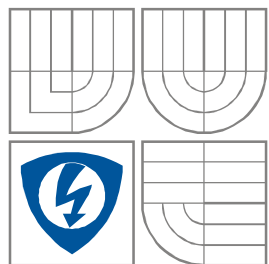


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MODEL POKRYTÍ ÚZEMÍ BUŇKOVÉ SÍTĚ

CELLULAR NETWORK COVERAGE MODEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Lubomír Unzeitig

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Filip Gleissner

BRNO, 2008

ZDE BUDE ORIGINÁL ZADÁNÍ

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Lubomír Unzeitig
Bytem: Na Výsluní 2, Zábřeh, 789 01
Narozen/a (datum a místo): 4. července 1984 v Šumperku

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Model pokrytí území buňkové sítě

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Filip Gleissner

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činnost dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. května 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá šířením mobilního signálu ve formě elektromagnetické vlny v reálném prostředí městské mikrobuňky. Elektromagnetická vlna je průchodem městským prostředím ovlivňována řadou mechanismů. Patří mezi ně především difrakce kolem vertikálních hran budov, difrakce o střechy a refrakce nebo rozptyl od stěn budov popř. země. Tyto mechanismy jsou časově velmi proměnné. Pokud je chceme predikovat, musíme použít více či méně aproximovaný model. Pro experimentální část této práce je zvolen Bergův rekurzivní model, který je schopen predikovat střední hodnotu ztrát šířením resp. střední hodnotu výkonu signálu v daném mikrobuňkovém prostředí. Na jeho základě je vytvořen program umožňující výpočet pokrytí území buňkové sítě signálem. Jeho výhodou je možnost rozmístění až pěti základnových stanic a nastavení řady parametrů jako jsou pracovní frekvence, vysílací výkon základnové stanice, výšky antén základnové a mobilní stanice atd. Samozřejmostí je možnost volby systému GSM 900, GSM 1800 nebo UMTS. Vlastnosti použitého Bergova rekurzivního modelu jsou ověřeny simulacemi na pokusných i reálných mapách městské zástavby.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnetická vlna, UHF pásmo, buňková síť, mikrobuňka, model pokrytí, Bergův model, Bresenhamův algoritmus, Dijkstrův algoritmus, úroveň signálu.

ABSTRACT

This work deals with a mobile signal propagation in electromagnetic wave form in a real environment of city microcell. The electromagnetic wave passing through the city environment is affected by many kinds of mechanism. It includes especially diffraction along vertical edges of buildings, diffraction across building roofs and buildings or ground refraction. These mechanisms are time variable. If we want to predicate them, we have to use sort of approached model. For an experimental part of this work, the Berg's recursive model with a possibility of path losses or signal level prediction in a selected microcellular system is chosen. The software for a cellular network coverage is created on the basis of this fact. Its advantage is a possibility of up to five base stations placing and many kinds of settings, e.g. operating frequency, base station transmitting power, base and mobile station antennas height etc. There is a possibility of system GSM 900, GSM 1800 or UMTS choice. The Berg's recursive model features are checked by simulations on experimental and real maps of build-up area.

KEYWORDS

Electromagnetic wave, UHF band, cellular network, microcell, coverage model, Berg's model, Bresenham's algorithm, Dijkstra's algorithm, signal level.

UNZEITIG, L. *Model pokrytí území buňkové sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Filip Gleissner.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Model pokrytí území buňkové sítě jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Filipu Gleissnerovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	5
2	Šíření rádiových vln	6
2.1	Šíření v pásmu UHF	6
2.2	Charakter prostředí	7
2.3	Vlivy působící na mobilní spoj	8
3	Buňková rádiová síť.....	11
3.1	Princip buňkového systému	11
3.2	Vývoj buňkové sítě.....	13
4	Klasifikace modelů pro predikci šíření vln v buňkové síti	15
4.1	Klasifikace modelů podle typu prostředí	15
4.2	Klasifikace modelů podle typu výpočtu	16
4.3	Přehled modelů pro jednotlivé buňky	17
5	Modely pro mikrobuňky.....	18
5.1	Základní empirický model	18
5.1.1	Použití.....	18
5.1.2	Výpočet	19
5.1.3	Volba parametrů	19
5.2	Modely přímé optické viditelnosti (LOS)	20
5.2.1	Dual-Slope model.....	20
5.2.2	Two-ray (dvoupaprskový) model.....	22
5.2.3	Street canyon (šestipaprskový) model.....	22
5.3	Modely nepřímé optické viditelnosti (NLOS)	23
5.3.1	ITU-R P.1411 model	25
5.3.2	Bergův rekurzivní model.....	27
5.3.3	COST 231 Walfish-Ikegami model.....	29
5.3.4	Optické modely	31
6	Modely pro pikobuňky a makrobuňky	34
6.1	Modely pro pikobuňky	34
6.1.1	One-Slope model.....	34
6.1.2	Model ITU-R P.1238.....	34
6.1.3	Multi-Wall model	34
6.2	Modely pro makrobuňky	34
6.2.1	Hatův model	34
6.2.2	Lee model	35
7	Návrh pro predikci úrovně elektromagnetického pole v mikrobuňce	36
7.1	Cíle práce.....	36
7.2	Návrh v prostředí Matlab	36
7.2.1	Načtení 2D mapy zástavby, umístění základnové a mob. stanice.....	38
7.2.2	Nastavení rozteče mřížky, rozlišení zástavby a ulic	39
7.2.3	Inicializace přímých viditelností mezi body v ulicích pomocí Bresenhamova algoritmu.....	40
7.2.4	Hledání nejkratší cesty pomocí Dijkstrova algoritmu a výpočet ztrát šířením	41
7.2.5	Vytvoření matice ztrát pro každý bod mapy	44
7.2.6	Přepočítání na úroveň signálu	45
7.2.7	Vizualizace výsledných úrovní signálu na mapě a zpracování dat	45
7.2.8	Tvorba uživatelského prostředí	47
7.3	Zhodnocení návrhu.....	48

8	Simulace	50
8.1	Změna úrovně vlivem vzdálenosti	50
8.1.1	Přímá optická viditelnost LOS	50
8.1.2	Nepřímá optická viditelnost NLOS	52
8.2	Změna úrovně vlivem změny úhlu směrů spojnice.....	55
8.3	Ostatní parametry ovlivňující úroveň.....	56
8.4	Simulace na reálné mapě.....	57
9	Závěr.....	61
	Seznam použité literatury	62
	Seznam zkratk	63

