

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2008

Zdeněk Roudnický

Univerzita Pardubice

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Model vícecestného šíření signálu v budovách

Zdeněk Roudnický

Bakalářská práce

2008

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektrotechniky  
Akademický rok: 2007/2008

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zdeněk ROUDNICKÝ**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**  
  
Název tématu: **Model vícecestného šíření signálu v budovách**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Náplní teoretické části je analýza modelů šíření signálu v budovách s důrazem na pásmo ISM 2,4 GHz, které je využíváno sítěmi pro přenos dat. Vybrané modely budou porovnány především s ohledem na použití v různých podmínkách (např. typy budov), detailněji budou rozpracovány empirické modely šíření. Modely šíření by měly zahrnovat problematiku umístění a směrovosti antén přístupových bodů sítě, vysílacího výkonu, odrazů atd. Praktická část bude zaměřena na vytvoření softwarového empirického modelu šíření signálu v budově s kolmým uspořádáním stěn. Pro modelování bude využit jazyk Matlab. U výstupního signálu bude možné zaznamenávat především přijímaný výkon a časový průběh přijímaného signálu.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Pechač, P. – Zvánovec, S.: Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů, 2007, 978-80-7300-223-7**

**Mazánek, M. - Pechač, P. - Vokurka, J.: Antény a šíření vln. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998. 250 s. ISBN 80-01-01855-5**

**Mazánek, M., Janík, J.: Antény a šíření elektromagnetických vln, ČVUT**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.**

Ústav elektrotechniky a informatiky

Datum zadání bakalářské práce:

**30. listopadu 2007**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**16. května 2008**

doc. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

vedoucí katedry

dne

## **SOUHRN**

Úkolem této práce bylo vytvoření softwarového empirického modelu šíření signálu v budově s kolmým uspořádáním stěn. Tento model jsem naprogramoval v prostředí Matlab. Jako výsledek zobrazuje šíření signálu od vysílače k přijímači včetně jeho odrazů od stěn a také časový průběh přijímaného signálu a jeho výkon. V teoretické části jsem analyzoval různé modely šíření signálu v budovách (tj. pikobuňkách), mikrobunčkách a makrobunčkách s důrazem na pásmo ISM 2400 MHz a pásma mobilních operátorů 900/1800/1900 MHz.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

šíření signálu, Matlab, empirický model, modely šíření signálu

## **TITLE**

A multipath signal propagation model for inner buildings

## **ABSTRACT**

The task of this work was a creation of software for empirical model of multipath signal propagation in a building with vertical walls arrangement. I programmed this model in Matlab language. As a result, shows the rays from the transmitter to the receiver, included the reflections from the walls, time behaviour of received signal and its power. In the theoretical part, I examine the various models of signal propagation in buildings, with emphasis on the 2400 MHz ISM band.

## **KEYWORDS**

signals propagation, Matlab, empirical propagation model, propagation models

## Obsah

|   |        |
|---|--------|
| 1. Úvod .....   | - 7 -  |
| 2. Šíření vln .....   | - 8 -  |
| 2.1. Vztahy pro šíření vlny ve volném prostoru .....                            | - 9 -  |
| 2.2. Mobilní spoj .....   | - 10 - |
| 2.3. Šíření vln v zástavbě .....  | - 12 - |
| 2.4. Klasifikace modelů pro šíření vln v zástavbě.....                          | - 15 - |
| 2.5. Základní empirický model .....   | - 16 - |
| 3. Modely šíření signálu.....   | - 18 - |
| 3.1. One slope model .....  | - 19 - |
| 3.2. Multi wall model.....  | - 20 - |
| 3.3. Dual slope model.....  | - 22 - |
| 3.4. Model ITU-R pro mikrobuňky.....  | - 23 - |
| 3.5. Bergův rekurzivní model .....  | - 25 - |
| 3.6. Hatův model.....   | - 25 - |
| 3.7. COST231 – Modely penetrace signálu do budov .....                          | - 26 - |
| 3.8. Optické modely .....   | - 27 - |
| 4. Model vícecestného šíření signálu v budovách s kolmým uspořádáním stěn ..... | - 28 - |
| 4.1. Princip modelu šíření signálu .....  | - 29 - |
| 4.2. Matematický model odrazu paprsků od stěn .....                             | - 30 - |
| 4.3. Přidání stěny do modelu .....  | - 31 - |
| 4.4. Výpočet přijímaného signálu.....   | - 33 - |
| 4.5. Fading a únikové prostředí.....  | - 34 - |
| 4.6. Práce s programem, zadávání hodnot a grafické prostředí .....              | - 35 - |
| 4.7. Grafický výstup, Fading.....   | - 37 - |
| 5. Závěr .....  | - 40 - |
| 6. Přehled obrázků a tabulek .....  | - 41 - |
| 7. Literatura a zdroje informací .....  | - 42 - |

## 1. Úvod

Problematikou šíření rádiových vln se již více než jedno století zabývá mnoho vědců, vědeckých institucí a organizací. Již od doby Heinricha Hertze (1857-1894), který ve své laboratoři pomocí obvodu, který obsahoval cívku a jiskřiště, dokázal existenci elektromagnetických vln, se lidstvo snaží využít tyto vlny k novým vědeckým objevům, komunikaci na velké vzdálenosti, lékařským a mnoha jiným účelům. Guglielmo Marconi (1874 - 1937) zdokonalil metodu Heinricha Hertze a jako první roku 1901 poslal radiový signál přes Atlantický oceán. V roce 1909 se stal za své výzkumy spoludržitelem Nobelovy ceny. Druhou část ceny převzal Ferdinand Brown (1850-1918), který dále rozvinul a vylepšil bezdrátové vysílání. Brown zdokonalil Marconioho systém bezdrátové telegrafie, ve kterém byla anténa součástí napájecího obvodu. Vysílání mělo dosah 15 km. Brown vyvinul bezjiskrový anténní obvod, který byl patentován v roce 1899. Vysílací obvod byl s anténním vázán induktivně. Tento vynález výrazně zvětšil dosah vysílání a stal se základem radarové techniky, radia a televize <sup>[11]</sup>.

Obě světové války měly dozajista klíčový podíl na zdokonalení VF systémů a to především směrem na přenos informací a detekci nepřátelské válečné techniky (radiolokace). Již v roce 1931 bylo známo při zkoumání VF přenosu signálu pravidelné interferenční rušení bezdrátového přenosu prolétávajícími letouny, toho bylo využito při tvorbě prvních radiolokátorů.

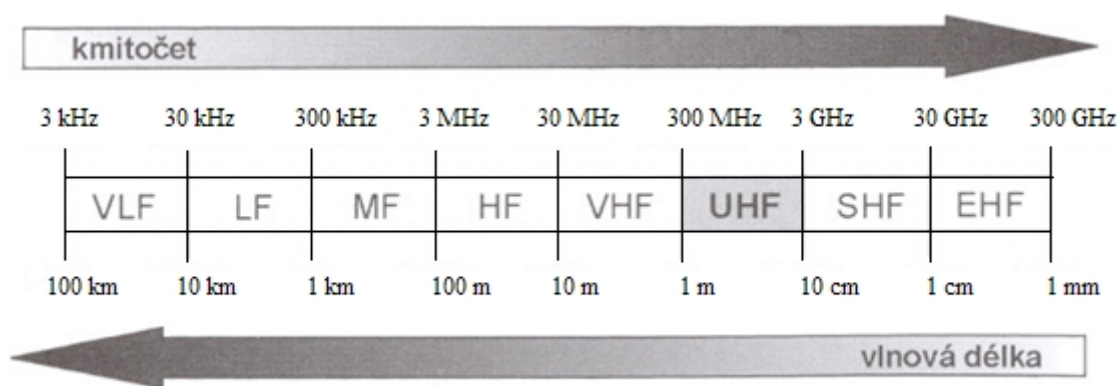
V poválečném období se využívá technologií vyvinutých za války. Začíná se šířit televizní signál, velké množství rádií, vše v analogové podobě na příslušných frekvencích. Tento trend časem vedl k příchodu mobilních komunikačních systémů. To dalo vzniknout novým problémům v oboru šíření elektromagnetických vln: šíření vln v zástavbě, tj. vně i uvnitř budov a městském prostředí, které se od volné krajiny značně liší. S rozvojem bezdrátové komunikace vedle sebe existuje velké množství celoplošných rádiových sítí používající různé technologie (např. systémy GSM, UTMS či starší NMT). Jedná se o licencovaná pásma a úzkou skupinu specializovaných plánovačů jednotlivých operátorů.

Větší problémy nastávají u provozovatelů vysílačů a přijímačů v tzv. bezlicenčních pásmech 2,4 a 5 GHz, jelikož překotná a neplánovaná instalace velkého počtu rádiových sítí ve výše zmíněném pásmu sebou přináší velké problémy z hlediska vzájemných rušení.

Mým úkolem a úkolem této práce bylo vytvoření empirického softwarového modelu pro šíření signálu různých frekvencí uvnitř budov a porovnání jednotlivých existujících modelů, které se využívají k plánování VF spojů. Doufám, že zde najde informace každý, kdo se o danou problematiku zajímá a práce mu pomůže v orientaci v problematice šíření vln.

## 2. Šíření vln

Teorie šíření elektromagnetických vln vychází z vlnové rovnice, která je odvozena z Maxwellových rovnic. Pro potřeby plánování rádiových komunikačních systémů je důležitá teorie šíření vln v zemské atmosféře. Charakter chování elektromagnetické vlny určuje primárně pracovní frekvence, respektive vlnová délka. Délka vlny a rozměry objektů v prostředí, ve kterém se vlna šíří, určují, jak se bude vlna při šíření tlumit, odrážet, ohýbat a rozptylovat <sup>[1]</sup>.



Obr 2.1 Označení frekvenčních pásem pro rádiový přenos dle ČSN IEC 60050-713

Současné mobilní služby pracují převážně v kmitočtovém pásmu decimetrových vln. Důvodem jsou vhodné vlastnosti elektromagnetických vln pro daný typ komunikace na těchto frekvencích, malé ztráty šířením, dobrá schopnost odrážet se, ohýbat se a pronikat překážkami v zástavbě. Jsou koncipovány pro malé typy antén, které mohou být využity v mobilních zařízeních.

Vlna se může šířit buď přímo na přímé optické viditelnosti anebo odrazy, ohyby a rozptyly na překážkách. Tyto vlivy se uplatňují při průchodu různým prostředím (nad volným a členitým terénem a v zástavbě). Díky použití pásma UHF a relativně krátkým spojům (simulujeme vnitřek budov na krátkou vzdálenost) zanedbáme další jevy při šíření vln, jako jsou útlumy hydrometeory, troposférickou refrakci, atmosférickými plyny apod. Pro modelování bezdrátového přenosu můžeme úroveň signálu popsat buď intenzitou elektromagnetického pole v daném místě, nebo jako výkonovou úroveň vyjádřenou v dB.



## 2.1. Vztahy pro šíření vlny ve volném prostoru

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30P_v G_v}}{d} \quad (1)$$

$E_{ef}$       efektivní hodnota intenzity elektrického pole v bodě pozorování

$P_v$       vysílací výkon (W) antény

$G_v$       zisk vysílací antény vyjádřený v (dB)

$d$         vzdálenost antény a bodu příjmu (m)

Je-li v bodě příjmu umístěna přijímací anténa, lze psát ideální přenosovou rovnici ve tvaru

$$P_p = \frac{E_{ef}^2}{120\rho} \frac{G_p \lambda^2}{4\pi} = P_v G_v G_p \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2)$$

$P_p$       přijímací výkon (W) antény

$\lambda$         vlnová délka (m)

$G_p$       zisk přijímací antény vyjádřený v dB

V praxi se využívá vyjádření v decibelech, tj.

$$P_p = P_v + G_v + G_p - FSL(d) - L, \text{ nebo} \quad (3)$$

$$P_p = EIRP + G_p - L$$

$L$         ztráty šířením v daném prostředí – ve volném prostředí jsou nulové

$EIRP$  (*equivalent isotropically radiated power, ekvivalentní izotropně vyzářený výkon*) - je celkový výkon, který by bylo nutné vyzářit izotropní anténou (vyzařuje do všech směrů prostoru stejně), aby bylo v daném směru dosaženo jisté intenzity záření. Používá se k vyjádření intenzity rádiového záření vysílaného směrem, kterým je anténa (typicky směrová) namířena. Udává se ve *wattech* <sup>[12]</sup>.

$$FSL(d) \text{ jsou ztráty volným prostorem (dB), } FSL(d)_{dB} = 10 \log \left[ \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (4)$$

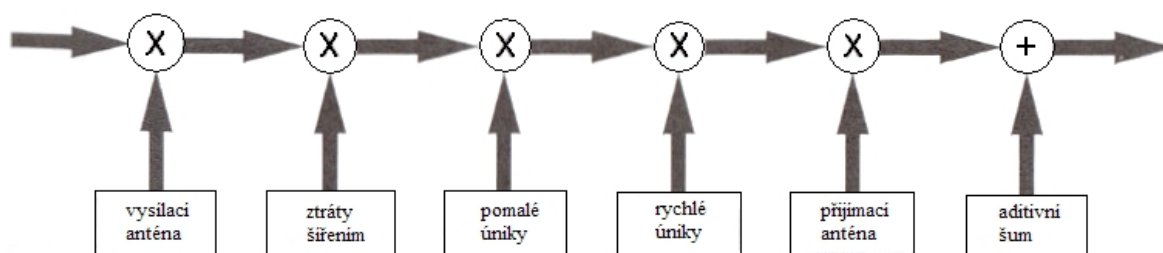
Ztráty volným prostorem (*free space loss*) přímo v dB lze také spočítat podle

$$FSL(d_{km}) = 32,44 + 20 \log(f_{MHz}) + 20 \log(d_{km}) \quad (5)$$

## 2.2. Mobilní spoj

Na rozdíl od pevného spoje, kde jsou obě antény, jak vysílací tak přijímací stále ve stejné pozici a poloze, jsou mobilní spoje v pohybu. Např. mobilní telefony, připojení na internet v notebooku nebo různých PDA zařízeních. Rovněž i v mé práci, kde jsem tvořil softwarový empirický model šíření signálu, je možné nastavit různou polohou přijímače a vysílače.

Signál šířící se mezi pevnou a mobilní anténou v městské zástavbě, či přímo v budově je tlumen a kolísá za působení různých fyzikálních mechanismů.

