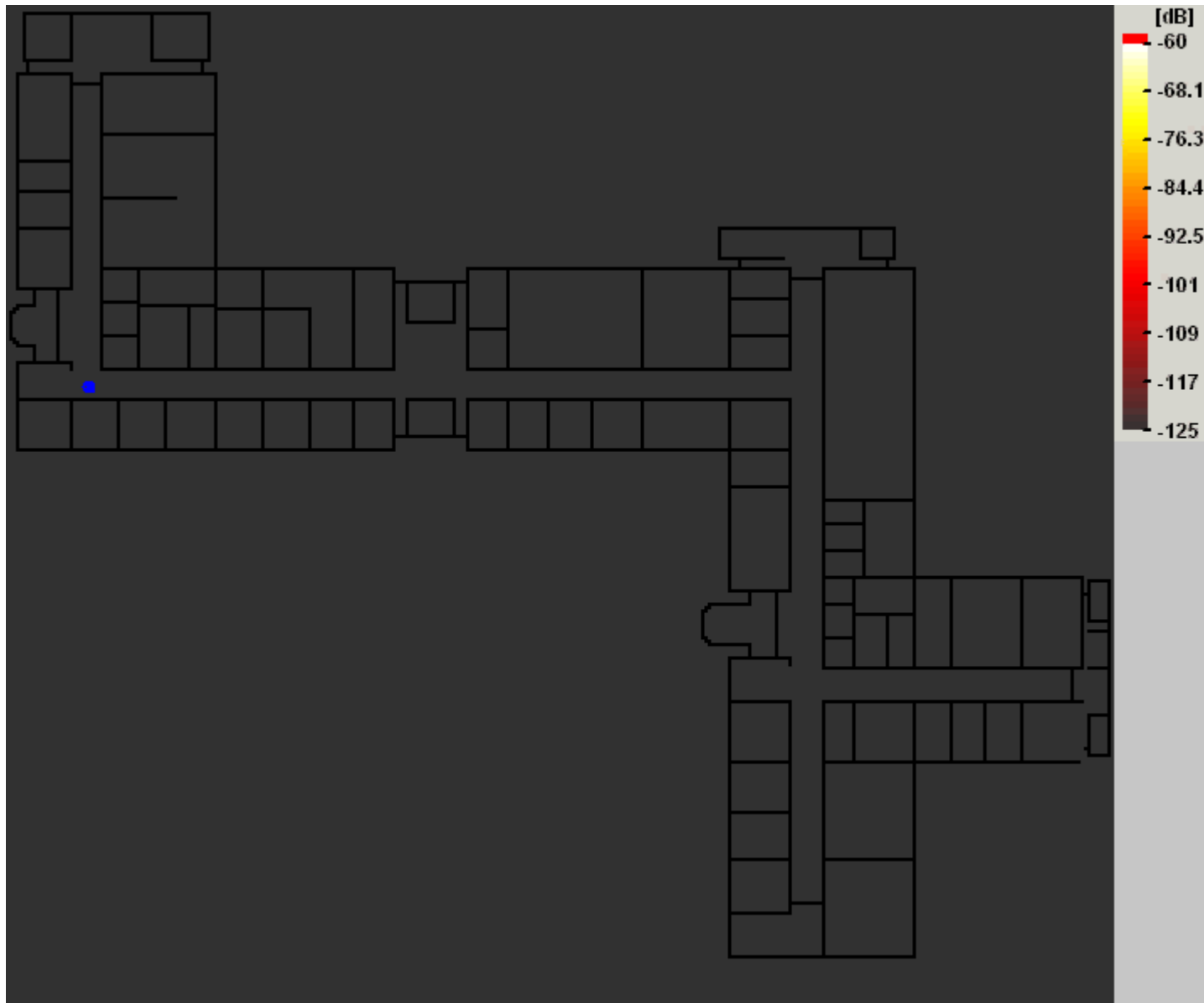


$$L = -10 \log(10^{-0,1L_r} + 10^{-0,1L_d})$$

$$L_r = 20 \log(x_1 + x_2) + \frac{x_1 x_2}{w_1 w_2} \frac{3,86}{\alpha^{3,5}} + 20 \log \frac{4\pi}{\lambda}$$

$$L_d = 10 \log[x_1 x_2 (x_1 + x_2)] + \frac{40}{\pi} \left(\arctan \frac{x_2}{w_2} + \arctan \frac{x_1}{w_1} - \frac{\pi}{2} \right) - 0,1 \left(90 - \frac{180}{\pi} \alpha \right) + 20 \log \frac{4\pi}{\lambda}$$