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Označení frekvenčních pásem pro rádiový přenos dle ČSN IEC 60050-713.....	6
Obrázek 2.2: Prostorová klasifikace elektromagnetických vln pro pozemní rádiové spoje.....	7
Obrázek 2.3: Uspořádání mobilního spoje při vícecestném šíření.....	8
Obrázek 2.4: Blokové schéma výkonové bilance přenosu.....	8
Obrázek 3.1: Efektivní hospodaření s kmitočtovým spektrem.....	11
Obrázek 3.2: Sektorizace a překrývání buněk.....	12
Obrázek 4.1: Šíření elektromagnetické vlny v zástavbě.....	15
Obrázek 4.2: Příklad rozložení celulární sítě v městské oblasti.....	16
Obrázek 5.1: Získání parametrů empirického modelu z daného počtu měření.....	20
Obrázek 5.2: Empirické modely dual-slope ($n_1 = 2$, $n_2 = 4$, $r_b = 100\text{m}$ a $L_1 = 20\text{dB}$).....	21
Obrázek 5.3: Princip dvoupaprskového modelu.....	22
Obrázek 5.4: Princip šestipaprskového modelu (Optický model pro případ LOS).....	23
Obrázek 5.5: Difrakce o střechu budovy.....	24
Obrázek 5.6: Mechanizmy šíření pro situaci NLOS.....	24
Obrázek 5.7: Změna úrovně signálu v pravidelné zástavbě.....	25
Obrázek 5.8: Model ITU-R P.1411 – základní geometrie při zastínění.....	26
Obrázek 5.9: Princip Bergova rekurzivního modelu.....	27
Obrázek 5.10: Princip modelu Walfish-Ikegami.....	30
Obrázek 5.11: Princip modelu Walfish-Ikegami při pohledu shora.....	30
Obrázek 5.12: Princip metody Ray-tracing.....	32
Obrázek 5.13: Princip metody Ray-launching.....	33
Obrázek 7.1: Algoritmus pro predikci úrovně elektromagnetického pole v mikrobuňce.....	37
Obrázek 7.2: Testovací mapa zástavby.....	38
Obrázek 7.3: Rozlišení zástavby a ulic.....	39
Obrázek 7.4: Přímé optické viditelnosti mezi body mřížky.....	40
Obrázek 7.5: Přímé optické viditelnosti mezi zákl. resp. mobilní stanicí a body mřížky.....	41
Obrázek 7.6: Provedení Dijkstrova algoritmu.....	41
Obrázek 7.7: Nejkratší cesta vypočtena pomocí Dijkstrova algoritmu.....	42
Obrázek 7.8: Vytvoření virtuálního trojúhelníku pro výpočet změny úhlu.....	43
Obrázek 7.9: Grafická vizualizace úrovně signálu na mapě.....	46
Obrázek 7.10: Celkový pohled na uživatelské prostředí.....	47
Obrázek 8.1: Pokrytí zástavby v manhattanském rozmístění.....	50
Obrázek 8.2: Přímá optická viditelnost LOS mezi základnovou a mobilní stanicí.....	51
Obrázek 8.3: Závislost úrovně signálu na vzdálenosti pro dané systémy (případ LOS).....	52
Obrázek 8.4: Nepřímá optická viditelnost NLOS mezi základnovou a mobilní stanicí.....	52
Obrázek 8.5: Závislost úrovně signálu na vzdálenosti pro dané systémy (případ NLOS).....	53
Obrázek 8.6: Porovnání LOS a NLOS pro a) GSM 900 b) GSM 1800 c) UMTS.....	54
Obrázek 8.7: Příklad změny úhlu větší než 90°	55
Obrázek 8.8: Závislost úrovně signálu na úhlu změny směru spojnice.....	56
Obrázek 8.9: Reálná mapa městské zástavby.....	57
Obrázek 8.10: Pokrytí území reálné mikrobuňky pro GSM 900.....	58
Obrázek 8.11: Hledání nejkratší spojnice mezi základnovou a mobilní stanicí.....	58
Obrázek 8.12: Závislost úrovně signálu na vzdálenosti v reálné mikrobuňce.....	59
Obrázek 8.13: Pokrytí území systému GSM čtyřmi základnovými stanicemi.....	60
Obrázek 8.14: Pokrytí území systému UMTS čtyřmi základnovými stanicemi.....	60
Obrázek 8.15: Pokrytí území systému UMTS pěti základnovými stanicemi.....	60

Seznam tabulek

Tabulka 4.1: Přehled modelů pro buňkovou síť	17
Tabulka 5.1: Hodnoty spádového koeficientu	20
Tabulka 7.1: Výkonové úrovně systému GSM.....	44
Tabulka 7.2: Výkonové třídy pro specifikaci mikro a piko buněk	44
Tabulka 8.1: Změna úrovně signálu v závislosti na vzdálenosti (případ LOS).....	51
Tabulka 8.2: Změna úrovně signálu v závislosti na vzdálenosti (případ NLOS).....	53
Tabulka 8.3: Změna úrovně signálu v závislosti na úhlu změny směru spojnice.....	56
Tabulka 8.4: Vlnové délky odpovídající základním kmitočtům mobilních systémů.	57
Tabulka 8.5: Hodnoty úrovně signálu v daných uzlech reálné mikrobuňky.	58

1 Úvod

Realizace bezdrátového přenosu a pokrytí určitého území signálem je v praxi velice komplikovaná záležitost. Signál ve formě elektromagnetické vlny šířící se nestacionárním prostředím nelze charakterizovat naprosto detailně, lze ho však postihnout tzv. modelem šíření, který se více či méně blíží skutečnosti. Vždy je třeba si přesně charakterizovat požadavky kladené na model. Jedná se často o kompromis mezi náročností predikce dané veličiny (ztráty šířením, úroveň signálu, atd.) a přesností výstupních dat modelu. Obecně platí, že čím detailnější vstupní data máme k dispozici, tím náročnější a zdoluhavější je jejich zpracování, avšak výstupní data jsou daleko přesnější.

V reálném prostředí se setkáme s mnoha vlivy, které na elektromagnetickou vlnu působí. Ideální by bylo charakterizovat toto prostředí (přenosový kanál) jeho přenosovou funkcí $H(f)$, kde f je frekvence nebo impulsní odezvou $h(t)$, kde t je čas. Ty však v reálném případě není možné přesně určit. Postihnout je můžeme pouze více či méně aproximovaným modelem. Model často obsahuje informace o rozmístění objektů, jejich velikosti, vícecestném šíření, směrových vlastnostech antén, konkrétním systému či typu služby, atd. Každý model je v tomto ohledu jedinečný. Detailnost vstupních dat má hlavní vliv na náročnost jejich zpracování.

Dalším důležitým parametrem daného modelu je přesnost a množství jeho výstupních dat. U analogových spojů, které mají pevné umístění vysílače i přijímače, jsme se spokojili pouze s poměrem S/N (signál/šum). V současném světě je však na prvním místě mobilita účastníka. Polohu mobilní antény často přesně neznáme, proto je prioritní znalost pokrytí daného území signálem. Přesnost modelů se často odráží v kvalitách nabízených služeb a v jejich spolehlivosti.

Cílem této práce je seznámení s existujícími modely pro predikci ztrát šířením resp. úrovně signálu v dané oblasti buňkové sítě, prostudování jejich vlastností a možnosti použití. Zaměřena je především na mikrobežky čili oblast reálného městského prostředí. Na základě získaných informací bude vytvořen program pro výpočet a grafické znázornění pokrytí území signálem. Tento bude implementován do programovacího prostředí Matlab a bude umožňovat nastavení mnoha parametrů včetně volby systému GSM 900, GSM 1800 a UMTS. Vlastnosti programu s implementovaným modelem budou ověřeny řadou simulací.