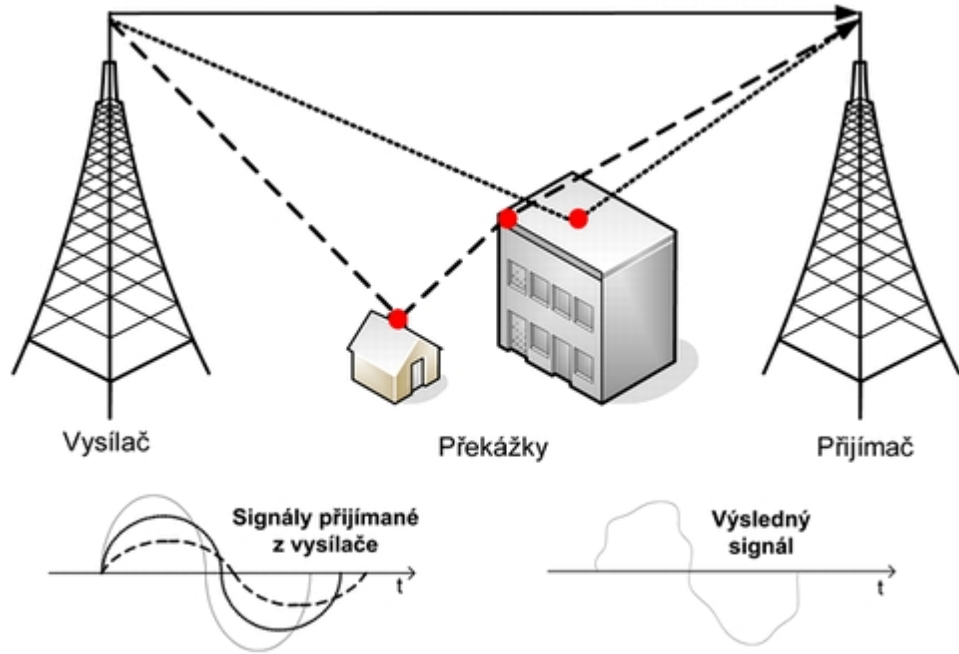


Obr. 2.2 Mechanismus modelování výkonové bilance rádiového přenosu v zástavbě

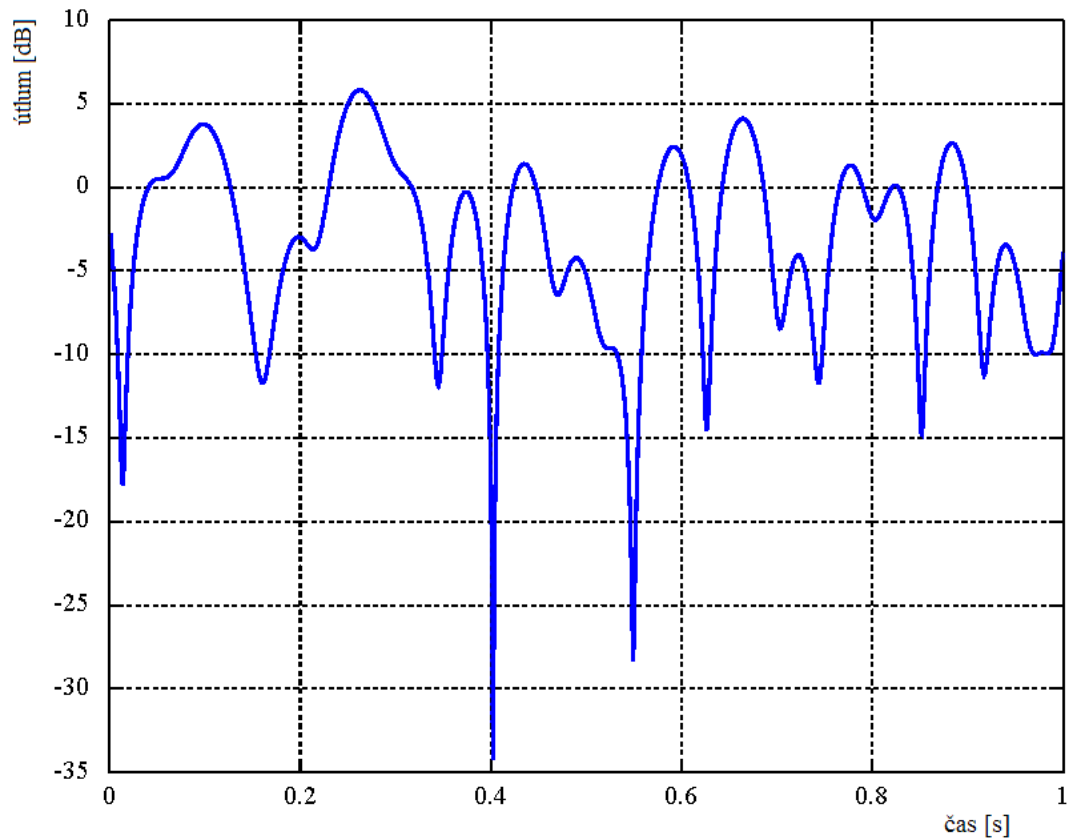
Na obou koncích spoje se uplatňuje zisk antén, kterým je nutné vynásobit výkonovou úroveň přijímaného signálu. Na přijímací straně se přidává aditivní šum způsobený různými nežádoucími vlivy okolí nebo šumem přijímače. Vlastní útlum šířením je složen ze tří složek:

- Ztráty šířením (*path loss*) – útlum závislý na délce spoje a typu prostředí. Je to složka časově neproměnná <sup>[1]</sup>.
- Pomalé úniky (*slow fading*) – útlum způsobený zastíněním spoje (terénem, budovami, vegetace apod.) při pohybu mobilního spoje. Ke kolísání úrovně dochází z hlediska vlnové délky „pomalu“. Hloubka těchto úniků, tj. pokles úrovně signálu, může být velmi velká, např. až desítky dB, dle situace.
- Rychlé úniky (*fast fading*) – způsobují velmi rychlé a hluboké kolísání úrovně signálu. Jsou způsobeny především vícecestným šířením signálu (Obr. 2.3) a Dopplerovým posuvem, který vzniká v důsledku pohybu mobilní antény a okolních objektů. Elektromagnetická energie se mezi pevnou a mobilní anténou šíří též pomocí odrazů po mnoha různých drahách (v mém modelu řeším přímý paprsek, jednonásobný a dvojnásobný odraz – více odrazů by bylo navíc tak utlumeno, že by na výsledek měly jen velmi nepatrný vliv). Díky všesměrové mobilní anténě dochází při vícecestném šíření k fázovému sčítání velkého množství různě odražených paprsků (od různých směrů a objektů). V důsledku tohoto vlivu dochází ke značnému zpoždění odražených paprsků

(v závislosti na vzdálenosti objektů). Důležitou vlastností rychlých úniků je to, že jsou proměnné v čase. To je způsobeno výše popsány jevy (pohybem uživatele, proměnným prostředím). Tyto úniky jsou kmitočtově selektivní, vykazují Rayleighovo rozložení v čase (Obr. 2.4)



Obr. 2.3 Vícecestné šíření signálu <sup>[6]</sup>



Obr. 2.4 Rayleighovo rozložení rychlého úniku signálu,  $f=10\text{Hz}$  <sup>[7]</sup>

Na základě výše popsaných fyzikálních principů můžeme celkový útlum (ztráty) šířením uvažovat jako součet dvou složek:

$$L_c(p,t) = L(p) + X(t), \text{ kde}$$

$L_c(p,t)$  celkové ztráty šířením (dB) pro mobilní anténu v místě  $p$  a čase  $t$

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

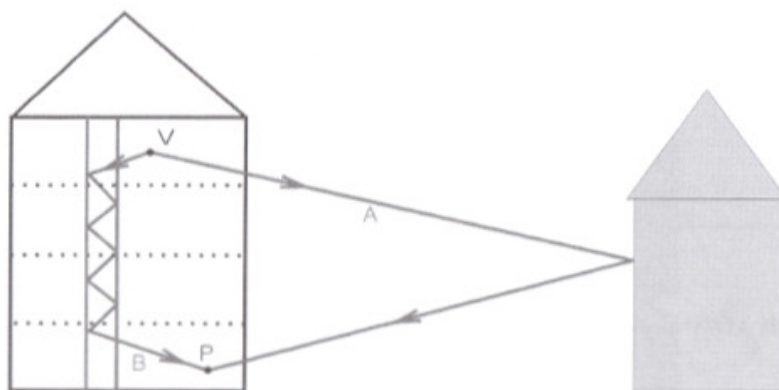
$L(p)$  střední hodnota ztrát (dB) daná pozicí mobilní antény  $p$

$X(t)$  náhodná časově proměnlivá složka ztrát s nulovou střední hodnotou daná stochastickým rozložením pomalých a rychlých úniků v čase.

V našem dalším pokračování hraje důležitou roli složka  $L(p)$ , která je určena vzájemným umístěním pevné i mobilní antény. Jde o ztráty šířením, pomalé úniky, které jsou způsobeny zastíněním a nepohyblivými se předměty. Modelováním této složky se v této práci ještě budu nadále zabývat, protože slovem predikce je v našem případě myšleno fyzikální modelování (šíření vlny – signálu) v prostoru daného přenosového prostředí.

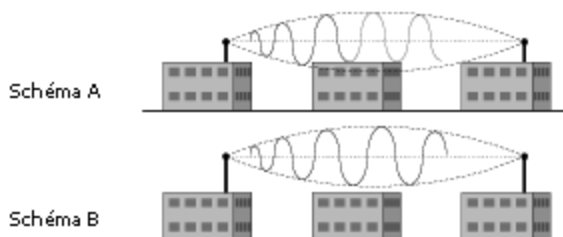
### 2.3. Šíření vln v zástavbě

Vlivem velké členitosti interiérů představuje šíření vlny mezi vysílací a přijímací anténou uvnitř budovy nejkomplicovanější případ a nejkomplicovanější model šíření signálu. Jde o tzv. pikobuňku. Energie se mezi vysílací a přijímací anténou šíří přímo, průchodem přes stěny, odrazy, ohyby atd. Signál se může šířit i odrazy od protějších budov, výtahovou šachtou jako ve vlnovodu (Obr. 2.5). Šíření vln rovněž závisí na okolnostech, jakými jsou např. otevřené dveře či otevřená okna, kovové žaluzie, a proto je velmi obtížné je popisovat. Vždy záleží na konkrétním rozložení překážek.

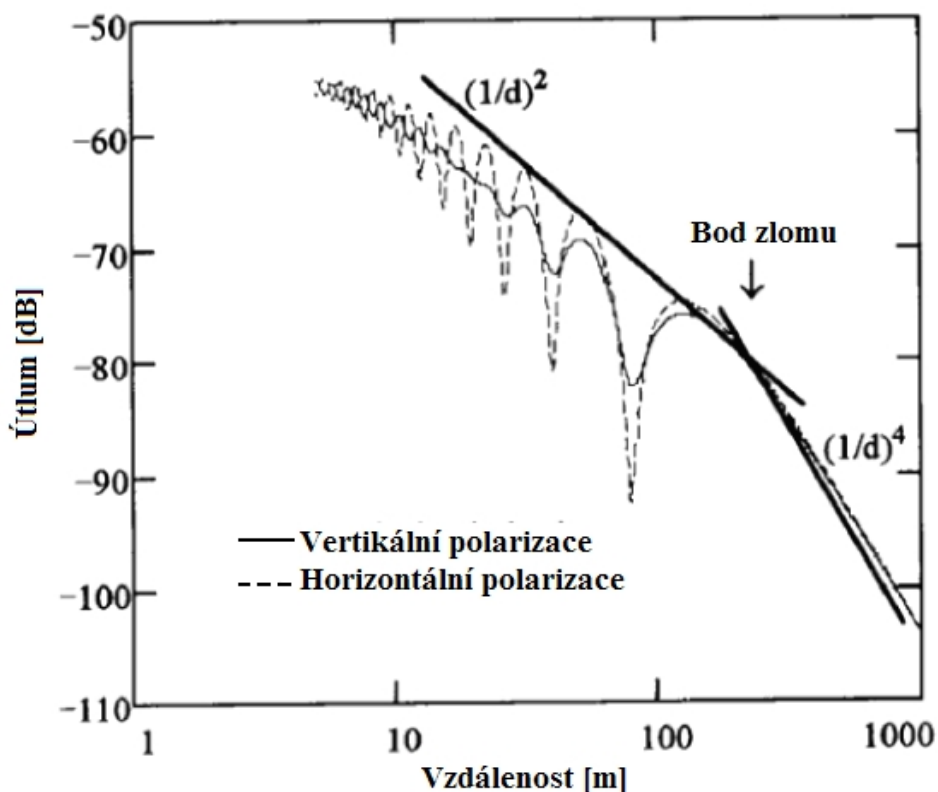


Obr. 2.5 Alternativní cesty šíření signálu v pikobuňce; A – průchod oknem a odraz od sousední budovy; B – průchod napříč podlažím výtahovou šachtou (vlnovodem)

Elektromagnetická vlna nicméně dobře prochází běžnými přepážkami a příčkami v interiéru budov. Oproti mikrobuňce má pikobuňka pravidelnější tvar a můžeme nad ní prezentovat i celkem jednoduché empirické modely (např. ten, který jsem v Matlabu simuloval). Zásadním rozdílem je to, že v pikobuňce se pohybujeme ještě před Fresnelovým zlomem, zatímco v makrobuňkách uvažujeme vzdálenosti za zlomem. (Obr. 2.7)



Obr. 2.6 Prostorové znázornění Fresnelovy zóny: A - první zóna zastíněna prostřední budovou; B - Fresnelova zóna bez zastínění. [8]

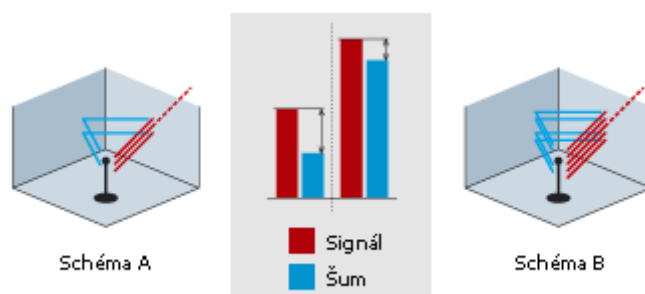


Obr. 2.7 Fresnelův zlom [4]

Z hlediska klasické teorie elektromagnetického pole je analytický popis šíření vlny pro mobilní spoj umístěný v geometricky velmi složitém a neustále se měnícím prostředí téměř nemožný. V praxi se tedy spoléháme na modely, o kterých můžeme s danou přesností potvrzenou měřeními tvrdit, že nám poskytnou základní informace o tom, jaká výkonová úroveň signálu bude

v určitém místě, a zda-li je možné, v dané lokalitě provozovat soustavu VF zařízení. Cílem modelu tedy většinou není předpověď přesné hodnoty signálu, či ztrát šířením, ale střední hodnota signálu, která se poté porovnává se skutečnou hodnotou při provádění testovacích měření.