Modely šíření v pikobuňkách

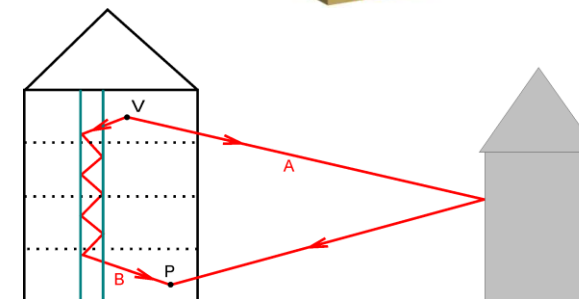
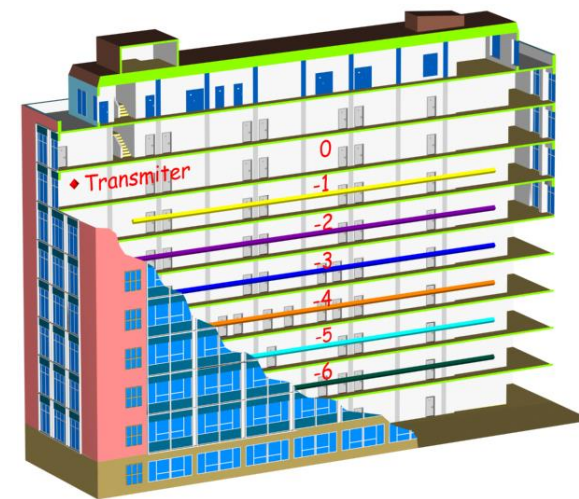


□ Obtížný popis prostředí

- ◆ konstrukce budovy
- ◆ mobiliář, lidé
- ◆ dveře, okna
- ◆ okolní zástavba

□ Komplikované šíření

- ◆ odraz
- ◆ průchod
- ◆ ohyb
- ◆ rozptyl



Empirický model (One Slope Model)

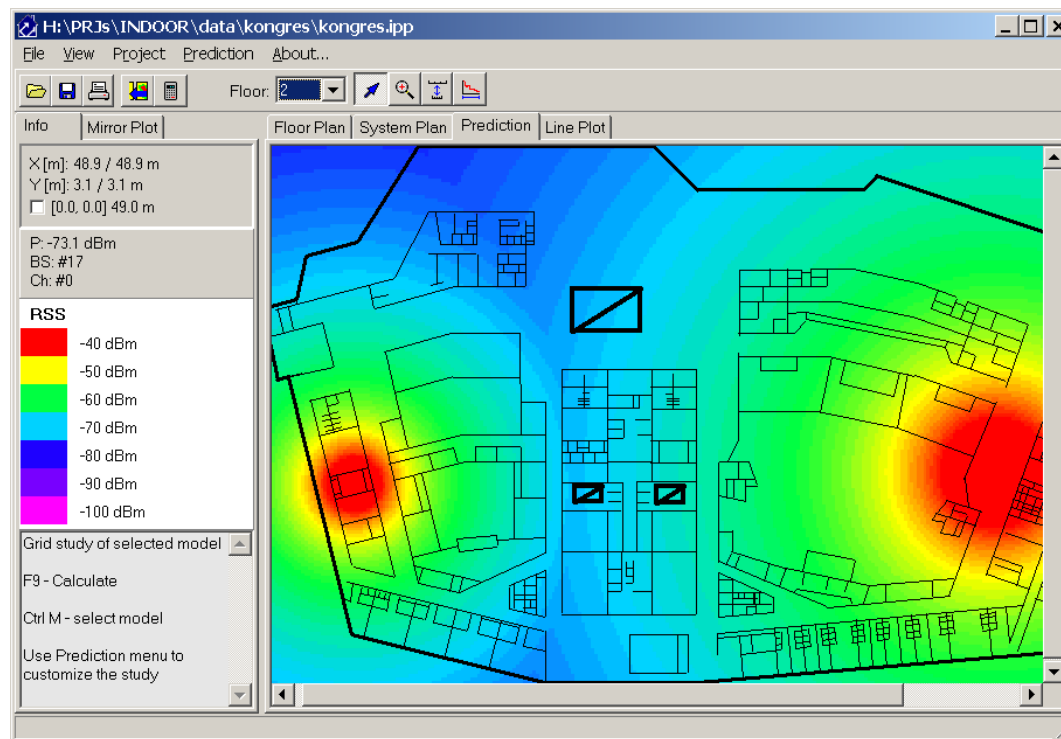
$$L(d) = L_1 + 10 n \log(d)$$

$L(d)$ je útlum šířením v [dB]