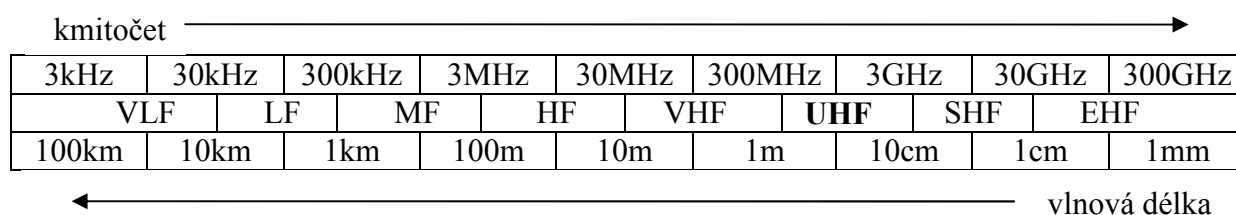
2 Šíření rádiových vln

K přenosu informace využívají radiokomunikační systémy volné prostředí, kde se prostřednictvím rádiových vln přenáší informace mezi vysílačem a přijímačem. Jak je popsáno v [3], rádiovými vlnami nazýváme elektromagnetické vlnění v kmitočtovém pásmu 10 kHz až 3000 GHz, což odpovídá vlnovým délkám v rozsahu 30 km až 0,1 mm. Vlnová délka λ [m] je charakterizována poměrem rychlosti šíření světla c ($3 \cdot 10^8$ [$m \cdot s^{-1}$]) a frekvencí vlny f [Hz].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}]. \quad (2.1)$$

2.1 Šíření v pásmu UHF

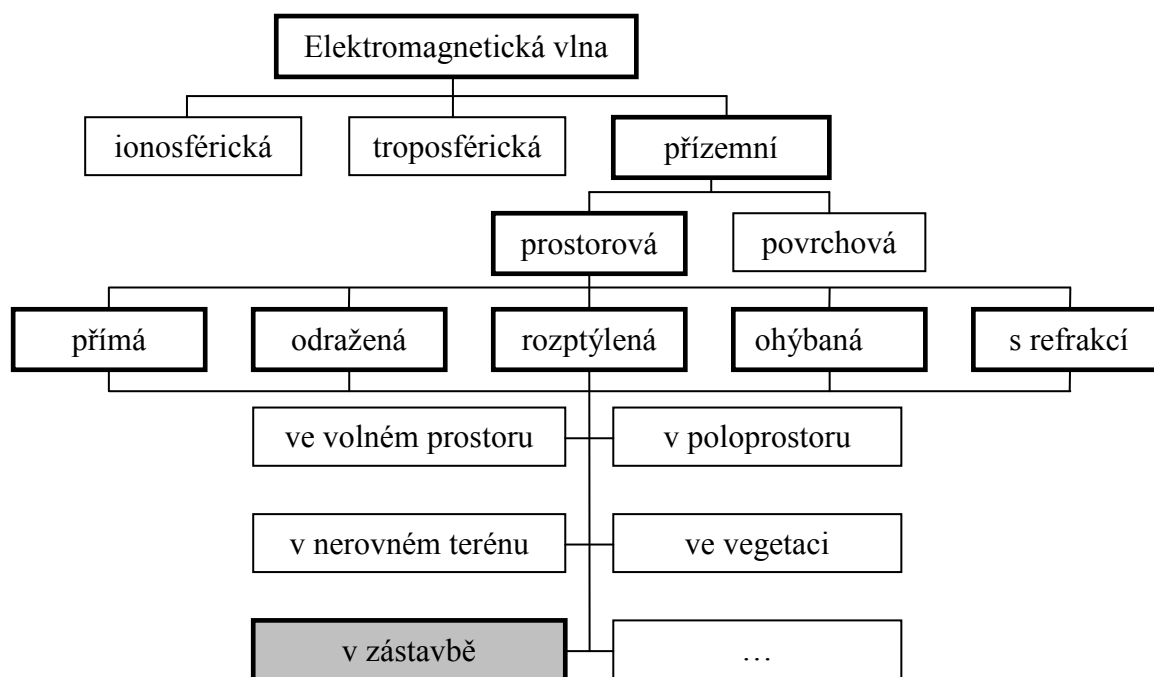
Mobilní systémy používají k šíření elektromagnetické vlny pásmo ultra krátkých vln UHF, kde jsou vlnové délky přibližně decimetrové. Důvodem zvolení právě tohoto pásma jsou velmi vhodné vlastnosti elektromagnetických vln pro daný typ komunikace na těchto frekvencích: relativně malé ztráty šířením, dobrá schopnost odrážet se, ohýbat se a pronikat překážkami v zástavbě. Vlnové délky umožňují konstrukci relativně malých antén vhodných pro mobilní terminály. Pro mobilní komunikaci je prioritní přízemní prostorová vlna.



Obrázek 2.1: Označení frekvenčních pásem pro rádiový přenos dle ČSN IEC 60050-713 [1].

Signál šířící se přízemní prostorovou vlnou je výrazně ovlivněn mnoha odrazy, ohyby a rozptyly na překážkách, jejichž rozměry jsou srovnatelné s délkou vlny. Právě v městské zástavbě jsou tyto vlivy četně zastoupeny. Pásmo UHF je mimo mobilních systémů určeno i pro televizní vysílání, letecké systémy a družicové námořní systémy.

Klasická teorie šíření elektromagnetických vln vychází z vlnové rovnice, která je odvozena přímo z Maxwellových rovnic, jak je uvedeno v [1] a [2]. Na obrázku 2.2 je znázorněn jeden ze způsobů klasifikace šíření vlny pro pozemní rádiové systémy z hlediska prostorového uspořádání spoje. Ionosférická a troposférická vlna se šíří s odrazy v atmosféře, zatímco přízemní povrchová vlna, jejíž chování bude předmětem této práce se šíří podél rozhraní země-vzduch. Cílem našeho zájmu je tzv. přízemní prostorová vlna, která se šíří v prostoru nad zemským povrchem a převážně ten případ, kdy se šíří v zástavbě.



Obrázek 2.2: Prostorová klasifikace elektromagnetických vln pro pozemní rádiové spoje [1].

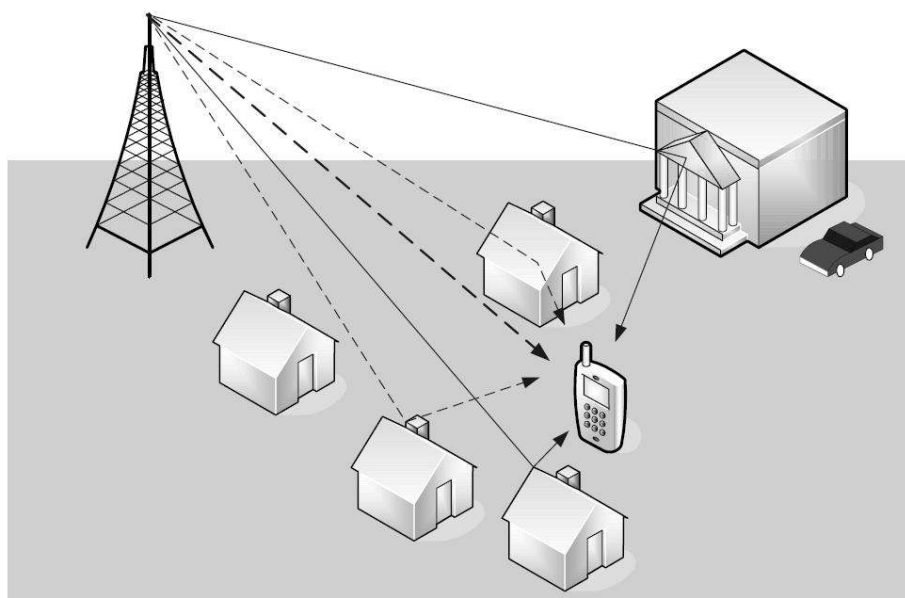
2.2 Charakter prostředí

Přízemní prostorová vlna se může šířit buď při přímé optické viditelnosti mezi oběma konci spoje, čili mezi základnovou a mobilní stanicí. Přímá viditelnost se označuje jako LOS (*Line of Sight*). Vlna se též může šířit pomocí odrazů, ohybů a rozptylů na překážkách v případě nepřímé optické viditelnosti NLOS (*Non Line of Sight*). Jednotlivé mechanismy šíření jsou závislé na typu prostředí, ve kterém se tato vlna šíří. Mluvíme tak o elektromagnetické vlně šířící se ve volném prostoru, v poloprostoru nad rovinnou zemí, nad členitým terénem, nad terénem s vegetací a pro naši práci nejdůležitější případ šíření v městské zástavbě. Mluvíme-li o reálných případech prostředí, pak jsou tyto mechanismy většinou neodlučitelné a není možné jakýkoliv zanedbat. Příkladem může být vlna šířící se v budově, která leží na nerovném kopci obklopená vegetací. Zabýváme-li se však problematikou modelování, většinou tyto mechanismy řešíme odděleně. Jejich sloučením nám narůstá komplikovanost celého modelu. Jelikož se šíří přízemní prostorová vlna do vzdálenosti maximálně jednotek kilometrů, nemusíme se zabývat vlivy atmosféry jako jsou troposférická refrakce, ionosférické bouře, útlum vlivem hydrometeoritů, útlum atmosférických plynů, atd.