Signál v 2,4 GHz nebo v 5 GHz pásmu má spíš schopnost odrazet se, než procházet přes překážky. Také je známo, že pro správnou funkčnost bezdrátového spoje je nejdůležitějším ukazovatelem odstup „signál/šum“. Je to rozdíl mezi úrovní signálu na dané frekvenci a šumem. Složka „ŠUM“ obsahuje jednak tzv. „rušení“, které způsobují jiné zařízení vysílající na stejné frekvenci, ale i signál, který vyslalo to samé zařízení, akorát že z důvodu odrazů od okolního prostředí (zdi, podlahy, stropu, nábytku, oken) ho zařízení opět zachytilo nazpátek na přijímací část zařízení. Nakolik zařízení očekává odpověď na svůj signál a ne svůj vlastní odraz, vyhodnotí WLAN zařízení tento signál jako „ŠUM“. Když použijeme v interiéru nepřiměřeně „ziskovou“ anténu, paradoxně se nám zhorší kvalita bezdrátového spojení. Je to způsobené tím, že silnější (ziskovější) anténou se nám zvýšila síla vyzářeného signálu, ale zároveň stejným ziskem se nám ještě jednou zvýšil odražený signál, který se vyhodnocuje jako „ŠUM“. V konečném důsledku je ale poměr signál šum menší (B). (Obr. 2.8) Způsob, jak dosáhnout zvýšení dosahu WLAN zařízení uvnitř budov, je ve vhodném umístění WLAN zařízení <sup>[8]</sup>.



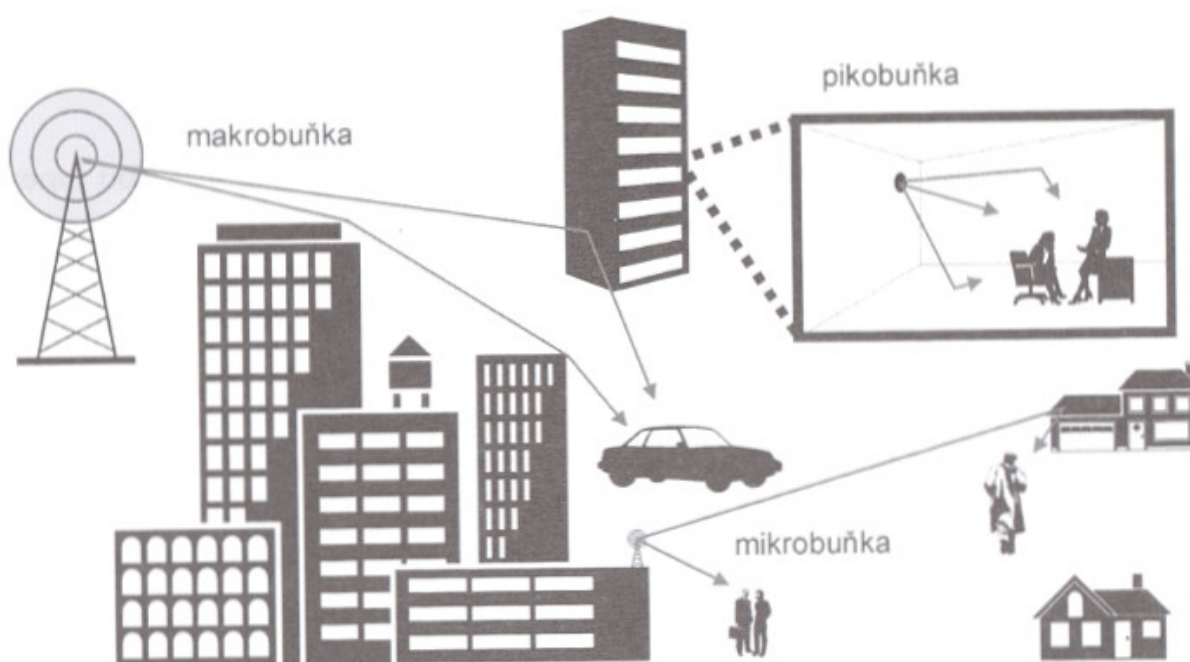
Obr. 2.8 Šíření signálu v uzavřeném prostoru z hlediska odstupu S/N

V následujících částech své práce, se budu především zabývat modely, které se omezují na predikci prostorového rozložení úrovně signálu pro systémy WLAN z hlediska pokrytí signálu v zástavbě a uvnitř budov.

## 2.4. Klasifikace modelů pro šíření vln v zástavbě

Charakter šíření signálu mobilního spoje je určován především okolním prostředím a umístěním antény (Obr. 2.9). Tyto parametry jsou určeny typem buňky:

- Makrobuňka (*macrocell*) – pevná anténa je umístěna ve výšce nad úrovní zástavby. Poloměr buňky je 1-20 km.
- Mikrobuňka (*microcell*) – pevná anténa je pod úrovní okolních střech a zástavby. Poloměr mikrobuňky se pohybuje od 100m – 1 km.
- Pikobuňka (*picocell*) – anténa je umístěna buď přímo uvnitř budov, hal, nákupních středisek, ale i v otevřeném prostoru nástupišť a nádraží. Rozměry pikobuňky jsou řádově desítky metrů.



Obr. 2.9 Rozdělení celulárních systémů a šíření elektromagnetické vlny v zástavbě<sup>[1]</sup>

Charakter výpočtů:

- Empirické – jsou přímé, dané pro konkrétní typ prostředí. Parametry jsou založeny na statistické analýze dle objemu naměřených dat
- Deterministické – teoretické modelování na fyzikálním základě šíření vlny pro idealizovaný nebo zjednodušený popis daného prostředí.
- Semi-deterministické, nebo semi-empirické a kombinace obou přístupů.

- Stochastické – na základě vstupních parametrů je náhodně generován průběh signálu pro simulaci přenosového kanálu, kde obvykle není přímá vazba na geometrii přenosového prostředí.

## 2.5. Základní empirický model

Základní empirický model „1/d“ můžeme použít především v otevřené krajině bez viditelných překážek, kde předpokládáme hladkou spádovou křivku úměrnou n-té mocnině vzdálenosti. Tento model je základem většiny empirických modelů.

### Výpočet:

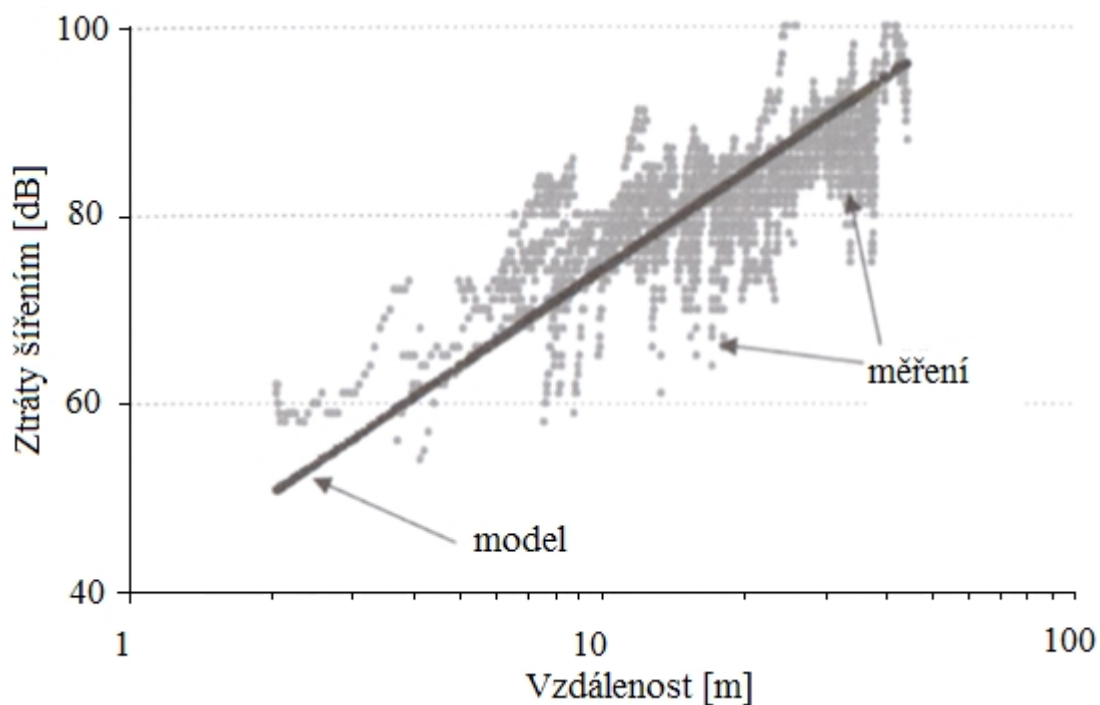
Tento model počítá s hladkým nárůstem ztrát s mocninou vzdálenosti:

$$L(d) = L_1(d_1) + 10n \cdot \log\left(\frac{d}{d_1}\right) \quad (6)$$

|       |   |
|-------|---|
| $L$   | ztráty šířením (dB)                                   |
| $d$   | vzdálenost od vysílací antény (m)                     |
| $d_1$ | referenční vzdálenost (m)                             |
| $L_1$ | referenční útlum (dB) pro referenční vzdálenost $d_1$ |
| $n$   | spádový koeficient (exponent, koeficient útlumu)      |

Základní empirický model je tedy určen parametry  $L_1$  a  $n$ , které jsou zpravidla získány z velkého počtu měření v daném typu prostředí. Zásadní je především exponent  $n$ , který udává rychlost nárůstu ztrát se vzdáleností. Na základě velkého množství měření je model aproximován z konkrétních naměřených hodnot (Obr. 2.10).





Obr. 2. 10 Aproximace z jednotlivých měření do empirického modelu – Logaritmické souřadnice

Pro hodnoty  $L_1$  lze použít ztráty volným prostorem pro referenční vzdálenost  $d_1$ , tj.  $FSL(d_1)$  dle vzorce (4).

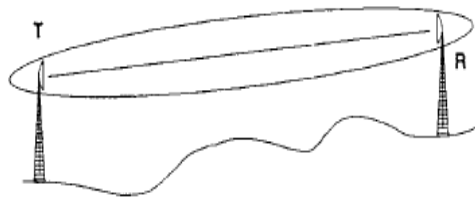
| Prostředí                               | n (-)   |
|---|---------|
| volný prostor                           | 2,0     |
| městská zástavba                        | 2,5-4,0 |
| hustá městská zástavba                  | 3,0-5,0 |
| uvnitř budov – přímá optická vzdálenost | 1,6-1,8 |
| uvnitř budov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

Tab. 1.0 Typické hodnoty spádového koeficientu  $n$  pro empirický model šíření

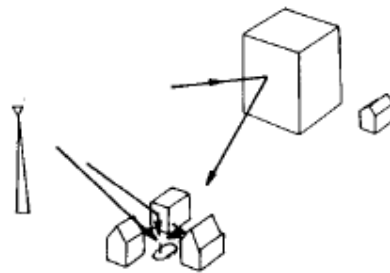
Je třeba si uvědomit, že soubor naměřených dat, na kterých je empirický model založen, je získán za jistých podmínek (prostředí, výšky antén, frekvenčního pásma aj.). Platnost modelu je limitována těmito podmínkami.

### 3. Modely šíření signálu

Mobilní telekomunikační systémy v sobě obsahují jak pevné, tak i proměnlivé přenosové trasy. Jednotlivé modely, které budou diskutovány, souvisí s velikostí popisovaných oblastí a vnitřní geometrií. Pevné i mobilní trasy mají své základní vlastnosti. Klasickou odlišností je, že pro pevné spoje se jedná o šíření nezastíněné 1. Fresnelovy zóny, kdežto pro mobilní trasy je přímá viditelnost spoje poměrně velice řídká. Společnou vlastností je mnohacestné šíření, které je u pevných služeb omezeno na dvojpaprskový model, zvláště pro mobilního uživatele je mnohacestné šíření základním charakterem příjmu. Pro pevné trasy je fázová diference mezi přímým a odraženým paprskem poměrně malá, pro mobilní trasy je tato diference již značně velká, daná součtem jednotlivých zpožděných paprsků. Problematiku fázového zpoždění poté v systému řeší vhodné kódování a modulace. Mnohacestné šíření způsobuje kolísání úrovně přijímaného signálu. Co se týká interferencí, je možné se jim v pevných spojích vyhnout dostatečně dobrou koordinací služeb, ale v mobilních spojích jsou interference základním problémem návrhu <sup>[4]</sup>.



Obr. 3.1 Znázornění pevné přenosové trasy s nezastíněnou 1. Fresnelovou zónou

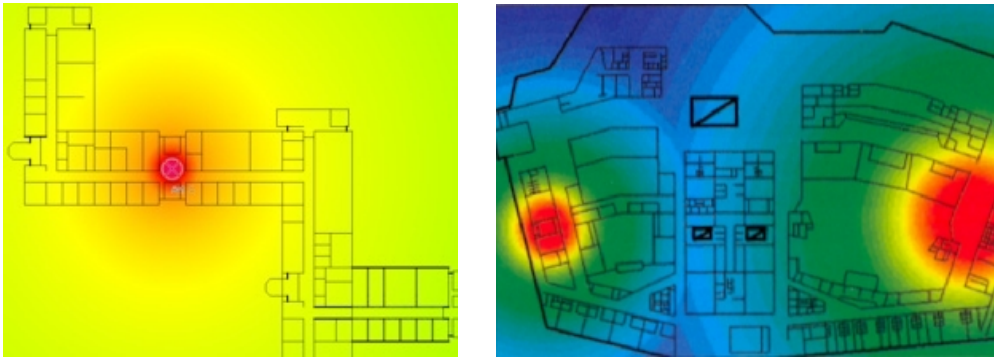


Obr. 3.2 Znázornění mobilního přenosového kanálu s vícecestnými úniky signálu

Z obr. 3.1 a 3.2 je vidět zřejmý rozdíl v rozmístění antén, jejich směrovosti a viditelnosti vysílače a přijímače. U pevné přenosové trasy budeme očekávat stabilní útlum a vícecestné šíření v malém procentu času, zatímco u mobilních systémů útlum kolísající o desítky dB, stále vícecestné šíření a také problém s interferencemi a častým opakováním kmitočtů.