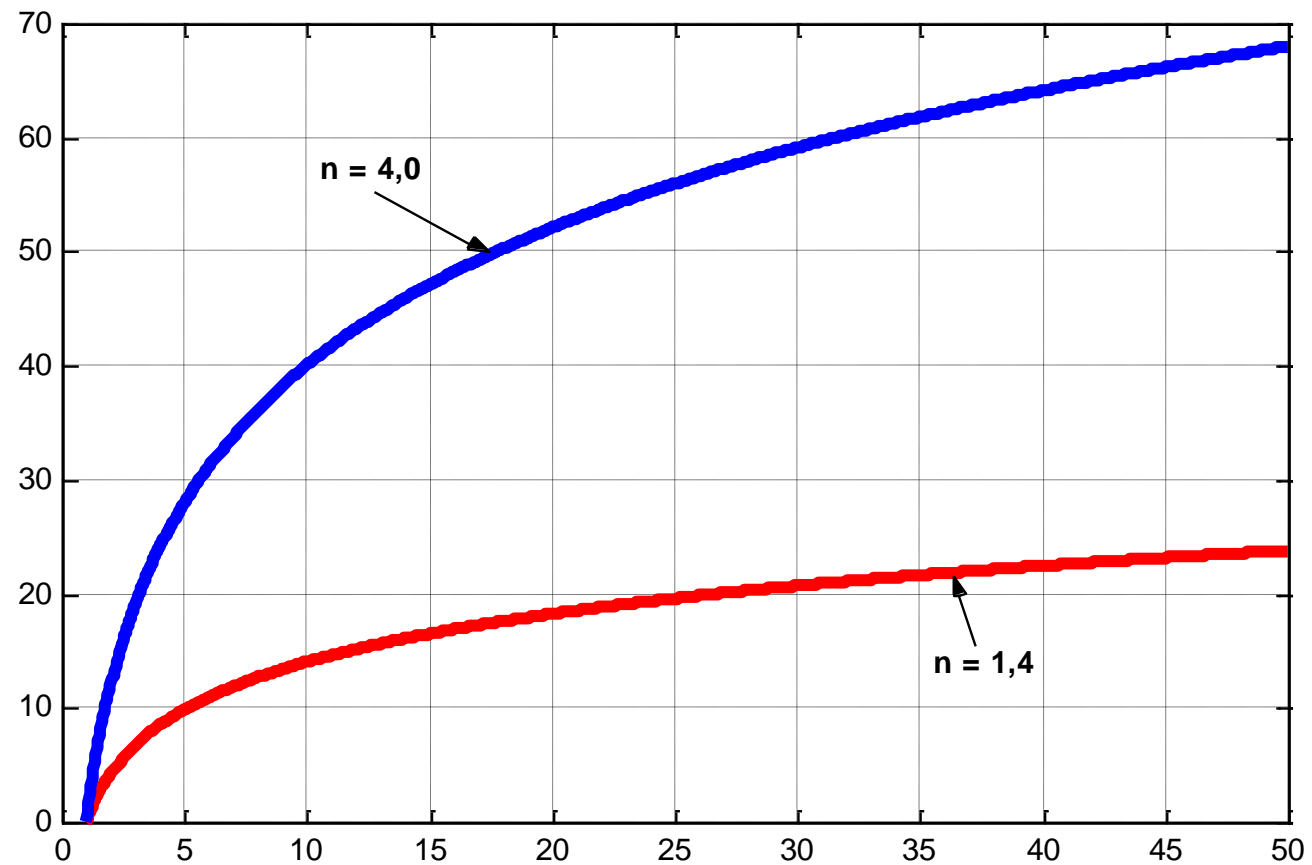
d vzdálenost v [m]