V této práci se budeme zabývat přenosem signálu mezi vysílačem (základnovou stanicí) a přijímačem (mobilní stanicí). U vysílací části dochází k přeměně elektromagnetické energie vedené napájecím kabelem na energii vyzářenou. Tuto vyzařuje zvolená anténa. Typ a umístění antén hraje taktéž zásadní vliv při modelování bezdrátového přenosu. Energie se poté šíří přenosovým prostředím ve formě elektromagnetické vlny. Na přijímací straně dojde ke zpětné transformaci energie vyzářené na energii vedenou. Z hlediska pokrytí území můžeme v daném místě zájmu popsat úroveň signálu jako intenzitu elektrického pole nebo jako výkonovou úroveň přijatou referenční anténou. Jako referenční se volí obvykle všesměrová (isotropická) anténa s jednotkovým ziskem. V naší práci budeme pokrytí území signálem vyjadřovat právě ve formě výkonové úrovně.

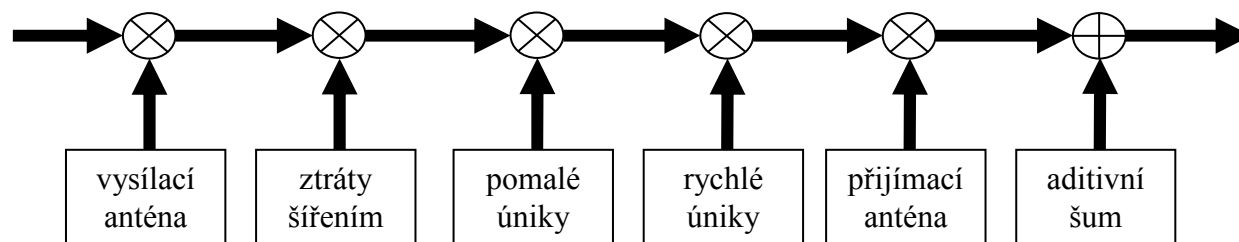
2.3 Vlivy působící na mobilní spoj

Mobilní spoj nám vyjadřuje virtuální spojnicu mezi základnovou a mobilní stanicí, kterou se šíří elektromagnetická vlna. Základnová stanice je pevně umístěna, kdežto mobilní stanice je pohyblivá. Příklad uspořádání mobilního spoje v městském prostředí je na obrázku 2.3. Zde si můžeme povšimnout možnosti šíření jak přímou viditelností, tak i odrazy a ohyby na překážkách popř. o zem. Vlivem těchto interakcí s okolním prostředím dochází k tzv. vícecestnému šíření (*multipath propagation*). Na obrázku 2.3 jsou jednotlivé příspěvky elektromagnetické vlny vyjádřeny ve formě paprsků, které se na přijímací straně sečtou. Cesty jednotlivých příspěvků mají různou délku, což odpovídá i různě fázi a různému časovému zpoždění (*time delay*). Základní popis mobilního spoje při vícecestném šíření lze charakterizovat pomocí impulzové odezvy (*impulse response*). Více se o této problematice dozvíme v [2].



Obrázek 2.3: Uspořádání mobilního spoje při vícecestném šíření [2].

Vlivem mnoha fyzikálních mechanismů je vlna při průchodu komunikačním kanálem tlumena a její úroveň se může v mnoha místech měnit. Blokové schéma výkonové bilance přenosu naznačuje obrázek 2.4.



Obrázek 2.4: Blokové schéma výkonové bilance přenosu.

Na obou koncích spoje jsou umístěny antény s daným ziskem. Je nutné vynásobit výkonovou úroveň přijatého signálu právě těmito zisky. Další významnou roli nám hrají dva

typy šumů. Je to aditivní a multiplikativní šum. V samotném přijímači vzniká aditivní šum způsobený tepelným a výstřelkovým šumem přijímače a interferencemi s ostatními vysílači a jinými elektrickými zařízeními. Multiplikativní šum, který definuje vlastní útlum šířením (*fading*) daným prostředím, tvoří složky popsané dle [1] takto:

- **Ztráty šířením** (*path loss*) – jedná se o útlum závislý zejména na délce spoje a na prostředí s kterým vlna interaguje. Ztráty šířením s rostoucí vzdáleností narůstají a taktéž narůstají v případě, kdy je elektromagnetická vlna často ohýbána případně rozptylována na překážkách. Ztráty šířením zjišťujeme v daném bodě pozorování popř. jeho okolí. Jejich hodnota je jednou z hlavních výstupních informací mnoha modelů.
- **Pomalé úniky** (*slow fading, long-term fading, shadowing*) – jsou způsobené zastíněním spoje určitou překážkou, obvykle se jedná o budovu, lidi, dopravní prostředky, vegetaci, atd. Pomalé úniky se nejvíce projevují při pohybu mobilní antény v zástavbě. Pokud si tedy představíme mobilního účastníka, který přechází např. z oblasti přímé viditelnosti do oblasti stínu, dochází z hlediska vlnové délky k pomalé změně její hodnoty a tím i k pomalé změně útlumu.
- **Rychlé úniky** (*fast fading, short-term fading, Rayleigh fading*) – jsou způsobené především vícecestným šířením signálu a dopplerovským posuvem, viz. [2]. Problematika vícecestného šíření, kdy v přijímači dochází ke sčítání množství fázově i časově posunutých paprsků signálu, již byla vysvětlena výše. Dalším problémem rychlých úniků je skutečnost, že jsou v čase proměnné, jelikož se mobilní účastník neustále pohybuje a taktéž se mění okolní prostředí (např. pohyb lidí, dopravy, atd.). Svou povahou jsou frekvenčně selektivní, čili v každém okamžiku přenosového kanálu je hloubka rychlých úniků různá.

Po jisté idealizaci lze celkový útlum šířením dle [1] popsat následovně:

$$L_c(p, t) = L(p) + X(t), \quad (2.2)$$

kde	$L_c(p, t)$	jsou 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 (dB) s nulovou střední hodnotou daná statickým rozložením pomalých a rychlých úniků v čase.

Nyní je třeba si rozlišit obě složky ze vztahu 2.2. Časově proměnná složka $X(t)$ zahrnuje pomalé a rychlé úniky, takže bude charakterizovat přenosový kanál. Z pohledu modelování se jedná o složku, kterou prakticky nelze přesně určit. Změny úrovně signálu nemohou být v městském prostředí pro každý časový okamžik pravidelné. V každém časovém intervalu je hustota dopravy jiná, lidé se pohybují v různých směrech, vlivem větru se mění i rozmístění vegetace, atd. To vše přináší změnu úrovně signálu. Pro stochastické modely úniků postačí pouze rámcová klasifikace prostředí a uspořádání spoje, která určuje příslušné statistické rozložení úniků v čase.