### 3.1. One slope model

Je ideální pro rychlé predikce v interiéru. Jeho výsledky je ale nutné brát jen orientačně. Při použití vhodných parametrů se odchylka reálných změřených hodnot blíží 10 dB. Výpočet ztrát šířením je pouze funkce vzdálenosti, a tudíž nehledě na členění interiéru jsou zóny označeny typicky kruhovým tvarem. (Obr. 3.3)



Obr. 3.3 Šíření signálu prostorem „one slope modelu“<sup>[1]</sup>

Výpočet má shodný tvar jako vzorec (1.6) s tím, že vzdálenost  $d$  musí být menší než vzdálenost Fresnelova zlomu. Tato podmínka je prakticky splněna u většiny interiérů

$$L(d) = L_1 + 10n \cdot \log(d) \quad (7)$$

$L(d)$  predikovaná hodnota ztrát šířením (dB)

$d$  vzdálenost (m) mezi základnovou stanicí a bodem pozorování

$L_1$  referenční útlum (dB) pro referenční vzdálenost 1m

$n$  spádový koeficient (exponent, koeficient útlumu)

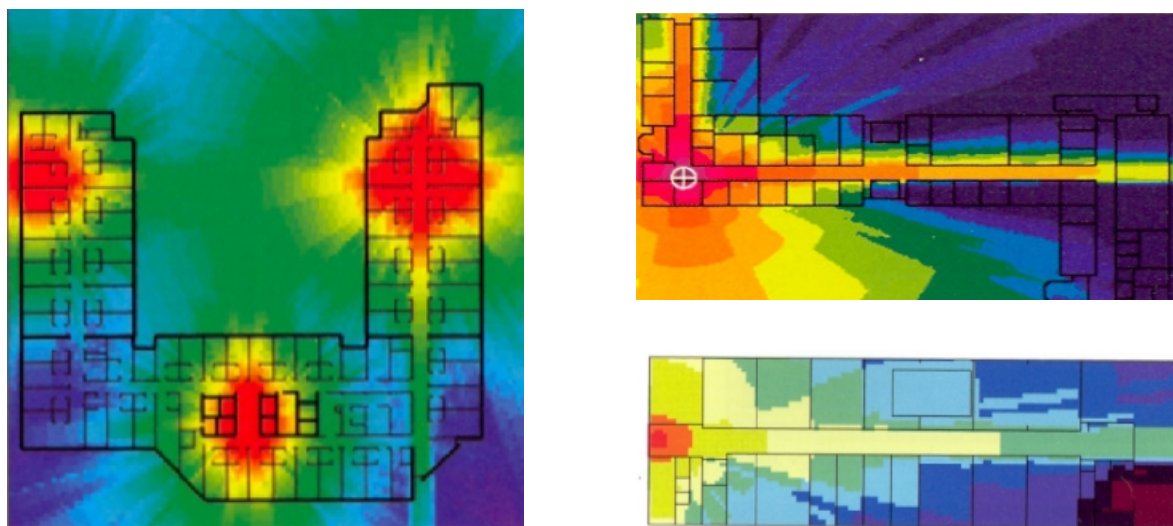
Při šíření mezi podlažími lze přičíst další aditivní ztráty za každé podlaží, resp. stropů. Pro frekvence v pásmu UHF se ztráty typicky pohybují v intervalu 6-25 dB. Jak bylo již zmíněno, při průchodu více podlažími se často uplatňuje vlnovodný princip přenosu např. výtahovými šachtami, odrazem od okolních budov, difrakcí na vnějším plášti budovy apod. Celkové ztráty tak mohou být nižší.

Záleží tedy na parametrech:

- Při přímé viditelnosti ve velkých prostorách se útlum šíření blíží ztrátám volným prostorem tj.  $n=2$
- Při zastínění spoje se může hodnota  $n$  pohybovat kolem  $n=4$
- Při šíření na velkou viditelnost se může projevit efekt Fresnelova zlomu (2.7) a za tímto zlomem se spádový koeficient  $n$  zvýší z hodnoty 2 na 4.

### 3.2. Multi wall model

Jako příklad semi-empirického modelu, jenž bere v úvahu konkrétní členění interiéru přináší tento model výrazné zpřesnění výsledků a poskytuje přijatelné výsledky. Model vyžaduje informace o rozmístění a typu stěn, příček na jednotlivých patrech a jeho výpočet je daleko složitější. Umožňuje však lépe vystihnout specifika konkrétních interiérů. Tento model je bohužel neúčinný při simulaci dlouhých zakroucených chodeb, kde špatně simuluje vlnovodný efekt <sup>[1]</sup>.



Obr. 3.4 Šíření signálu za pomoci Multi wall modelu

Celkové ztráty šíření jsou dány vztahem:

$$L(d) = 20 \log \left( \frac{4pd}{I} \right) + \sum_i k_{wi} L_{wi} + k_f \left( \frac{k_f + 2}{k_f + 1} - b \right) L_f \quad (8)$$

$L(d)$  celkový útlum

$d$  vzdálenost (m)

$\lambda$  vlnová délka (m)

$k_{wi}$  počet příček typu  $i$ , které protíná spojnice vysílač-přijímač

$L_{wi}$  činitel útlumu (dB) pro příčku typu  $i$

$k_f$  počet podlaží, která protíná spojnice vysílač-přijímač

$L_f$  činitel útlumu (dB) pro průchod podlažím

$b$  konstanta nelinearity útlumu průchodem skrz více podlaží

Ze vzorce je tedy vidět, že první člen vyjadřuje ztráty pro volné prostředí určité vzdálenosti  $d$ . Bez příček se tedy vlastně jedná o „One slope model“, s koeficientem  $n=2$ .

Pomocí koeficientu  $b$  „multi wall model“ počítá s nelineárním nárůstem ztrát šířením s počtem prošlých podlaží. Viz (obr. 2.5), kdy se signál dostává do vyšších pater pomocí vlnovodných cest různých šachet, či odrazů od ostatních budov a jeho úroveň je tedy vyšší, než kdyby prošel více podlažími.

Vstupní data - rozložení příček můžeme do modelu dobře zapracovat. Vybavení kanceláří a interiérů, otevřené a zavřené dveře a okna, či další objekty nám výrazně ovlivňují šíření signálu, proto jednotlivé typy příček dělíme pouze na slabé a silné. Jiné členění nemá význam, protože skutečnost může být velmi odlišná. Hodnoty parametrů pro konkrétní frekvence a prostory jsou vyjádřeny tabulkově z mnoha měření. Při volbě konstant se většinou odchylka měření pohybuje kolem 5 dB. Pro pokrytí predikované „multi wall modelem“ je typický hladký průběh (jako při „One slope modelu“), ale se skokovou změnou úrovně signálu v místě příček. (Obr. 3.4.)

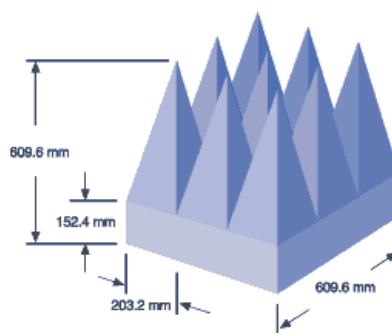
Jak již bylo zmíněno, každý empirický model značně zjednodušuje fyzikální mechanismus šíření elektromagnetických vln. Signál se šíří po vícenásobných cestách pomocí odrazů, difrakcí atd. Z toho plyne několik skutečností:

- Činitel útlumu  $L_{wi}$  není pouze koeficient materiálu příčky, ale obsahuje v sobě i statistické a mechanické šíření vlny.
- Např. od kovové stěny by se signál měl úplně odrazit, nicméně většinou pronikne i za ni. Ve skutečnosti se tam dostane pomocí odrazů a difrakcí.
- Zde je tedy vidět, kdy tento model selhává. Realita je závislá na konkrétních rozměrech a geometrii. Tento jednoduchý princip modelu ji není schopen vystihnout.

Na tomto místě je vhodné uvést příklad z bezodrazové komory v Praze, kterou jsem navštívil (Obr. 3.5). Při kompletně uzavřené komoře do ní neproniknou žádné nežádoucí okolní signály ani rušení. Jelikož ale v jednu chvíli nebylo zakryto elektrorozvodné vedení, které vyústilo do komory, pronikl do ní po tomto vedení signál telefonního operátora a bylo možné telefonovat!!!



Obr. 3.5 Bezodrazová komora



Obr 3.6 Pyramidální absorbér 80MHz-40GHz

### 3.3. Dual slope model

Je určený pro mikrobuňky či větší pikobuňky na přímé optické viditelnosti mezi oběma konci spoje. Vychází se základního empirického modelu, ale se zahrnutím Fresnelova zlomu, tj. spádový koeficient  $n$  se liší podle toho, jde-li o úsek před či za zlomem (Obr. 2.7). Jedná se o základní empirický model (vzorec 1.6) s dvěma spádovými koeficienty:

$$\begin{aligned} L(d) &= L_1 + 10n_1 \log d & d \leq d_0 \\ L(d) &= L_1 + 10n_1 \log d_0 + 10n_2 \log \frac{d}{d_0} & d > d_0 \end{aligned} \quad (9)$$

$L(d)$  je střední hodnota ztrát šířením (dB)

$L_1$  referenční hodnota ztrát (dB) pro vzdálenost 1 m

$d$  vzdálenost (m)

$n_1$  spádový koeficient pro  $d < d_0$

$n_2$  spádový koeficient pro  $d > d_0$

$d_0$  bod zlomu (m), typicky Fresnelův zlom, (Obr. 3.7) tj.  $d_0 = \frac{h_1 h_2}{\lambda}$  (10)

kde  $h$  výšky antén spoje (m)

$\lambda$  vlnová délka (m)

Rovnici (1.9) lze vyjádřit i jedním vztahem s hladkým průběhem kolem bodu zlomu:

$$L(d) = L_1 + 10n_1 \log d + 10(n_2 - n_1) \log \left( 1 + \frac{d}{d_0} \right) \quad (11)$$

Průběh signálu lze dobře vyčíst opět z (Obr. 2.7)

### 3.4. Model ITU-R pro mikrobuňky

Přináší hlavně jednoduchý výpočet pro malé městské mikrobuňky v UHF pásmu. Výpočet je rozdělen na dva základní případy: Na spoj zastíněný a s přímou viditelností. Jedná se o empirický model <sup>[1]</sup>.

Výpočet pro **přímou viditelnost** principiálně vychází z „Dual-Slope modelu“. Výsledek v sobě zahrnuje i empirické parametry pro UHF pásmo a typickou geometrii městské mikrobuňky. Získáme tak interval, v němž se pohybuje modelovaná hodnota ztrát šířením.

$$L_{\min}(d) = L_{BP} + 20 \log \frac{d}{d_0} \quad d \leq d_0 \quad (12)$$

$$L_{\min}(d) = L_{BP} + 40 \log \frac{d}{d_0} \quad d > d_0 \quad (13)$$

$$L_{\max}(d) = L_{BP} + 20 + 25 \log \frac{d}{d_0} \quad d \leq d_0 \quad (14)$$

$$L_{\max}(d) = L_{BP} + 20 + 40 \log \frac{d}{d_0} \quad d > d_0 \quad (15)$$

$$d_0 = \frac{4h_1h_2}{l} \quad (16)$$

$$L_{BP} = 20 \log \frac{4pd_0}{l} = 20 \log \frac{8ph_1h_2}{l^2} \quad (17)$$

$L_{\min}(d)$  dolní mez střední hodnoty ztrát šířením (dB)

$L_{\max}(d)$  horní mez střední hodnoty ztrát šířením (dB)

$d$  vzdálenost (m)

$d_0$  referenční vzdálenost bodu zlomu (m)

$L_{BP}$  referenční hodnota ztrát (dB) v bodě zlomu

$h_1, h_2$  výšky antén spoje (m)

$\lambda$  vlnová délka (m)

#### **Výpočet při zastínění:**

Záleží čistě na geometrickém rozložení budov, základnových stanic a tím, kde se právě nachází mobilní uživatel. Jeho platnost je omezena na pásmo 800-2000 MHz a pro obě antény ve výškách hluboko pod úroveň střech městské zástavby.