L_1 referenční útlum
vzdálenost 1 m

n spádový koeficient

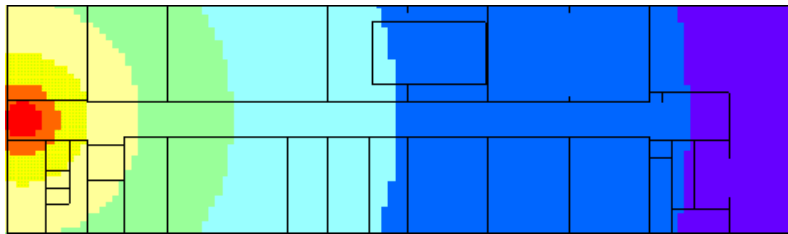


Volba spádového koeficientu

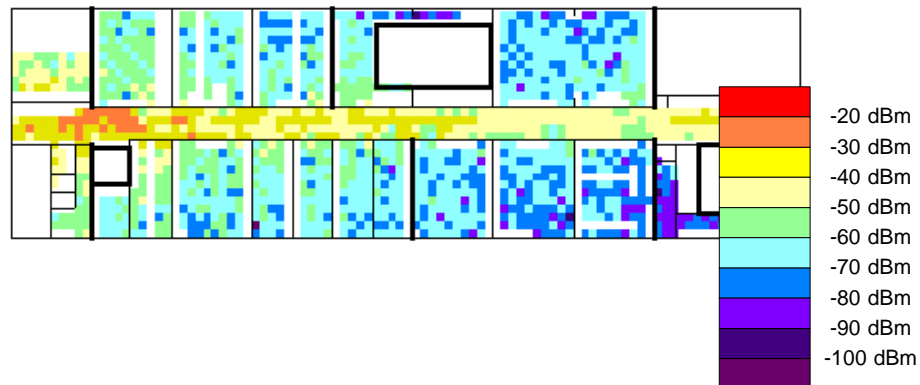


Volba spádového koeficientu

Predikce

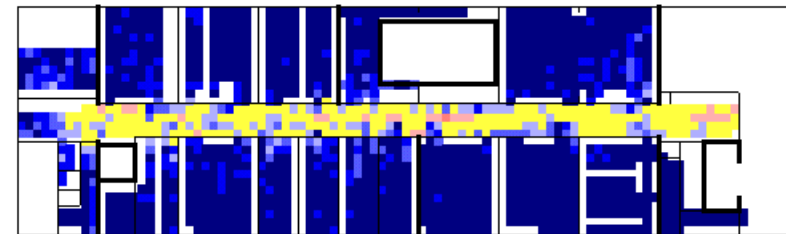


Měření

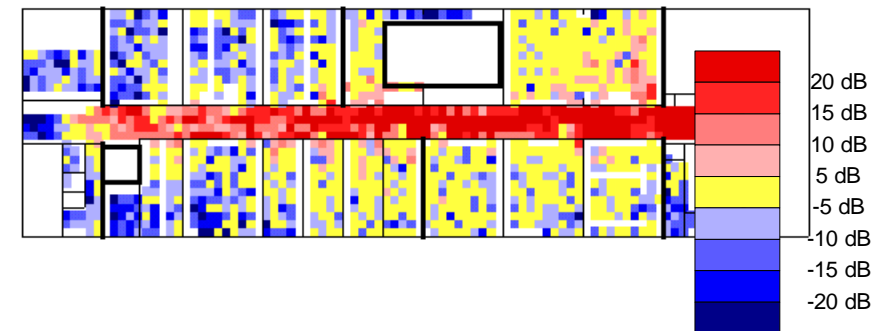


Chyba (měření – predikce)