Složka $L(p)$ určuje střední hodnotu ztrát nebo též můžeme říci střední hodnota útlumu je zásadní z hlediska pokrytí a interferencí daného území. Ta je definována ztrátami šíření a částí pomalých úniků, které jsou způsobeny nepohybujícími se objekty (např. budovy). Taktéž

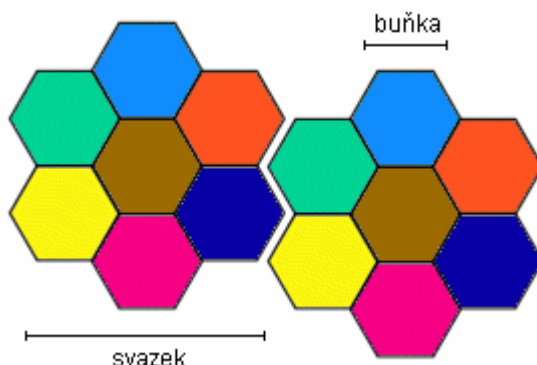
bude rozhodující umístění a použití antén základnové a mobilní stanice. Pro plánování buňkových systémů jsou důležité především směrové a polarizační vlastnosti pevných antén základnových stanic. U mobilních antén je významná nejen jejich účinnost, ale i změna parametrů s ohledem na způsob držení antény uživatelem. Změna umístění mobilní antény vzhledem k tělu uživatele může znamenat změnu výkonové bilance spoje o mnoho dB. Více o této problematice v [1], [2] a [3].

3 Buňková rádiová síť

Buňková rádiová síť se označuje taktéž podle latinského slova „celula“ neboli buňka jako „celulární“. Buňkou je myšleno území o určitých rozměrech, které obsahuje svou vysílací a přijímací část. Tvar buněk se v idealizovaných případech volí jako šestiúhelník. Každá buňka navazuje na území pokryté jinými buňkami a je schopna s nimi komunikovat. Tento systém tvoří celkovou celulární rádiovou síť. Tuto může uživatel použít pro přenos hlasových a datových informací a to v dnešní době bez nutnosti manuálního přepínání při přechodu z jedné buňky do jiné. Celulární rádiová síť může být veřejná (síť mobilních komunikací) a neveřejná (např. policie, firemní síť, atd). a obvykle pracuje v kmitočtovém pásmu od 300 MHz do 3 GHz.

3.1 Princip buňkového systému

Jelikož je rozsah frekvencí přidělených mobilním operátorům omezený, bylo potřeba vytvořit systém, kde by více uživatelů mohlo pracovat na stejné frekvenci. Samozřejmě bylo nutné zajistit, aby se tito uživatelé navzájem neovlivňovali. Tento problém vyřešilo zavedení právě buňkového systému. Efektivní hospodaření s kmitočtovým spektrem si vysvětlíme na obrázku 3.1.

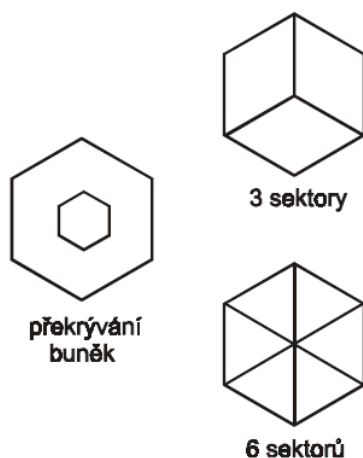


Obrázek 3.1: Efektivní hospodaření s kmitočtovým spektrem [12].

Obsluhovaná oblast je rozdělena do dvou svazků (clusters), které obsahují sedm buněk. Dalším doplněním svazků se může pokrýt neomezeně velké území. Každá z buněk je označena jinou barvou definující frekvenci dané buňky. Za podmínky, že se oblast všech sedmi buněk přibližně rovná interferenční oblasti, je možné použít v každém z obou svazků stejné frekvence (kanály). Důležitým faktorem je to, že lze tyto kanály opakovat ihned v sousedním svazku. Vzdálenost buněk používajících stejnou frekvenci je totiž rovna přibližně pětinasobku jejich poloměru, což je rovno velikosti interferenční zóny. Více v [12].

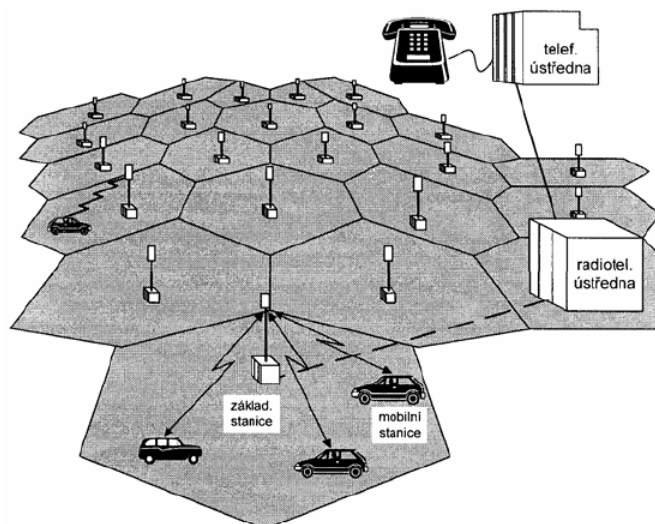
Další zvýšení kapacity sítě lze dosáhnout tzv. sektorizací nebo překrýváním jednotlivých buněk. Tato problematika je znázorněna na obrázku 3.2. Podle [3] se při sektorizaci buněk každá buňka rozdělí na 3 nebo 6 kruhových výsečí tzv. sektorů, ve kterých je zajištěno spojení s mobilní stanicí pomocí příslušné dvojice vysílače – přijímače a směrových antén. Tak se zvýší počet kanálů jedné buňky na trojnásobek resp. šestnásobek a jednotlivé kanály se mohou na daném území opakovat ještě častěji. Buňky mají menší rozměry a základnové vysílače tak vystačí s menšími výkony. Při překrývání buněk je do přetížené

buňky přidána další základnová stanice využívající kanály sousedních buněk. Výkon vysílače této základnové stanice je omezen, takže svým signálem pokrývá pouze část území původní buňky a nedochází k interferencím se signály těch sousedních.



Obrázek 3.2: Sektorizace a překrývání buněk [3].

Na obrázku 3.3 je zobrazena zjednodušená struktura celulární sítě. Uprostřed každé buňky celulární sítě je umístěna základnová stanice označována jako BTS (*Base Transceiver Station*), která obsluhuje jednotlivé mobilní stanice MS (*Mobile Station*) nacházející se uvnitř dané buňky a umožňuje jejich spojení se systémem. Pokud přechází mobilní stanice z jedné buňky do druhé, předají si BTS informaci o dané MS a dojde k přepojení na jinou buňku (tzv. handover). Blíže o handoveru v [3] a [7]. Svazek buněk řídí základnová řídicí jednotka BSC (*Base Station Controller*) a bývá umístěna obvykle uprostřed svazku společně se základnovou stanicí prostřední buňky. Všechny BSC jsou napojeny na radiotelefonní ústřednu MSC (*Mobile Switching Centre*). Ta funguje obdobně jako analogová řídicí ústředna a jejím hlavním úkolem je směrování jednotlivých hovorů k jejich příjemcům a ke spojení s jinými telekomunikačními sítěmi.



Obrázek 3.3: Zjednodušená struktura celulární sítě [10].

Pokud si výše uvedené informace shrneme, získáme tři základní výhody buňkového systému:

- Efektivní hospodaření s přiděleným kmitočtovým spektrem.
- Možnost použít handover.
- Podstatně menší vysílací výkon na straně základnové stanice i mobilní stanice.