Střední hodnota ztrát šířením  $L$  (dB) je dána jako:

$$L = 10 \log(10^{0,1L_r} + 10^{0,1L_d}) \quad (18)$$

$$L_r = 20 \log(x_1 + x_2) + \frac{x_1 x_2}{w_1 w_2} \frac{3,86}{a^{3,5}} + 20 \log \frac{4p}{I} \quad (19)$$

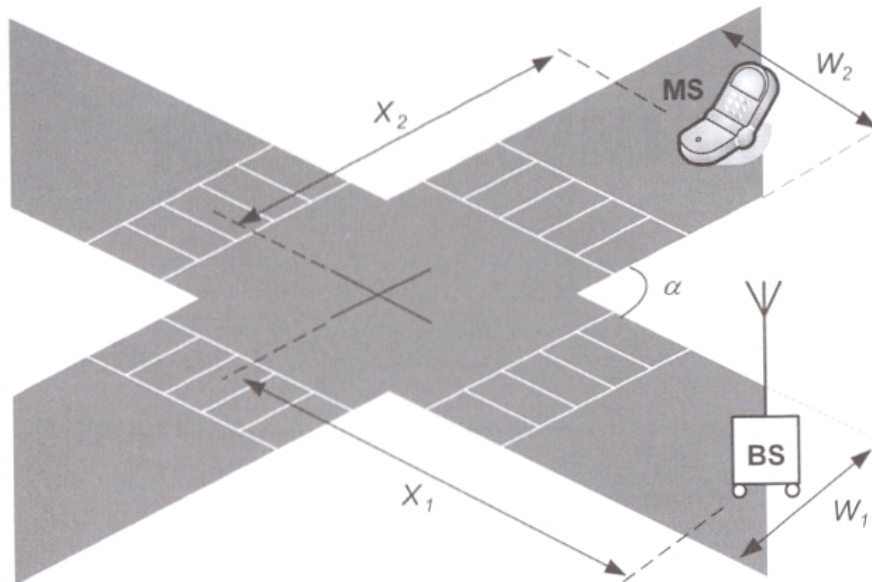
$$L_d = 10 \log[x_1 x_2 (x_1 + x_2)] + \frac{40}{p} \left( \arctan \frac{x_2}{w_2} + \arctan \frac{x_1}{w_1} - \frac{p}{2} \right) - 0,1 \left( 90 - \frac{180}{p} a \right) + 20 \log \frac{4p}{I} \quad (20)$$

$L_r$  a  $L_d$  činitelé útlumu (dB) vyjadřující ztráty odrazy, resp. difrakci

$x_1, x_2$  vzdálenosti (m) od středu křižovatky ke koncovým bodům spoje podle (Obr. 3.7)

$w_1, w_2$  šířky ulic (m) podle (Obr. 3.7)

$\alpha$  úhel (rad), které svírají ulice podle (Obr. 3.7)



Obr.3.7 Příklad zobrazení pro výpočet modelu ITU-R



### 3.5. Bergův rekurzivní model

Tento model je určen pro predikci střední hodnoty ztrát šířením v městské mikrobuňce při neexistenci přímé viditelnosti mezi oběma konci spoje tam, kde není možné použít jednoduchý empirický model. Obě antény jsou umístěny hluboko pod úrovní střech a model vyžaduje plán zástavby. Výpočet tak respektuje konkrétní členění zástavby v mikrobuňce. Výpočet se dá rozdělit na 3 fáze:

1. V rámci plánu zástavby najít nejkratší spojnicí mezi oběma konci spoje. Spojnice je tvořena uzly, které mohou být umístěny na hranách budov, do středů křižovatek nebo podél ulic.
2. Spočítá se tzv. fiktivní délka spojnice obou antén. Tato délka je vždy delší než součet reálných délek všech segmentů a to o to více, čím častěji lomená spojnice mění v zlech svůj směr. Toto prodloužení způsobí větší hodnotu predikovaného útlumu, čímž jednoduše modeluje reálné navýšení ztrát při šíření „za roh“.
3. Výsledné ztráty šíření jsou dané klasickým „Dual slope modelem“ (kap. 3.3)

### 3.6. Hatův model

Jeden z nejstarších a nejpoužívanějších modelů šíření vln v zástavbě je založen na základním empirickém modelu a je určený pro městské makrobuňky. Byl odvozen z mnoha měření ve velkých městech. Základní variantu modelu upravujeme dle vztahu pro střední hodnotu ztrát šířením (dB).

Limity určené pro tento model:

$$L(d) = L_1 + 10n \log d \quad (21)$$

$$L_1 = C_1 + C_2 \log f - 13,82 \log 4_b - a(h_m) + C_0 \quad (22)$$

$$n = \frac{4,49 - 6,55 \log h_b}{10} \quad (23)$$

$$150\text{MHz} < f < 2000\text{MHz}$$

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

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

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

$L$  střední hodnota ztrát šířením (dB)

$d$  vzdálenost (km)

$f$  kmitočet (MHz)

$h_b$  výška pevné antény

$h_m$  výška mobilní antény

$C_0$  koeficient pro různou hustotu městských zástaveb

$C_1, C_2, ah_m$  koeficient pro různé frekvenční rozsahy

Výška pevné antény musí být vyšší než okolní zástavba.

### 3.7. COST231 – Modely penetrace signálu do budov

Do jisté míry uvažuje konkrétní geometrickou situaci a je opět rozdělen do případů, kdy je mezi vysílačem a uvažovanou stěnou přímá viditelnost (COST231 LOS Model). Při zastínění přímé viditelnosti okolní zástavbou (COST231 NLOS Model). Modelovaná výkonová úroveň signálu uvnitř budovy je pak dána součtem příspěvků s uvažovanou penetrací od každé stěny.

Výpočet pro přímou viditelnost:

Střední hodnota ztrát šířením je dána vztahem:

$$L = 32,4 + 20 \log f + 20 \log(S + d) + W_e + WG_e + \left(1 - \frac{D}{S}\right)^2 + \max(\Gamma_1, \Gamma_2) \quad (24)$$

$$\Gamma_1 = W_i P \quad (25)$$

$$\Gamma_2 = \alpha (d - 2) \left(1 - \frac{D}{S}\right)^2 \quad (26)$$

$D, d$  jsou vzdálenosti obou antén k obvodové stěně budovy, dle (Obr. 3.8)

$S$  je skutečná vzdálenost (m) od vnější antény ke stěně budovy v patře stejné úrovně

$f$  frekvence (GHz)

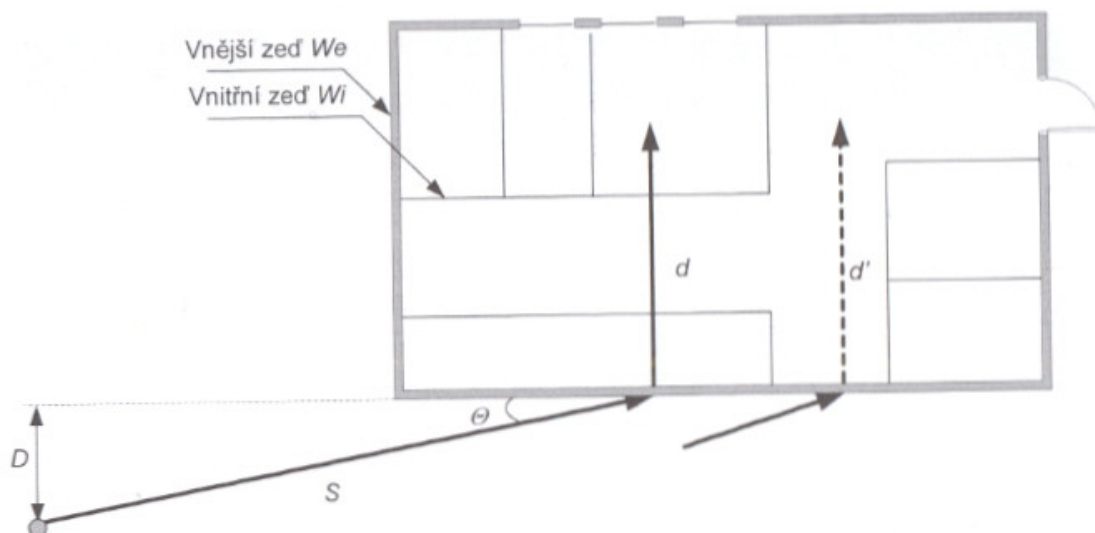
$W_e$  činitel útlumu (dB) obvodové stěny pro  $\theta = 90^\circ$  (kolmý dopad)

$WG_e$  činitel útlumu (dB) obvodové stěny pro  $\theta = 0^\circ$

$W_i$  činitel útlumu (dB) vnitřní příčky

$P$  počet příček mezi obvodovou stěnou a mobilní anténou

$\alpha$  specifický útlum (dB/m) při šíření nezastíněném příčkou uvnitř budovy podél  $d$



Obr. 3.8 COST231 LOS Model – půdorys zkoumané budovy

### Výpočet při zastínění

Výpočet vychází z referenční hodnoty ztrát šířením vedle dané obvodové stěny budovy. Celkové ztráty pak jsou dány vztahem:

$$L = L_{OUT} + W_e + W_{GE} + \max(\Gamma_1, \Gamma_2) - G_{FH} \quad (27)$$

$$\Gamma_3 = ad$$

$$G_{FH} = nG_n = hG_h$$

$L_{OUT}$  ztráty (dB) vypočtené některým z modelů pro šíření vně budovy

$W_{ge}$  korekce (dB) pro činitele útlumu obvodové stěny

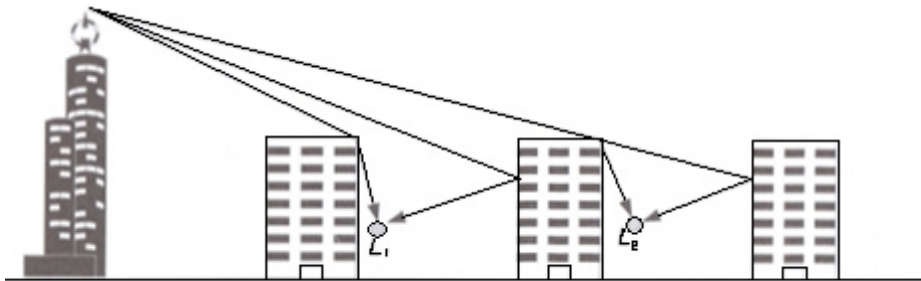
$G_{FH}$  výškový zisk (dB) s dvěma alternativami výpočtu podle vstupních dat

$n$  číslo patra, polohy mobilní antény

$G_n$  výškový zisk (dB/patro)

$h$  výška mobilní antény nad zemí

$G_h$  výškový zisk (dB/m) na jednotku výšky



Obr. 3.9 COST231 NLOS Model – základní geometrie budov

### **3.8. Optické modely**

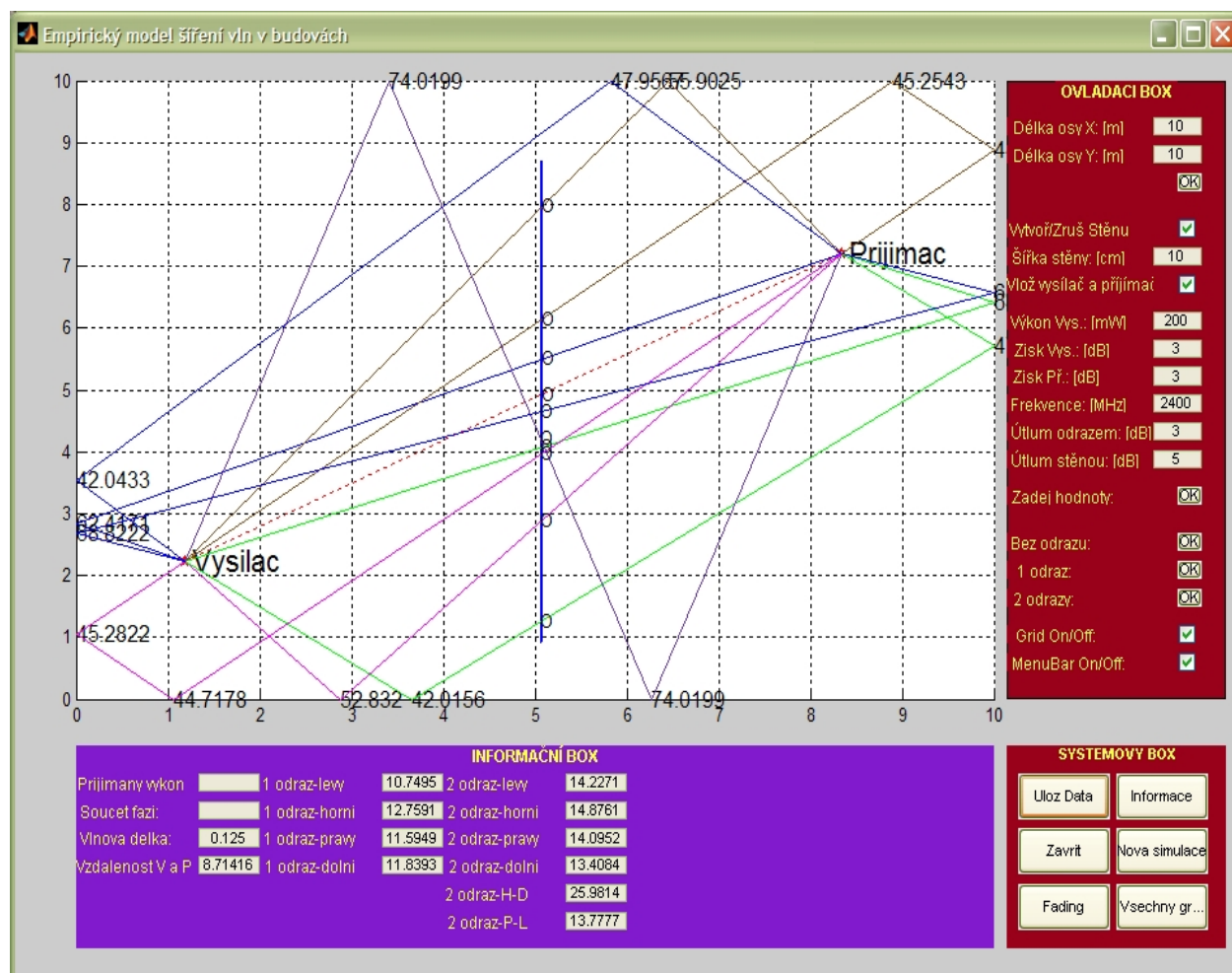
Zastupují deterministický přístup a snaží se vycházet přímo z teorie šíření rádiových vln. Jsou označovány jako modely fyzikální. Při dostatku vstupních informací jsou schopné dostatečně přesně predikovat ztráty šířením. Uplatní se tam, kde jednodušší empirické modely selhávají. Jsou náročné na výpočet a bývají mnohdy implementovány do plánovacích softwarů.

Model je založen na paprskovém principu, kdy je šíření vlny aproximováno jednotlivými paprsky. Tohoto principu využívám i ve své práci a popíši jej konkrétně v praktickém příkladu při tvorbě mého modelu.