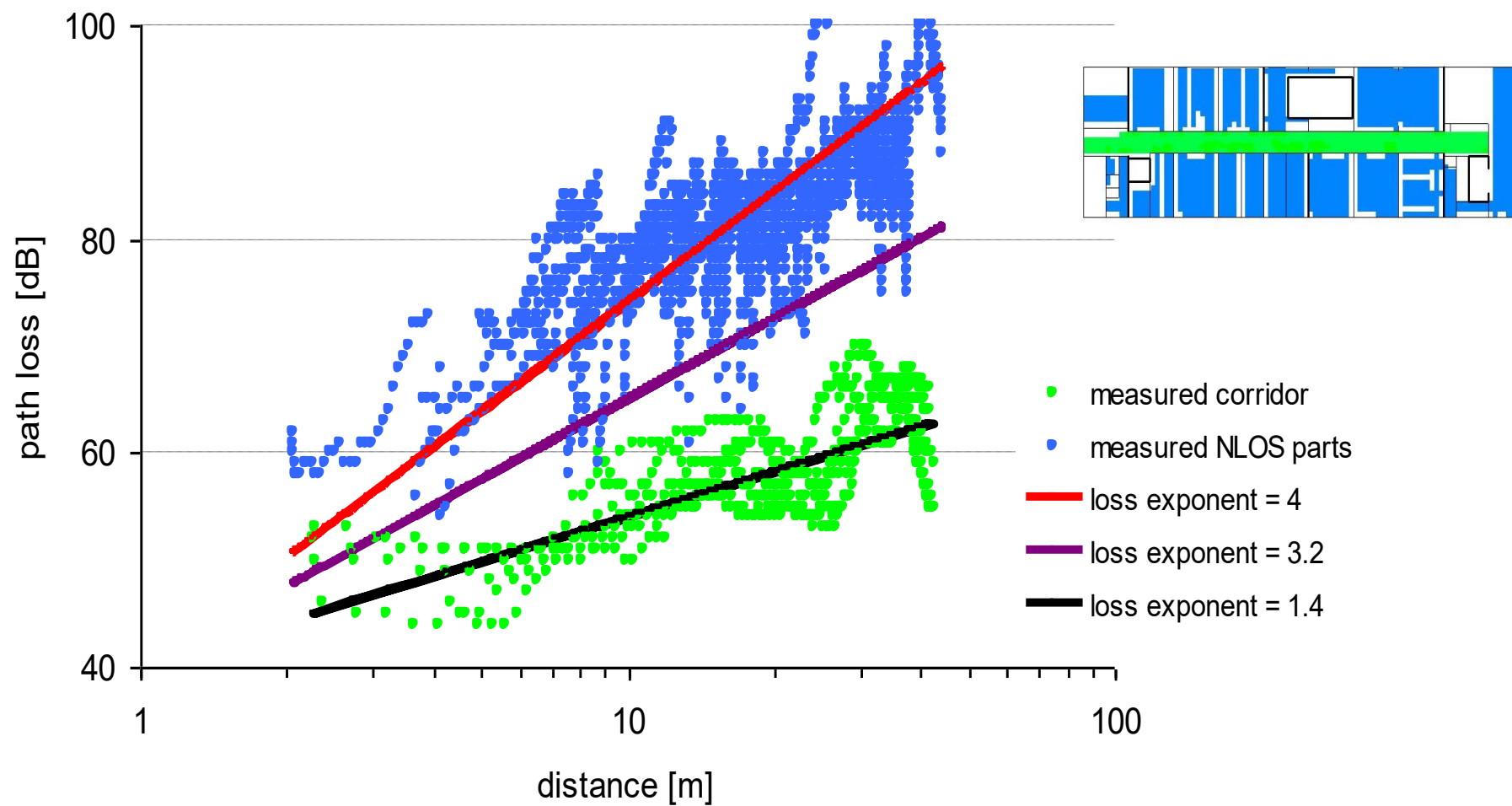
$n = 1.4$



$n = 4.0$



Volba spádového koeficientu



Semi-empirický model

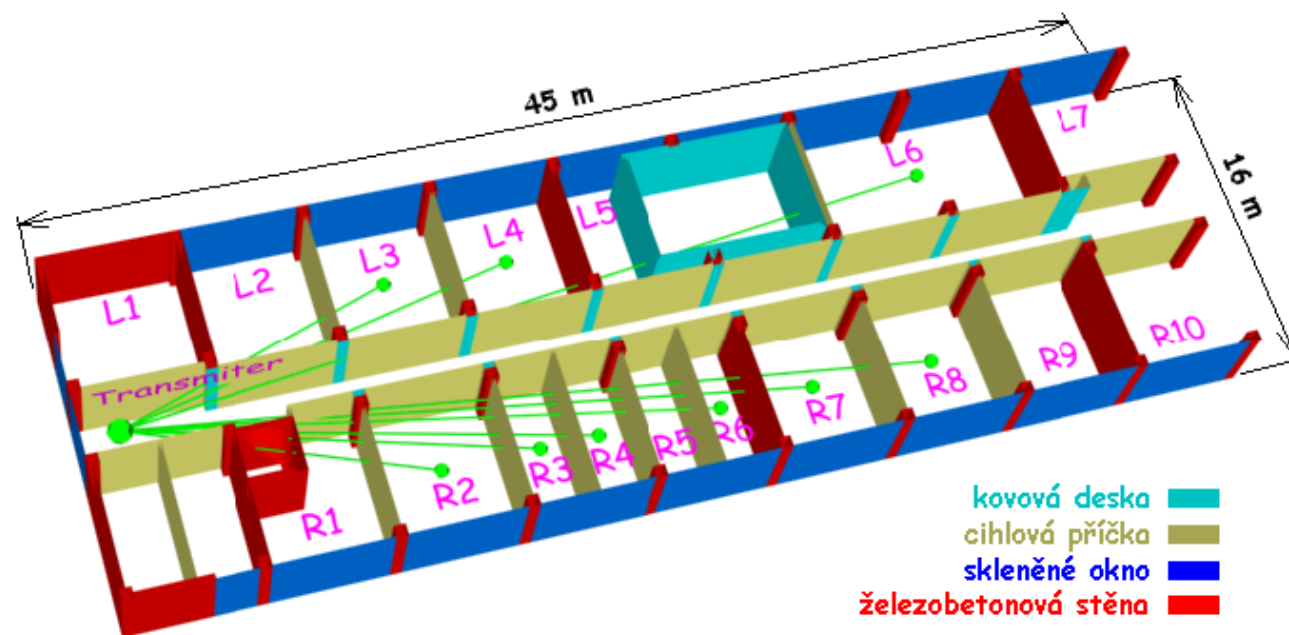
$$L(d) = L_1 + 10 n \log(d) + L_w k_w + L_f k_f$$