3.2 Vývoj buňkové sítě

Komerční mobilní sítě existují od roku 1949, kdy vznikla v Nizozemí komerční mobilní síť OLN (*Openbaar Landelijk Net*). Tato však měla řadu nevýhod oproti současným mobilním systémům. Jednalo se pouze o simplexní přenos informací, což znamená, že mohl mluvit pouze jeden uživatel a pro komunikaci druhého byla zapotřebí spojovatelka provádějící přepínání.

Mobilní systémy byly až do sedmdesátých let 20. století velmi podobné OLN. Sice již pracovaly v plně duplexním režimu (komunikace obou účastníků zároveň) a nebylo již zapotřebí spojovatelky, ale stále obsahovaly mnoho problémů. Mobilní stanice byla použitelná pouze v autě a měla oproti současným obrovskou spotřebu energie. Dalšími problémy byla i velmi nízká kapacita sítě a omezené pokrytí. Každá mobilní stanice pracovala na svém jedinečném kmitočtu a ten nemohl nikdo další využívat. Nedocházelo k samotnému připojení na jinou základnovou stanici v případě, kdy uživatel dojel mimo rozsah stanice, na kterou byl připojen. Došlo k výpadku hovoru a ten byl navázán až po manuálním připojení.

Už v šedesátých letech minulého století se proto začalo pracovat na systému, který by byl schopen tyto problémy odstranit. Řešit je bylo velmi komplikované. Mechanizmy byly sice známy, ale zaostávala technologie. Po sedmdesátých letech se na trh dostaly nové mikroprocesory a tyto nastartovaly vývoj celulárních systémů.

První buňkový systém vznikl v roce 1979 v japonském Tokiu. V Evropě byla představena první celulární síť v roce 1981, kdy vznikla síť označovaná jako NMT (*Nordic Mobile Telephone*). Tuto představil švédský operátor Televerket, dnes známý jako Telia. První síť standardu NMT byla však poprvé uveřejněna 1.9. 1981 v Saudské Arábii, to bylo o měsíc dříve jako ve Švédsku. NMT byla analogová síť pracující v kmitočtovém pásmu okolo 450 MHz a používala analogovou frekvenční modulaci. V Evropě měla každá země vyvinutý svůj vlastní systém, který byl však neslučitelný s jakýmkoliv jiným. Jednalo se o systémy první generace, které byly analogové. Tuto situaci bylo potřebné změnit. Konference evropských správ a pošt CEPT proto vytvořila v roce 1982 novou standardizační skupinu GSM (*Groupe Spécial Mobile*), která měla za úkol vytvořit nový digitální systém kompatibilní pro všechny státy Evropy. Tato skupina poprvé zasedala v prosinci roku 1982 ve Stockholmu a předsedal jí Thomas Haug ze švédského Televerket. Ten je dodnes označován za otce GSM.

Zkratka GSM je používána dodnes, ale místo výkladu *Groupe Spécial Mobile* se dnes používá výstižný název *Global System for Mobile Communications*. Ve zmíněném roce 1982 přijal CEPT doporučení, aby frekvenční spektrum 900 MHz (890-915 MHz a 935-960 MHz) bylo vyhrazeno pro budoucí pozemní a námořní mobilní systém, jímž se později stává právě GSM. O tom ale v roce 1982 ještě zdaleka nebylo rozhodnuto. V letech 1988, 1989 a 1990 se definují rozšířené frekvence pro Enhanced GSM, DCS-1800 a PCN-1900, dnes označované jako deriváty frekvenčního spektra a například u spektra 900 a 1800 MHz nejsou již pro uživatele zřejmé žádné přechody. Více podrobností je možné získat z [5] a [6].

Odpovědnost za tento standard převzal v roce 1989 Evropský telekomunikační institut ETSI a v roce 1990 byla specifikace fáze 1 sítě GSM prohlášena standardem. V roce 1991 začal ETSI provádět první pokusy provozu a v lednu roku 1992 došlo ve Finsku k prvnímu

komerčnímu spuštění. Další vývoj systému GSM si shrneme jen heslovitě. Heslovitý výčet dalšího vývoje GSM je podle [7] následující:

- 1995** – Zavedení základních datových přenosů (fax), zavedení SMS roamingu,
- 1996** – Start mobilních sítí GSM v ČR,
- 1997** – První duální mobilní telefon,
- 1998** – Testování rychlých datových přenosů HSCSD,
- 1999** – WAP, experimentální GPRS síť,
- 2000** – komerční provoz GPRS,
- 2003** – komerční provoz EDGE.

Oproti Evropě existovaly v USA tři linie digitálního celulárního systému. Prvním byl IS-54 a byl uveden do provozu v roce 1991. Tento pracoval na mnohonásobném přístupu s časovým dělením TDMA (*Time Division Multiple Access*). V roce 1993 byl uveden do provozu systém IS-95 pracující na mnohonásobném přístupu s kódovým dělením CDMA (*Code Division Multiple Access*). Ve stejné době se navíc začal rozšiřovat standard GSM v kmitočtovém pásmu 1900 MHz pod označením GSM 1900.

Jelikož byly mobilní standardy vyvíjeny ve všech zemích světa odděleně, nebyly spolu navzájem kompatibilní. Navíc se neustále zvětšovaly požadavky účastníka na rychlost a rozsah mobilních internetových služeb a požadavky na roaming. Proto vznikla asociace IMT 2000 (*International Mobile Telecommunications for the time after year 2000*), jejíž prvořadý cíl bylo vytvoření Univerzálního Mobilního Telekomunikačního Systému UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). UMTS byl v Evropě vyvíjen od roku 1990 a byl zařazen mezi sítě třetí generace 3G.

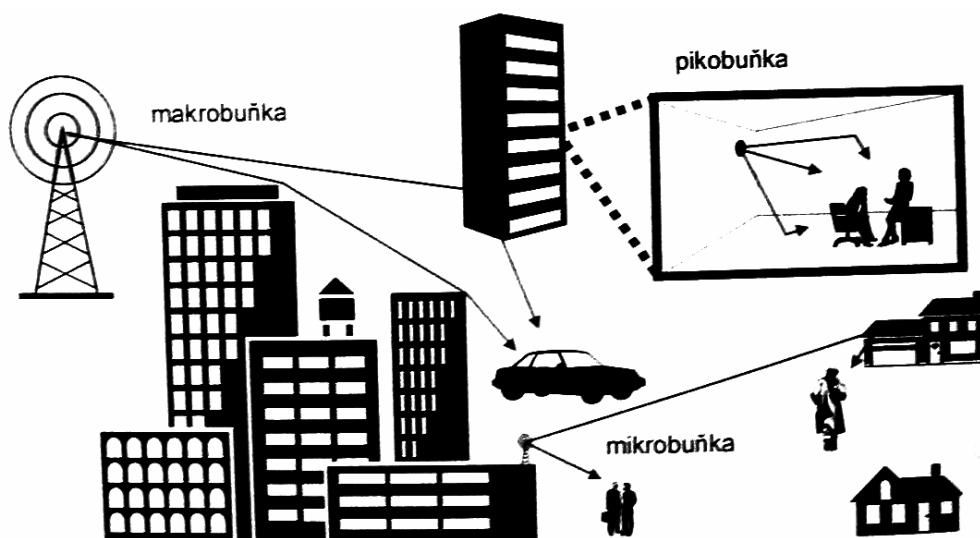
UMTS podporuje spojování s rychlým paketovým přenosem dat, spojování s přepínáním okruhů nebo např. rychlý bezdrátový přístup k síti internet. Přenosová rychlost v downlinku bývá výrazně vyšší než v uplinku. S tímto souvisí přidělování šířky pásma podle potřeby (*bandwidth on demand*), který zefektivnil využití kmitočtového spektra. Vývoj systému UMTS vede ke zrychlování mobilního internetu, např. zavedení HSDPA, HSUPA atd. a zvyšování nabízených služeb. Více viz. v [3] a [7].