#### 4. Model vícecestného šíření signálu v budovách s kolmým uspořádáním stěn

##### Popis hlavního okna obrazovky

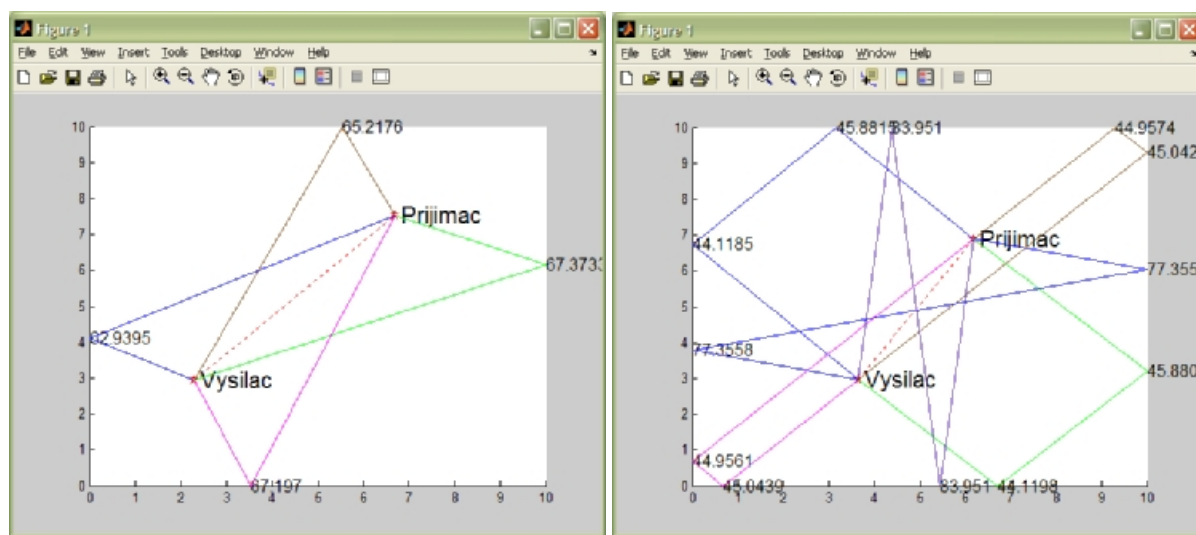
V rámci bakalářské práce jsem vytvořil empirický model šíření vln v místnosti s kolmým uspořádáním stěn. Z obr. 4.1 je vidět, že jsem použil paprskový přístup známý z optiky. V hlavní části okna je umístěna mapa sloužící jako interaktivní část programu, kam se zadávají informace o geometrickém rozložení místnosti. Spodní modrá část je informační box, ve kterém se zobrazují informace o jednotlivých paprscích. Pravá část je ovládací box, do kterého zadáváme všechny důležité informace, které program potřebuje pro výpočet námi požadovaných parametrů. Poslední část programu je systémový box, ve kterém je rozloženo ovládání programu - Zobrazení Fadingu, ukládání dat, novou simulaci či zavření programu.



Obr. 4.1 Grafické prostředí programu modelujícího rozložení a odrazy paprsků v místnosti s překážkou

#### 4.1. Princip modelu šíření signálu

Na (Obr. 4.2 a 4.3) vidíme princip fungování programu a princip aproximace šíření vln do jednotlivých paprsků. Vedle přímého paprsku je zde vidět i jednonásobný a dvojnásobný odraz. Situace je samozřejmě mnohem složitější v případě zastínění spoje. Mezi dvěma spoji v městské zástavbě a uvnitř budov existuje teoreticky nekonečné množství paprsků. Vlna po vícenásobných odrazech a ohybech již nese pouze zanedbatelnou část energie. Pro konkrétní model je tedy nutné omezit maximální počet odrazů. V bodě příjmu je pak nutné všechny příspěvky příchozích paprsků sečíst, tj. amplitudu a fázi. Jelikož každý odraz, difrakce a průchod paprsku znamená ztrátu energie, jsou nadlimitní odrazy paprsků zanedbány.



a)

b)

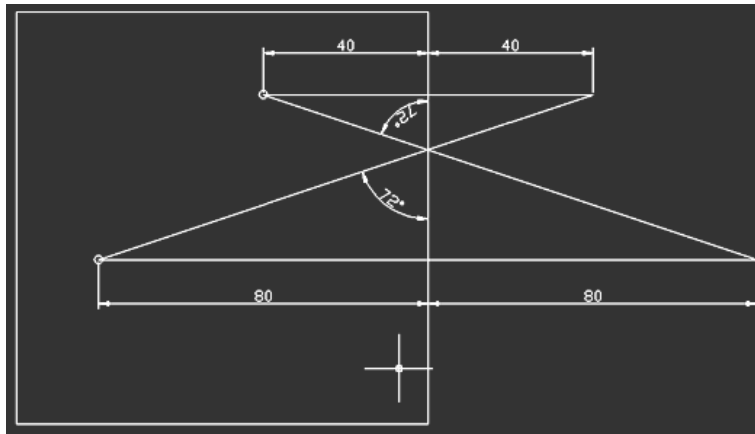
Obr. 4.2,4.3 Aproximace šíření vlny na přímou viditelnost a odražených paprsků v místnosti – a) jeden odraz, b) dva odrazy

Mým prvním cílem bylo nalézt a zobrazit všechny paprsky spojující obě antény. Předem jsem stanovil, že budeme hledat přímý paprsek (značen přerušovaně červeně), jednonásobné a dvojnásobné odrazy. Dohromady tedy jedenáct paprsků. Je třeba si uvědomit, že simulujeme místnost s kolmým uspořádáním stěn, čili 2D model a nezapočítáváme do něj odrazy od podlahy a stropu. Tyto odrazy jistě nastanou, ale rozšířením o tyto dvě plochy bychom získali složitý 3D model. Pro dvojnásobný odraz by navíc nastalo  $n(n-1) = 30$  odrazů, tj. 15 dalších paprsků.

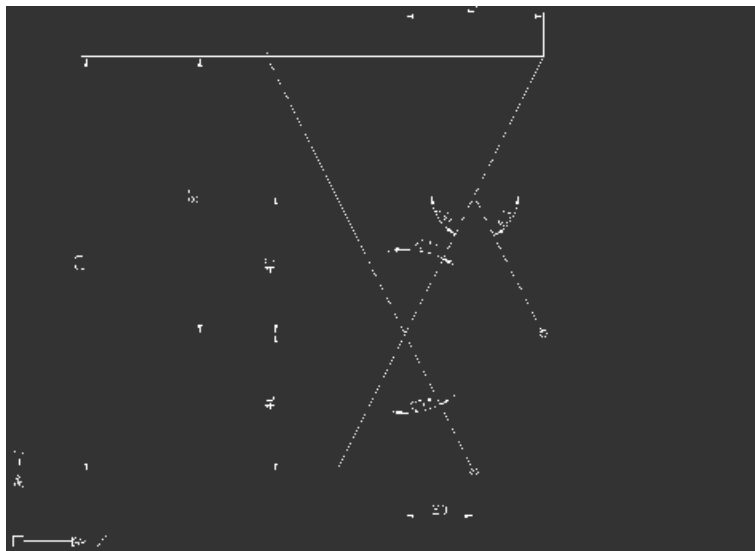
Vlastní algoritmus hledání paprsků patří do oboru počítačové grafiky. Jedná se obecně o 3D úlohu, ale pro tento jednodušší model bylo použito 2D zobrazení a hledání paprsků pouze v půdoryse. Pro zjednodušení celého procesu se využívá skutečnost, že pro každý nalezený 2D paprsek se přidá v další fázi paprsek odražený od země, či stropu. Takový postup se označuje jako 2D/3D hybridní.

## 4.2. Matematický model odrazu paprsků od stěn

Ray tracing – tuto metodu jsem v simulačním programu implementoval a pomocí programu AutoCAD jsem si ověřil její funkčnost (Obr. 4.4 a 4.5). Tedy tak, aby úhel dopadu byl roven úhlu odrazu. Tímto způsobem jsem úspěšně zkoušel modelovat i trojnásobný odraz.



Obr. 4.4 *Ray tracing – hledání odrazů pomocí metody zrcadlení – jednonásobný odraz*



Obr. 4.5 *Ray tracing – hledání odrazů pomocí metody zrcadlení – dvojnásobný odraz*

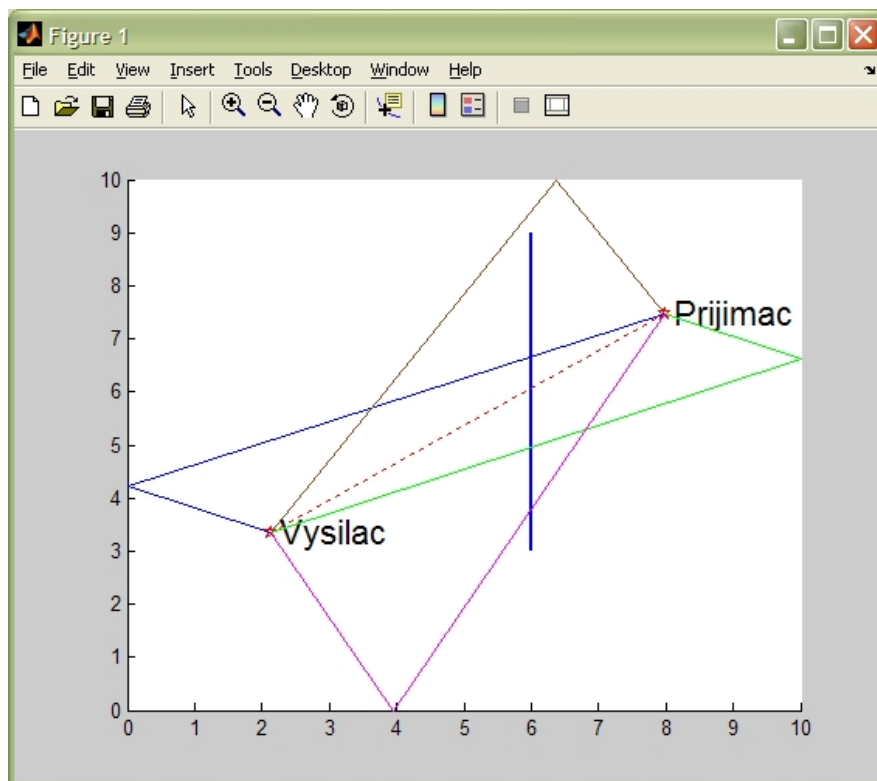
Existuje i technika Ray launching. Pomocí této techniky se v pravidelném intervalu vystřelují jednotlivé paprsky. V případě dopadu paprsků na překážku je vytvořen nový (utlumený) zdroj paprsků. Celkově se pak započítají ty paprsky, které do určitého počtu paprsků zasáhnou konkrétní cíl v určitém okolí bodu příjmu.

Tuto metodu jsem nevyužil, protože Ray tracing je přesnější, i když náročnější na implementaci.

### 4.3. Přidání stěny do modelu

Přidávání stěn, příček, či rozšiřování prostor o nové jednotky a místnosti je základní požadavek všech softwarových modelů. Tímto vlastně modelujeme konkrétní budovu či místnost. V mém případě jsem prováděl experimenty s jednou příčkou, kterou mohu libovolně vkládat do místnosti. U příčky lze libovolně nastavit délku a úhel.

Z obr. 4.6 je vidět, že v tomto případě prochází příčkou přímý paprsek a tři paprsky jednonásobně odražené. Čtvrtý paprsek se příčce vyhnul. Správně by měl být na každém místě průsečíku paprsku s příčkou vidět nový odražený paprsek – protože každý takovýto průsečík je zároveň novým zdrojem signálu (samozřejmě utlumeným příslušným odrazem). To by znamenalo hledat další cesty k přijímači. Odražený signál by však byl přijímán po mnoha dalších odrazech a na malé výkonové úrovni. Při každém průchodu stěnou se část energie odrazí a část energie absorbuje. Úkolem této práce není výpočet, kolik energie projde stěnou (na toto téma bylo sepsáno mnoho vědeckých publikací). Spokojíme se s tím, co bylo uvedeno v předcházejících částech mé práce a to s konstantou útlumu  $L$ , kterou stanovuji dle známých parametrů (typ materiálu, šířka stěny) a taky parametrem  $X(t)$ , což je náhodná časově proměnlivá složka ztrát s nulovou střední hodnotou daná stochastickým rozložením pomalých a rychlých úniků v čase. (kap. 2.2)

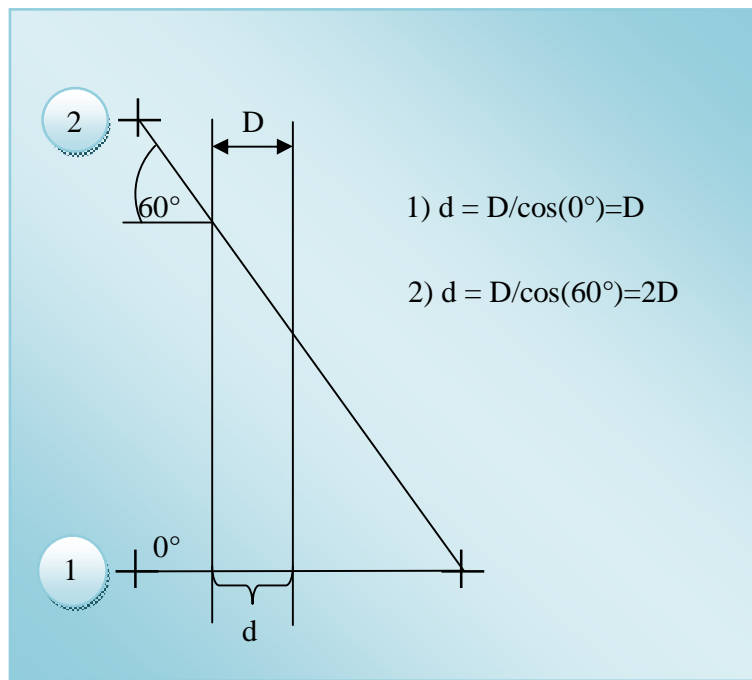


Obr. 4.6 Přidání stěny do modelové situace

V mém modelu určuji parametr  $L_{\text{stěny}}$  dvěma způsoby.

1. Konstantou útlumu, kterou vyjadřuji v (dB/10cm) šířky stěny. Tj., vložím-li šířku stěny 20cm a konstantu útlumu 4 dB, bude celkový útlum průchodu stěnou 8 dB.
2. Dále započítávám délku paprsku procházející stěnou (Obr. 4.7). V modelu počítám úhel, pod kterým dopadá paprsek do stěny. Proniká-li paprsek kolmo do stěny, je jeho dráha stěnou rovna šířce stěny. Se zvyšujícím se úhlem se zvyšuje délka paprsku putujícího stěnou, a tím i jeho útlum. Čímž vezmu údaj z bodu 1) a vynásobím ho koeficientem z bodu 2).

Při tvorbě stěny se do mapy zadají dva body a vytvoří se automaticky příslušná stěna. Její šířka se zadá ještě před vytvořením stěny. Při tvorbě návrhu máme naprostou volnost, takže stěnu nemusíme zadávat. Program funguje i bez ní. Při porovnávání průběhů signálu ale nebude vidět vliv útlumu překážky na jednotlivé průběhy přijímaného signálu.



Obr. 4.7 Rozdílné délky průchodů paprsků stěnou



#### 4.4. Výpočet přijímaného signálu

V bodě příjmu je celková úroveň signálu získána jako součet všech uvažovaných přichozích paprsků. Obecně se jedná o komplexní součet vektorů, nicméně pro přílišnou složitost problému se většinou uvažuje pouze sumace fázorů.