L_w je činitel útlumu paprsku průchodem stěnou v [dB]

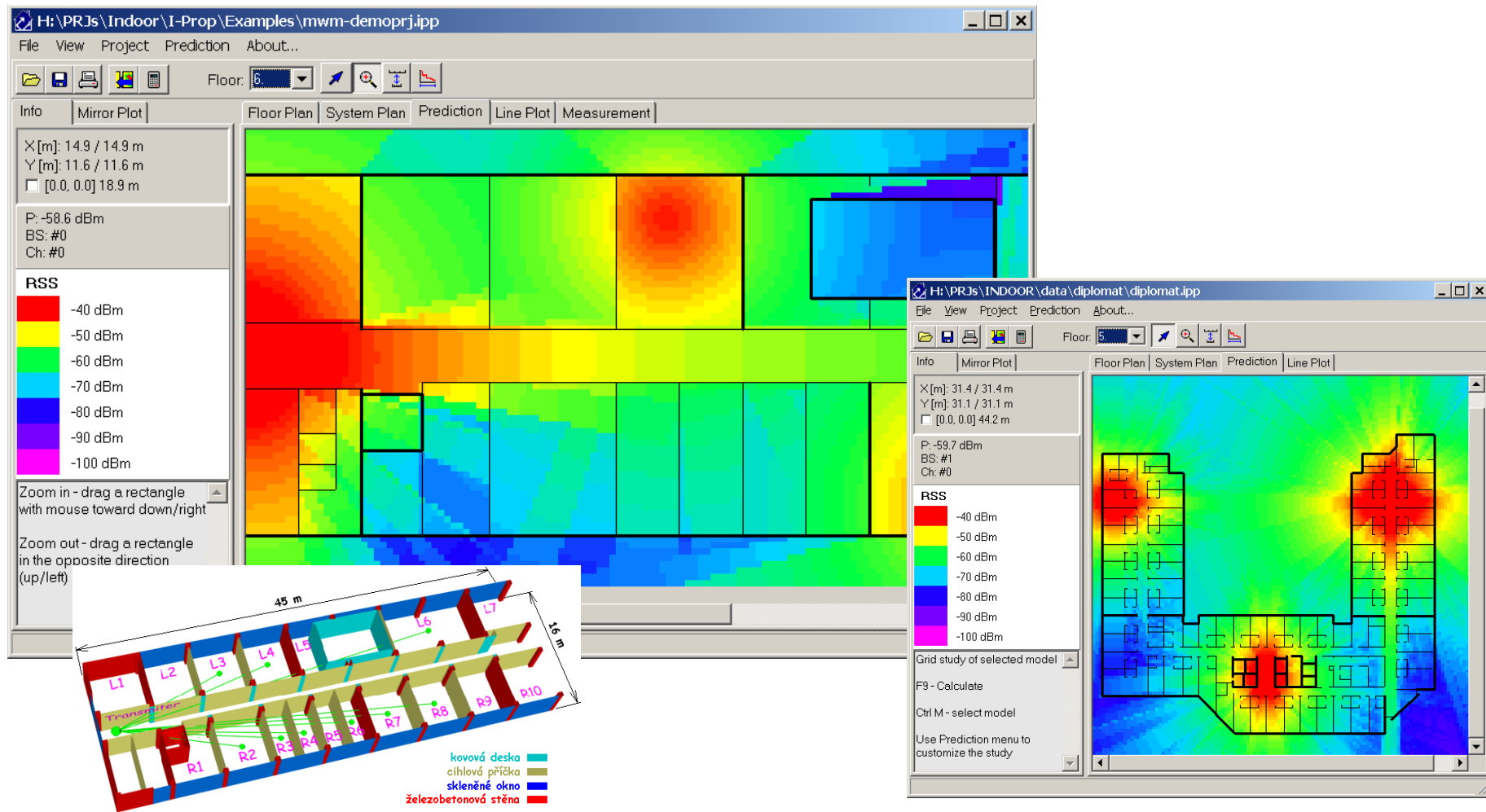
L_f činitel útlumu paprsku průchodem skrz podlaží v [dB]