4 Klasifikace modelů pro predikci šíření vln v buňkové síti

4.1 Klasifikace modelů podle typu prostředí

Jak bylo uvedeno v kapitole 2, pokud se zabýváme modelováním elektromagnetické vlny, musíme se primárně zaměřit na prostředí, ve kterém se vlna šíří resp. na parametry vlnu ovlivňující. Taktéž je nutné klást důraz na použití antén základnové a mobilní stanice a jejich umístění. Tyto dva parametry charakterizuje primárně typ buňky. Dle [1] můžeme buňky podle jejich typu rozdělit na:

- **makrobuňka (*macrocell*)** – používá se v místech, kde je malá hustota provozu, čili obvykle na venkově nebo okraji měst, pevná anténa je umístěna nad úrovní střech zástavby a poloměr buňky se pohybuje od 1 km až do 30 km,
- **mikrobuňka (*microcell*)** – používá se v oblastech s větší hustotou provozu, obvykle v městské zástavbě, pevná anténa je pod úrovní střech nejvyšších budov, avšak výše než střední výška budov; poloměr mikrobuňky je typicky 100 m až 1 km,
- **pikobuňka (*picocell*)** – používá se v oblasti s vysokou koncentrací uživatelů, obvykle uvnitř budov, nákupních center nebo na nádraží, pevná anténa je tedy umístěna v uzavřeném prostředí; rozměry pikobuňky dosahují řádově desítek metrů,
- **buňka deštníkového typu (*umbrella cells*)** – je speciálním druhem buňky, vykrývá nepokryté území v malých mikrobuňkách či pikobuňkách.

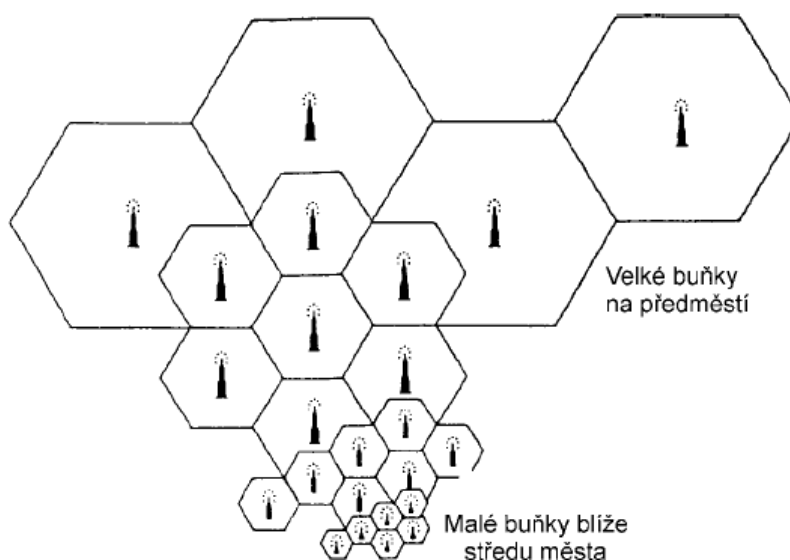


Obrázek 4.1: Šíření elektromagnetické vlny v zástavbě [1].

Obecně je nejkomplikovanější modelování uvnitř pikobuněk a mikrobuňek. Úroveň signálu v pikobuňkách ovlivňují i detailní změny prostředí, např. otevření okna v kanceláři, pohyb výtahu, pohyb osob, atd.. Tyto děje mohou změnit úroveň signálu o jednotky až

desítky dB. V mikrobeuňkách se setkáváme s hustým provozem dopravy i osob. Vlivy působící v mikrobeuňkách mohou vyvolat změnu úrovně signálu o jednotky až stovky dB. Predikce změn v těchto buňkách je velmi komplikovaná, jelikož jsou naprosto nepředvídatelné.

Na obrázku 4.2 je názorně zobrazeno, jak se mění velikost buněk při přechodu z centra města na předměstí. Mimo město jsou již velikosti buněk jednotky až desítky kilometrů. Se vzrůstající hustotou provozu velikost buněk klesá. V případě nedostatečné kapacity lze využít sektorizaci nebo překrývání buněk, tak jak bylo popsáno v kapitole 3.1.



Obrázek 4.2: Příklad rozložení celulární sítě v městské oblasti [3].

4.2 Klasifikace modelů podle typu výpočtu

Tato klasifikace se zabývá tvorbou samotného modelu. Charakterizuje zpracování vstupních informací, jejich určitou aproximaci a kvalitu výstupní informace. Složitost zpracování se často odráží na výpočetních a časových nárocích použitého modelu. Jednotlivé modely můžeme dle typu (charakteru) výpočtu rozdělit podle [1] do čtyř skupin:

- **empirické** – jsou vytvořeny z velkého počtu experimentálních měření jejich statistickou analýzou a vytvořením více či méně aproximativních vztahů, jsou většinou jednoduché a mají malou přesnost,
- **deterministické** – jsou často označovány jako fyzikální modely, jelikož se jedná o teoretické modelování na fyzikálním základě šíření vlny pro idealizovaný nebo zjednodušený popis daného prostředí, tyto modely vycházejí přímo z vlnové rovnice, proto jsou složité a jejich výstupní informace přesné,
- **semi-deterministické**, resp. **semi-empirické** - kombinace dvou předchozích přístupů,
- **stochastické** – tyto pracují na základě vstupních parametrů tak, že náhodně vygenerují průběh signálu, který simuluje přenosový kanál, používají se v případě, kdy neznáme přesné umístění antén základnové a mobilní stanice ani přesnou geometrii terénu.

Před volbou daného modelu si musíme prvně určit, pro jakou aplikaci chceme model použít resp. jak přesné výsledky potřebujeme získat. V praxi se nejčastěji používají výpočetně jednoduché empirické modely, které nemají vysoké požadavky na vstupní data a jejich výpočet je časově nenáročný. Často jsou však jejich výstupní informace nedostačující. Nejsou totiž schopny zjistit širokopásmové parametry (úhel dopadu, impulzovou odezvu, atd.). Rozšiřující se kvalita výpočetní techniky nám v současné době dovoluje používat i přesnější a výpočetně náročnější fyzikální modely, které nám poskytují vyšší přesnost a kvalitu výstupních dat. Obvykle modelují ztráty šířením resp. úroveň signálu i širokopásmové parametry. Přesnost těchto deterministických modelů je však vykoupena vysokými finančními nároky, složitostí a s tímto související časové a výpočetní nároky.

4.3 Přehled modelů pro jednotlivé buňky

Tabulka 4.1: Přehled modelů pro buňkovou síť [1].

5 Modely pro mikrobuňky

Cílem této práce je primárně se zaměřit na problematiku šíření vln v mikrobuňkách. Proto je tato kapitola podrobně věnována mikrobuňkám a modelům, které jsou pro ně vhodné. Jak už bylo naznačeno v kapitole 4.1, mikrobuňky se používají v oblastech s větší hustotou provozu, obvykle v městské zástavbě. Poloměr mikrobuňky je typicky 100 m až 1 km. Pevná anténa je umístěna pod úrovní střech nejvyšších budov, avšak výše než střední výška budov. Velmi často je situována na stěně budovy. Oproti makrobuňkám je u základnových stanic použit nižší vysílací výkon. Typická hodnota vysílacího výkonu základnové stanice je 30 W pro makrobuňky a 5 W pro mikrobuňky. Vzhledem k vysoké koncentraci uživatelů v mikrobuňce a vzhledem k omezenému frekvenčnímu spektru je třeba provést znovupoužití stejných kmitočtů na určitém území častěji, viz. kapitola 3.1. To má za následek zmenšení průměrů buněk právě v oblasti s vysokou hustotou provozu. S tímto souvisí i náklady na umístění většího počtu základnových stanic. Buňky se jen vzdáleně blíží svým tvarem kruhu. Pokud model mikrobuňky obsahuje i informaci o vyzařovacích charakteristikách antén, můžeme snadněji určovat interference, avšak tvar buňky nezjistíme.