V případě mého modelu vycházíme z hodnot zadaných do ovládacího menu.

|                        |                                     |
|------------------------|-------------------------------------|
| Vytvoř/Zruš Stěnu      | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Šířka stěny: [cm]      | 10                                  |
| Vož vysílač a přijímač | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Výkon Vys.: [mW]       | 100                                 |
| Zisk Vys.: [dB]        | 3                                   |
| Zisk Př.: [dB]         | 3                                   |
| Frekvence: [MHz]       | 2400                                |
| Útlum odrazem: [dB]    | 4                                   |
| Útlum stěnou: [dB]     | 2                                   |

Obr. 4.8 Zadávání hodnot k výpočtu výkonu

Výslednou hodnotu útlumu (zisku) dostaneme součtem jednotlivých položek, které jsme zadali, či je program automaticky dopočítal. Útlum bude se záporným znaménkem, zisk s kladným. Výsledné číslo je již převedeno do jednotek dB. Pokud paprsek projde stěnou, přidá se navíc útlum  $L_{STĚNOU}$  (kap. 4.3). Pokud paprsek neprojde stěnou (příčkou) a pouze se odrazí od stěny, přidá se do výpočtu  $L_{ODRAZ}$ .

$$A = -L_{STĚNOU} + P_V + G_V + G_P \quad \text{výp. pro přímý paprsek} \quad (29)$$

$$A = -L_{STĚNOU} + P_V + G_V + G_P - L_{ODRAZEM} \quad \text{výp. pro jednonásobný odraz} \quad (30)$$

$$A = -L_{STĚNOU} + P_V + G_V + G_P - 2L_{ODRAZEM} \quad \text{výp. pro dvojnásobný odraz} \quad (31)$$

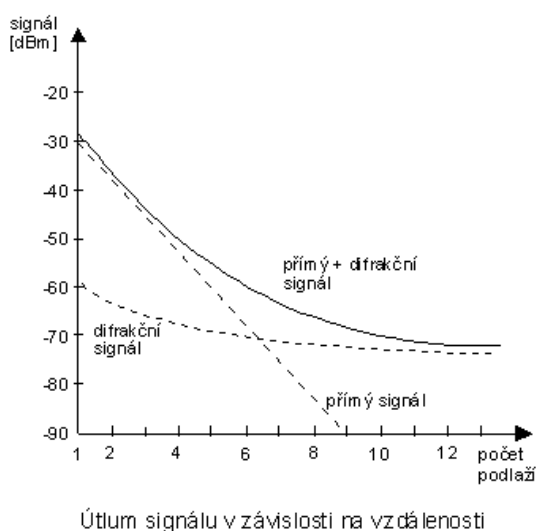
$$\text{výkon} = 10^{\frac{A}{10}} \quad \text{celkový výkon vlny na přijímači} \quad (32)$$

|              |                                      |   |
|--------------|--------------------------------------|---|
| $A$          | zisk/útlum jednotlivých paprsků (dB) | Pokud $A$ vyjde záporné číslo (značí útlum), bude hodnota signálu v místě měření menší než u vysílače. Pokud vyjde kladné číslo (zisk), výkonová hodnota bude vyšší. Tento způsob výpočtu výkonové hladiny signálu je vhodný pro menší místnosti. |
| $L_{STĚNOU}$ | útlum průchodu stěnou (dB)           |   |
| $L_{ODRAZ}$  | útlum odrazem od stěny (dB)          |   |
| $P_V$        | výkon vysílače (dB)                  |   |
| $G_V$        | zisk vysílače (dB)                   |   |
| $G_P$        | zisk přijímače (dB)                  | Nepočítá se ztrátami volným prostorem $FSL_{(d)}$ .   |

#### 4.5. Fading a únikové prostředí

Tento model byl vytvořen pro simulaci odrazů paprsků v uzavřené místnosti s možností nastavení příčky, u které se vypočítá konkrétní koeficient útlumu, a která utlumuje jednotlivé signály v případě průchodu. V našem případě uvažujeme vzdálenosti uvnitř místnosti ještě před Fresnelovým zlomem (Obr. 2.7), a tudíž zanedbáme útlum vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem při vyhodnocování  $FSL_{(d)}$  (1.4), a budeme se zabývat pouze ztrátami na odrazech a při průchodech stěn. Protože se v takovémto prostředí signál šíří více cestami, nastává jev zvaný Fading. V bezdrátových telekomunikačních systémech se vyslaný signál díky odrazům dostává do přijímače více cestami (vícecestné šíření), různě dlouhými a v různých napěťových, či výkonových úrovních. V důsledku tohoto principu přijímač přijme vlnu, která se v superpozici složí ze stejných kopií signálu, každé putující jinou cestou. Každá kopie signálu díky rozdílné délce cest a rozdílnosti prostředí mezi vysílačem a přijímačem má různý útlum, zpoždění a fázový posuv<sup>[3]</sup>. To může mít za následek buď konstruktivní, nebo destruktivní interference, zesílení nebo utlumení signálu přijímaného přijímačem. Silné destruktivní interference jsou označovány jako „deep-fading“ a mohou vyústit v dočasné poruchy komunikace na kanále v důsledku poklesu hodnoty „Signál/Šum“.

Při vzájemném pohybu mobilní a základnové stanice nebo pohybu objektů, od kterých se signál odráží, dochází ve zhruba pravidelných časových intervalech k tzv. hlubokým únikům, což je krátkodobý pokles úrovně signálu pod prahovou úroveň přijímače (řádově o 30 až 40 dB). Frekvence těchto hlubokých úniků je určena především dopplerovským kmitočtovým posuvem, který vzniká vlivem vzájemného pohybu přijímače a vysílače.



Obr. 4.9 Útlum vícecestného signálu v závislosti na vzdálenosti viz (Obr. 2.5)<sup>[10]</sup>

#### 4.6. Práce s programem, zadávání hodnot a grafické prostředí

- Zadání délky a šířky místnosti v (m)
- Vložení či zrušení stěny spolu se zadáním hodnoty šířky stěny
- Vložení vysílače a přijímače do interaktivní mapy
- Ručně zadat parametry simulace: Výkon (mW), zisk vysílače, zisk přijímače, útlum odražené vlny, útlum průchodu stěnou (vše v dB) a také pracovní frekvenci vysílače (MHz).
- Nutno potvrdit tlačítkem „Zadej hodnoty“
- Pro vyvolání grafického zobrazení signálů slouží tlačítka „Bez odrazu“, „Jednonásobný“ a „Dvojnásobný odraz“
- Pokud si chceme zapnout či vypnout mřížku, stačí zaškrtnout tlačítko „Grid On/Off“
- Pro zrušení Matlabového menu, stačí zaškrtnout tlačítko „MenuBar On/Off“

**OVLADACI BOX**

Délka osy X: [m]

Délka osy Y: [m]

Vytvoř/Zruš Stěnu

Šířka stěny: [cm]

Vlož vysílač a přijímač

Výkon Vys.: [mW]

Zisk Vys.: [dB]

Zisk Př.: [dB]

Frekvence: [MHz]

Útlum odrazem: [dB]

Útlum stěnou: [dB]

Zadej hodnoty:

Bez odrazu:

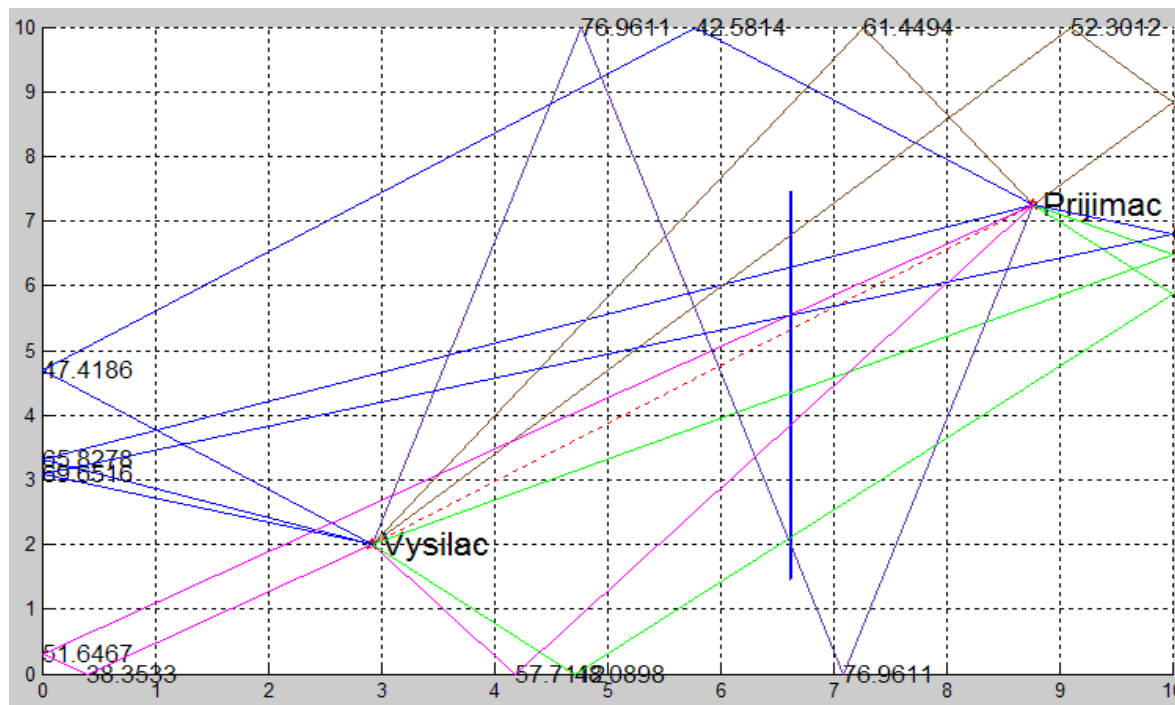
1 odraz:

2 odrazy:

Grid On/Off:

MenuBar On/Off:

Obr. 4.10 Zadávání hodnot do programu



Obr. 4.11 Výsledná mapa cesty signálů pro dané odrazy

Z (Obr. 4.11) vidíme grafické znázornění jednotlivých signálů, jejich rozložení v prostoru a jejich délku (Obr. 4.12). Vidíme paprsky, které prošly příčkou a kolikrát, neboť každý paprsek může projít příčkou v několika odrazech. Také s touto skutečností program pracuje. Jak jsem uvedl výše, tak útlum  $L$  počítám ze zadaných hodnot, koeficientů odrazů od stěn a průníků příčkami. Délku jednotlivých odražených paprsků potřebuji pro výpočet fáze konkrétní vlny. Údaj o délce, který mám k dispozici, je zaokrouhlen na 6 desetinných míst, takže počítám s dostatečnou přesností.

|                  |         |               |         |
|------------------|---------|---------------|---------|
| 1 odraz-lewy     | 12.8184 | 2 odraz-lewy  | 15.8824 |
| 1 odraz-horni    | 12.2344 | 2 odraz-horni | 13.582  |
| 1 odraz-prawy    | 9.82511 | 2 odraz-prawy | 12.4341 |
| 1 odraz-dolni    | 10.946  | 2 odraz-dolni | 14.9126 |
| Vzdalenost V a P | 7.85752 | 2 odraz-H-D   | 25.9171 |
|                  |         | 2 odraz-P-L   | 15.0948 |

Obr. 4.12 Délka trasy jednotlivých signálů

Vpravo dole je umístěno systémové menu (Obr. 4.13) obsahuje 6 tlačítek.

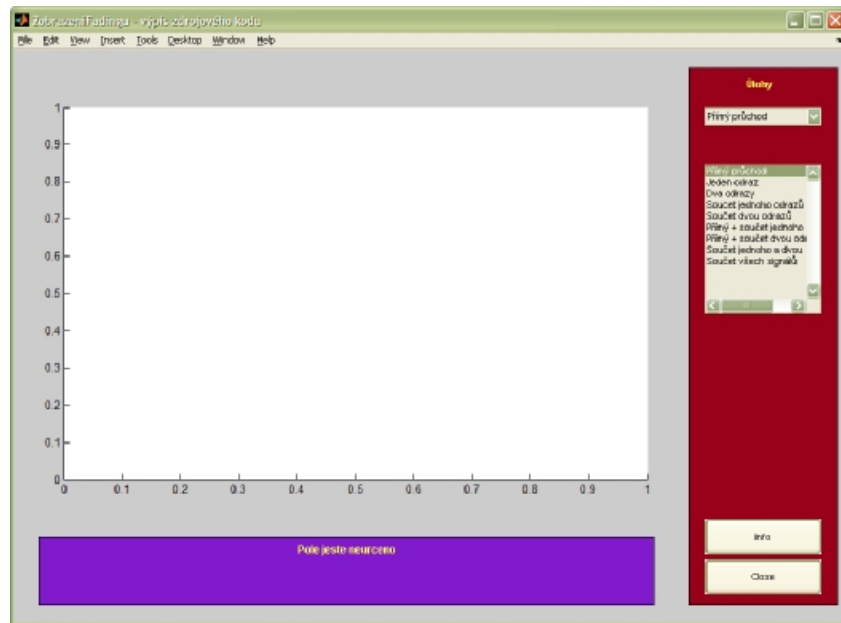
- **Ulož data** – ukládá data programu do souboru, který obsahuje všechny důležité informace pro rekonstrukci signálu, zadaného v hlavním oknu programu.
- **Fading** – po stisknutí tlačítka Fading se otevře nové okno, ve kterém si můžeme vybírat jednotlivé průběhy signálů, sledovat jejich parametry, tj. fázový posuv, hustotu amplitud.
- **Všechny grafy** – tlačítko, jež nám zobrazí průběhy všech grafů najednou
- **Informace** – podají krátký informační přehled o programu a jeho činnosti
- **Nová simulace** – zavře původní a otevře novou simulaci programu
- **Zavřít** – zavře simulaci programu