k_w počet stěn

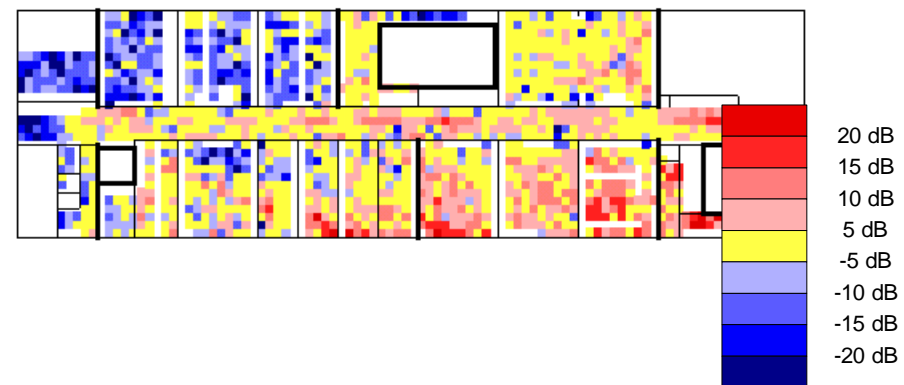
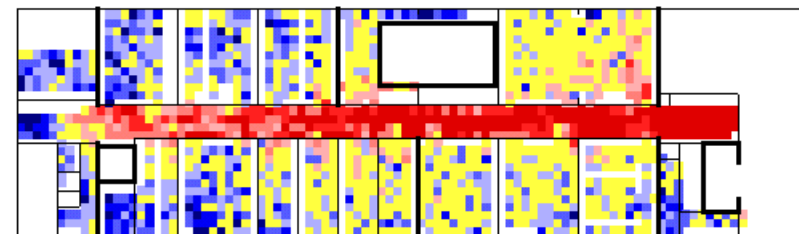
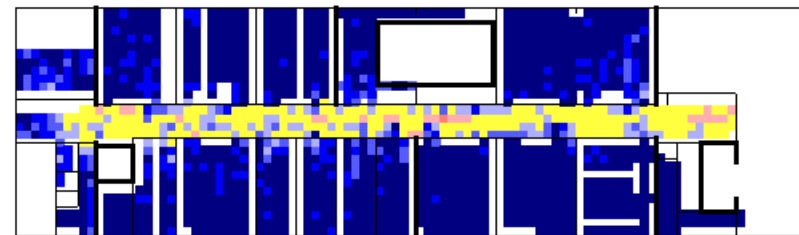
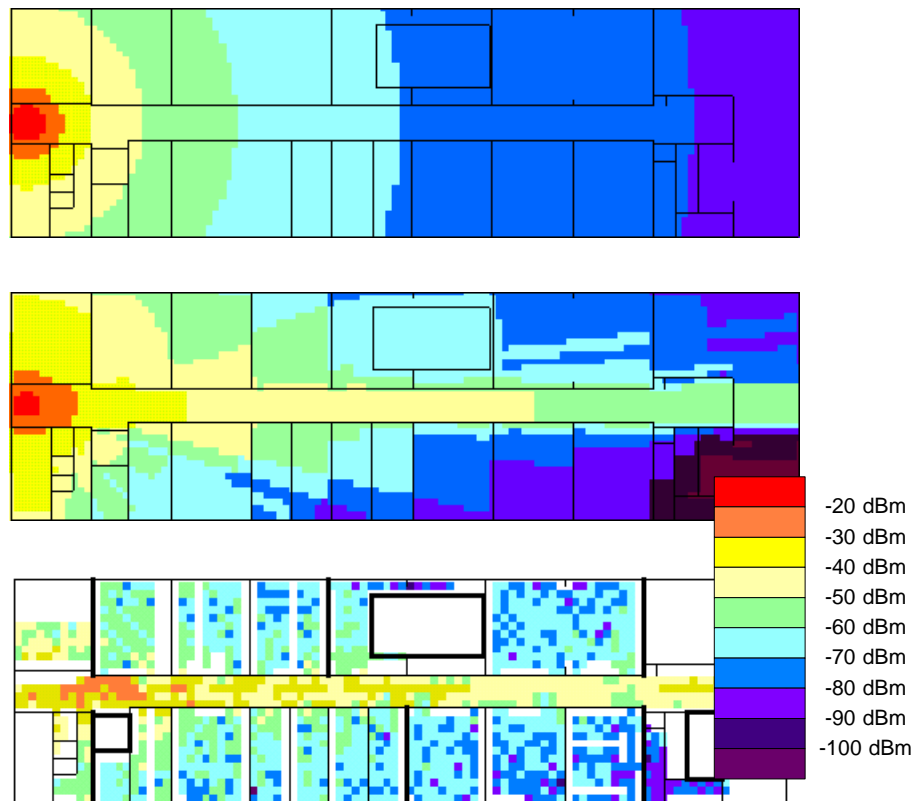
k_f počet pater



Semi-empirický model

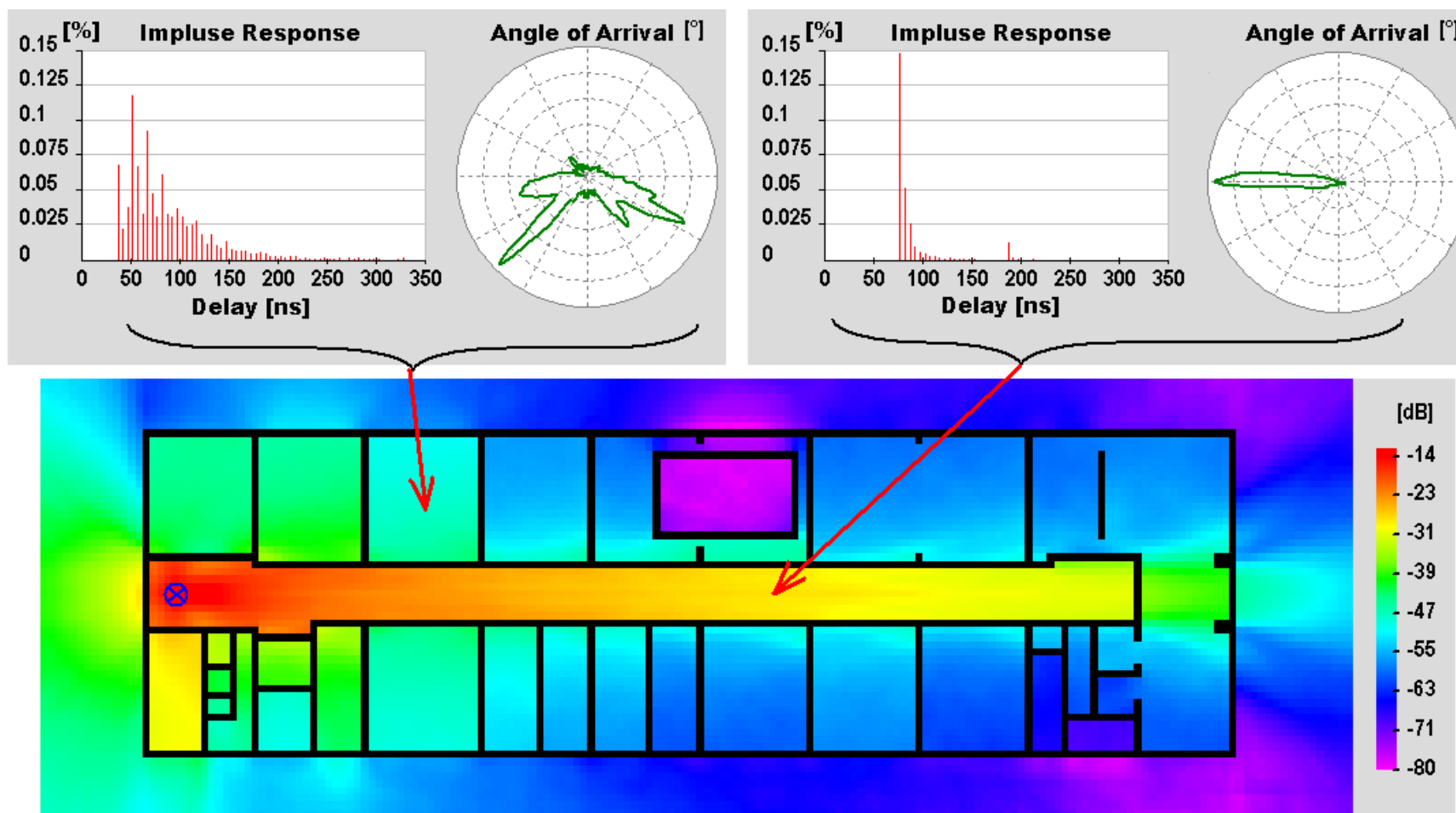


Měření x 1SM x MWM



Optické modely - Impulzová odezva

$$h(t) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{e^{-j\omega\tau_i}}{d_i} \prod_{m=1}^{M_i} \mathbf{R}_{im} \prod_{n=1}^{N_i} \mathbf{D}_{in} \prod_{q=1}^{Q_i} \mathbf{P}_{iq} \delta(t - \tau_i) \right]$$



Empirický vs. deterministický přístup