Obr. 4.13 Systémový box s tlačítky pro ovládání programu

## 4.7. Grafický výstup, Fading

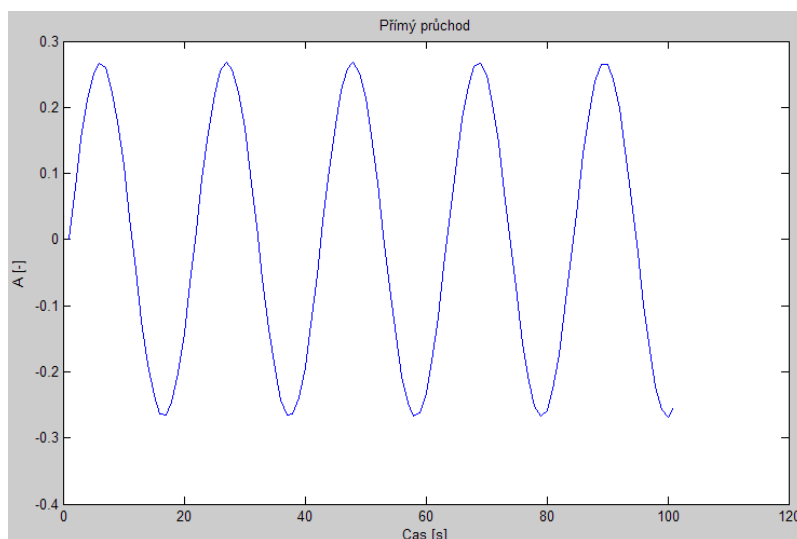
Při stisku tlačítka Fading, se objeví nové okno, ve kterém si můžeme prohlížet jednotlivé průběhy signálů. (Obr. 4.14)



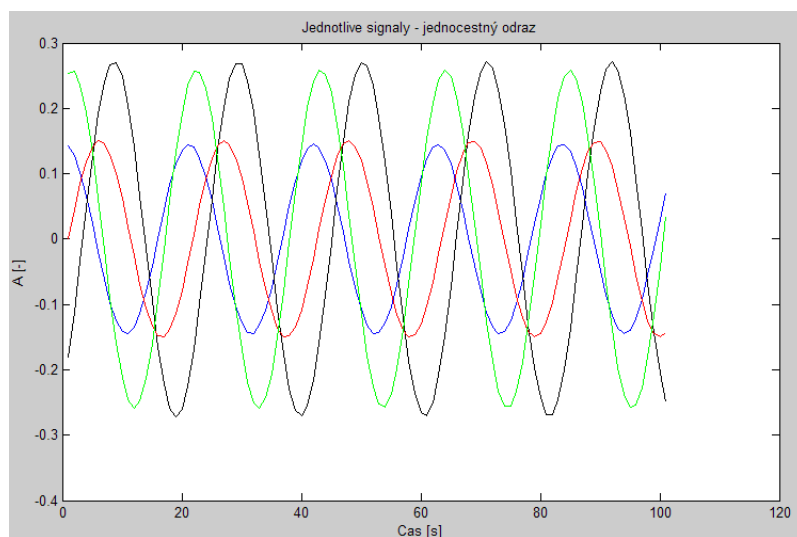
Obr. 4.14 Zobrazení Fadingu

Okno je rozděleno na pravou a levou část. V levé části sledujeme jednotlivé průběhy, které si volíme v pravé straně okna. Každý takovýto průběh je zcela závislý na geometrii simulovaného objektu, zda obsahuje či neobsahuje další příčku, parametry zadaných hodnot (Obr. 4.8 a 4.10) a délky tras jednotlivých paprsků (Obr. 4.12) a jejich fázi. Můžeme si zvolit následujících devět možností a kombinací průběhů:

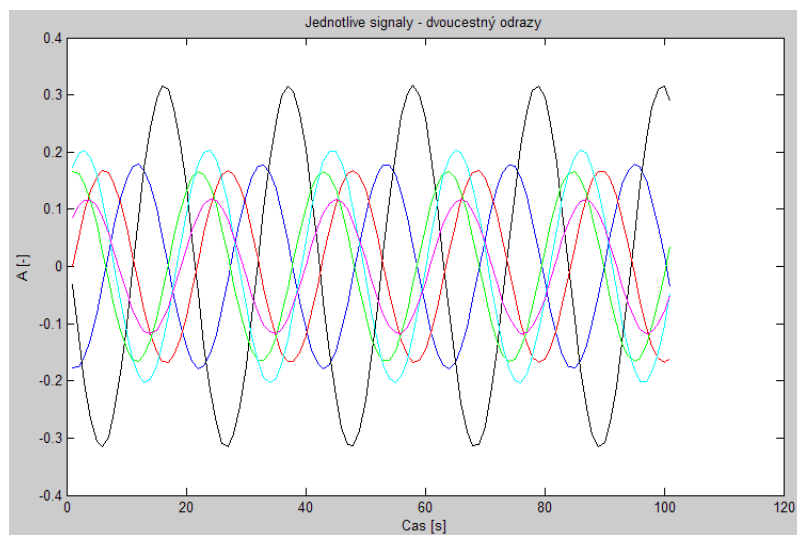
- Přímý paprsek
- Jednocestné odrazy
- Dvoucestné odrazy
- Součet jednocestných odrazů
- Součet dvoucestných odrazů
- Kombinaci přímého paprsku a jednocestných odrazů
- Kombinaci přímého paprsku a dvoucestných odrazů
- Kombinaci jednocestných a dvoucestných odrazů
- Součet všech uvažovaných paprsků



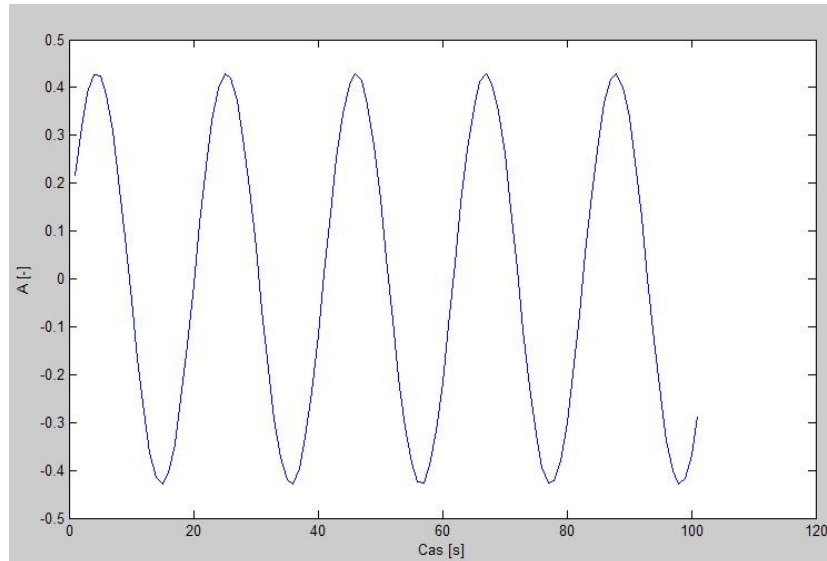
Obr. 4.15 *Přímý průchod*



Obr. 4.16 *Jednotlivé signály – jednocestné odrazy (4)*



Obr. 4.17 *Jednotlivé signály – dvoucestné odrazy (6)*



Obr. 4.18 *Součet všech signálů na straně přijímače*

Na obr. 4.18 vidíme již několikrát v práci zmiňovaný únik signálu, který může kolísat v závislosti na fázových poměrech jednotlivých přijímaných signálů - prakticky od nulové amplitudy až k násobkům amplitudy - vždy v závislosti na uspořádání vysílače, přijímače, rozměrech místnosti a případnému vložení přičky.

Kdyby došlo k součtu dvou stejně tlumených paprsků, které by byly navzájem posunuty o  $180^\circ$  dostali bychom ve výsledku nulovou amplitudu.

Na druhé straně např. příjem několika odražených paprsků se stejnou fází, jako je signál přímého šíření, způsobí, že se přijímané signály sčítají a dosáhnou až násobku amplitud jednotlivých paprsků.

Obou výše zmíněných principů se běžně využívá pro mobilní bezdrátovou komunikaci a přístroje pracující v broadbandových pásmech si musí umět vybrat takový signál, který jim z hlediska poměru „Signál/šum“ přinese nejvíce nezkreslených informací.

## 5. Závěr

Modely, které jsem uvažoval v teoretické části, jsou používány při plánování pokrytí buňkových rádiových systémů v zástavbě a uspokojují základní požadavky na schopnost predikce signálu především v prostředí městské zástavby, makro, mikro a pikobuňek. Na začátku takového uvažování je třeba vědět, jak přesný model chci postavit a kolik informací mu mohu poskytnout k výpočtu. Je třeba si uvědomit, že v zástavbě a hlavně při predikci signálu v budovách jsme odkázáni na jistou míru náhodnosti díky jevům, které jsou popsány v předchozích kapitolách.

Empirické modely, které se doposud hojně využívaly a které poskytují základní pohled na predikci signálu v zástavbě, jsou dnes nahrazovány deterministickými a semi-deterministickými principy, poněvadž podklady přesných městských struktur se s pomocí výpočetní techniky a dokonalého software dají přenést do fungujících modelů.

- Pokud nám tedy záleží na jednoduchosti výpočtu a tvrzení typu „ano, zde bude dostatečný signál k provozování VF zařízení“, můžeme k výpočtu využít „One slope model“ (kap. 3.1).
- Pokud budeme mít dostatek informací o rozmístění místností a příček v interiéru a bude nás zajímat konkrétnější hodnota signálu, využijme raději „Multi wall model“ (kap. 3.2).
- To, jaký model zvolíme, záleží především na okolnostech a našich potřebách, tj. pro jaký typ území chceme model vytvářet, kolik informací potřebujeme k jeho vytvoření a zda-li bude model vůbec schopen dosáhnout požadované přesnosti.

Model, který jsem vytvořil jako bakalářskou práci, se zabývá pouze jednou místností, příčkou v ní umístěnou a zkoumáním interakcí průchodů paprsků od vysílače k přijímači. To bylo také hlavní náplní mé práce. Pokud bych přidal možnost stavět z těchto příček jednotlivé místnosti a úroveň signálu bych vyjádřil nikoliv jednotlivými paprsky od vysílače k přijímači, ale plošnou úrovní signálu v konkrétních místech, bylo by možné vytvořit software, který by modeloval ztráty šířením podobně jako „multi wall model“. Program by se v budoucnu mohl také rozšířit o zapracování pohybu přijímače (po zvolené trajektorii) a monitorovat tak únik signálu v závislosti na pohybu přijímače.



## 6. Přehled obrázků a tabulek

### Obrázky:

- 2.1 Označení frekvenčních pásem pro rádiový přenos dle ČSN IEC 60050-713
- 2.2 Mechanismus modelování výkonové bilance rádiového přenosu v zástavbě
- 2.3 Vícecestné šíření signálu
- 2.4 Rayleighovo rozložení rychlého úniku signálu,  $f=10\text{Hz}$
- 2.5 Alternativní cesty šíření signálu v pikobuňce
- 2.6 Prostorové znázornění Fresnelovy zóny
- 2.7 Fresnelův zlom
- 2.8 Šíření signálu v uzavřeném prostoru z hlediska odstupů S/N
- 2.9 Rozdělení celulárních systémů a šíření elektromagnetické vlny v zástavbě
- 2.10 Aproximace z jednotlivých měření do empirického modelu
- 3.1 Znázornění pevné přenosové trasy s nezastíněnou 1. Fresnelovou zónou
- 3.2 Znázornění mobilního přenosového kanálu s vícecestnými úniky signálu
- 3.3 Šíření signálu prostorem „one slope modelu“
- 3.4 Šíření signálu za pomoci Multi wall model
- 3.5 Bezodrazová komora
- 3.6 Pyramidální absorbér 80MHz-40GHz
- 3.7 Příklad zobrazení pro výpočet modelu ITU-R
- 3.8 COST231 LOS Model – půdorys zkoumané budovy
- 3.9 COST231 NLOS Model – základní geometrie budov
- 4.1 Model simulující rozložení a odrazy paprsků v místnosti s překážkou
- 4.2 Šíření vlny na přímou viditelnost a odražených paprsků v místnosti jeden odraz
- 4.3 Šíření vlny na přímou viditelnost a odražených paprsků v místnosti dva odrazy
- 4.4 Ray tracing – hledání odrazů pomocí metody zrcadlení – jednonásobný odraz
- 4.5 Ray tracing – hledání odrazů pomocí metody zrcadlení – dvojnásobný odraz
- 4.6 Přidání stěny do modelové situace
- 4.7 Rozdílné délky průchodů paprsků stěnou
- 4.8 Zadávání hodnot  $k$  výpočtu výkonu
- 4.9 Útlum vícecestného signálu v závislosti na vzdálenosti
- 4.10 Zadávání hodnot do programu
- 4.11 Výsledná mapa cesty signálů pro dané odrazy
- 4.12 Délka trasy jednotlivých signálů

4.13 Systémový box s tlačítky pro ovládání programu

4.14 Zobrazení Fadingu

4.15 Přímý průchod

4.16 Jednotlivé signály – jednocestné odrazy

4.17 Jednotlivé signály – dvoucestné odrazy

4.18 Součet všech jednocestných odrazů

## 7. Literatura a zdroje informací

- [1] PECHÁČ, Pavel. Šíření vln v zástavbě. [s.l.] : [s.n.], 2007. 108 s.
- [2] PECHAČ, Pavel, ZVÁNOVEC, Stanislav. Základy šíření vln. 1. vyd. Praha : BEN, 2007. 200 s. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [3] Wikipedia [online]. 2008 [cit. 2008-06-26]. Dostupný z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Fading>>.
- [4] Šíření elektromagnetických vln a antény pro mobilní komunikace. [s.l.] : [s.n.], c1990. s. 511-526.
- [5] Simulace rádiových a únikových kanálů [online]. 2002 [cit. 2008-06-25]. Dostupný z WWW: <[www.elektrorevue.cz/clanky/02043/index.html](http://www.elektrorevue.cz/clanky/02043/index.html)>.
- [6] Bezdrátové systémy v přístupové síti [online]. 2008 [cit. 2008-06-27]. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=bezdratove-systemy-v-pristupove-siti&cislocclanku=2008020002>>.
- [7] Rayleigh fading [online]. 2008 [cit. 2008-06-26]. Dostupný z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh\\_fading](http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_fading)>.
- [8] Šíření signálu v uzavřeném prostoru [online]. 2005 [cit. 2008-06-24]. Dostupný z WWW: <[http://www.rfelements.cz/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=990](http://www.rfelements.cz/buxus/generate_page.php?page_id=990)>.
- [10] Šíření rádiových vln v budovách [online]. 2000 [cit. 2008-06-26]. Dostupný z WWW: <<http://homen.vsb.cz/~www547/WEB/TEXTY/KS/KomSyst.htm>>.
- [11] Historie rozhlasových vln [online]. 2000 [cit. 2008-06-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.quido.cz/Objevy/rozhlas1.htm>>.
- [12] EIRP [online]. 2008 [cit. 2008-06-28]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/EIRP>>.