Signál se v mikrobuňce šíří buď přímo volným prostorem nebo mnohonásobným odrazem (refrakce), rozptylem na překážkách a ohybem (difrakce) o vertikální hrany budov. Každý model v sobě zahrnuje tyto parametry více či méně. Proto je při jeho tvorbě vhodné rozlišit situaci přímé optické viditelnosti (LOS) mezi oběma konci spoje a nepřímé optické viditelnosti (NLOS), čili při zastínění spoje. V situaci NLOS je nutné znát podrobněji rozmístění zástavby v dané mikrobuňce, a proto je i predikce šíření vlny v tomto případě náročnější.

Nyní si rozebereme jednotlivé modely vhodné pro mikrobuňky včetně jejich výhod a nevýhod. V této problematice budeme vycházet z literatury [1], [2] a [9] a taktéž všechny použité vztahy jsou převzaty právě odtud.

5.1 Základní empirický model

5.1.1 Použití

Základní empirický model tvoří základ pro výpočet složitějších modelů, proto jej neřadíme do žádné bližší kategorie. Slouží pro výpočet pokrytí signálu v zástavbě. Časté použití právě tohoto modelu vychází z jeho jednoduchosti, rychlosti výpočtu a s tím související rychlosti získání výstupních dat. Popisuje nárůst ztrát šířením s n -tou mocninou vzdálenosti. Předpokládáme hladkou spádovou křivku odpovídající právě n -té mocnině vzdálenosti, viz. vztah (5.1) převzatý z [1].

$$P_p \approx \frac{1}{d^n}, \quad (5.1)$$

kde P_p přijímaný výkon (W),
 d je vzdálenost od vysílací antény (m),
 n spádový koeficient (exponent, koeficient útlumu, *slope, path-loss exponent*).

Výhody

- nenáročnost na vstupní data
- rychlost výpočtu

Nevýhody

- ztráty šířením jsou závislé pouze na rostoucí vzdálenosti, model nerespektuje konkrétní rozmístění zástavby
- jeho parametry vznikají průměrováním vstupních informací, proto může dojít ke zkreslení
- zjišťuje pouze ztráty šířením resp. úroveň signálu
- použitelný jen v prostředí s hladkým nárůstem ztrát šířením

5.1.2 Výpočet

Základní výstupní informací tohoto modelu jsou ztráty šířením, které lze vyjádřit jako funkci vzdálenosti. Jak už bylo zmíněno výše, ztráty narůstají dle [1] s n -tou mocninou vzdálenosti.

$$L(d) = L_1(d_1) + 10n \log\left(\frac{d}{d_1}\right), \quad (5.2)$$

kde L jsou ztráty šířením (dB),
 L_1 je referenční útlum (dB) pro referenční vzdálenost d_1 (*intercept*),
 d vzdálenost od vysílací antény (m),
 d_1 referenční vzdálenost (m),
 n spádový koeficient (exponent, koeficient útlumu, *slope*, *path-loss exponent*).

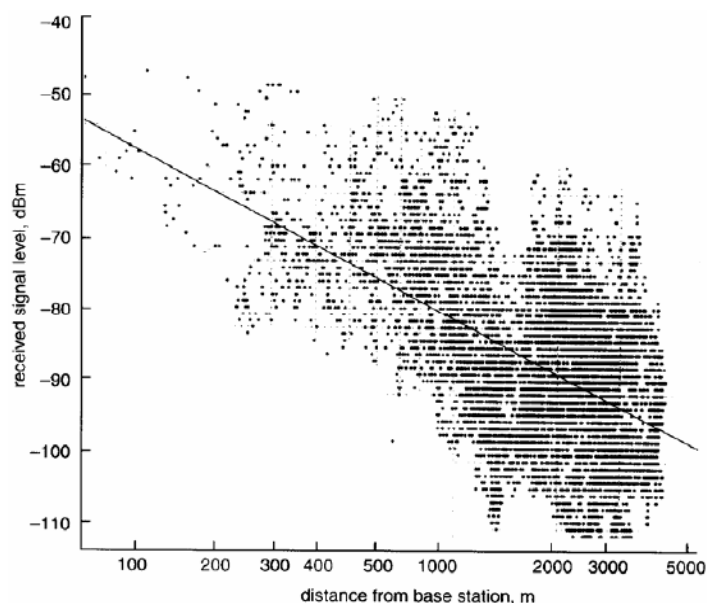
Z důvodů zjednodušení výpočtu se volí referenční vzdálenost d_1 jednotková. Základní jednotkou může být metr, ale i kilometr nebo míle.

5.1.3 Volba parametrů

Hlavními parametry základního empirického modelu jsou dva, referenční útlum L_1 a exponent n . Tyto se určují z velkého počtu měření v daném prostředí, jejich statistickým zpracováním a následnou aproximací. Takový případ je možné vidět na obrázku 5.1. Tečky na obrázku představují jednotlivá měření a přímka již aproximovaný model získaný ze statistického vyhodnocení daných měření. Měření je nutné provádět na více místech a při různém umístění antén spoje, je nutné postihnout situaci LOS i NLOS atd.

Orientační hodnoty referenčního útlumu L_1 pro referenční vzdálenost d_1 lze vyjádřit pomocí $FSL(d_1)$, což jsou ztráty volným prostorem (dB). Tyto lze získat podle vztahu (5.3) převzatého z [1].

$$FSL(d_1)_{dB} = 10 \log\left[\left(\frac{4\pi d_1}{\lambda}\right)^2\right]. \quad (5.3)$$



Obrázek 5.1: Získání parametrů empirického modelu z daného počtu měření [10].

Na závěr základního empirického modelu se seznámíme s hodnotami spádového koeficientu pro nejčastější typy městského prostředí. Tyto hodnoty jsou definovány v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1: Hodnoty spádového koeficientu [1].

Prostředí	n(-)
volný prostor	2,0
městská 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

5.2 Modely přímé optické viditelnosti (LOS)

5.2.1 Dual-Slope model

5.2.1.1 Použití

Dual-Slope model je empirický a vychází ze základního empirického modelu. Doslovné vyjádření názvu Dual-Slope znamená „dvojí sklon“. K výpočtu ztrát šířením užívá model dva exponenty, které se mění podle vzdálenosti od vysílače. Ve vztahu (5.4) se tyto koeficienty uplatňují podle toho, zda se spojnice nachází před nebo za bodem zlomu. Typicky se jedná o Fresnelův zlom, viz. [1], [2]. Model je určený pro mikrobuňky či větší pikobuňky a pouze pro případ LOS. Jeho výhody a nevýhody jsou totožné se základním empirickým modelem.

5.2.1.2 Výpočet

Následující vztahy převzaté z [1] charakterizují princip výpočtu ztrát šíření pro Dual-Slope model.

$$\begin{aligned} L(d) &= L_1 + 10n_1 \log d & d \leq d_0, \\ L(d) &= L_1 + 10n_1 \log d_0 + 10n_2 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) & d > d_0, \end{aligned} \quad (5.4)$$

kde $L(d)$ 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, tj.

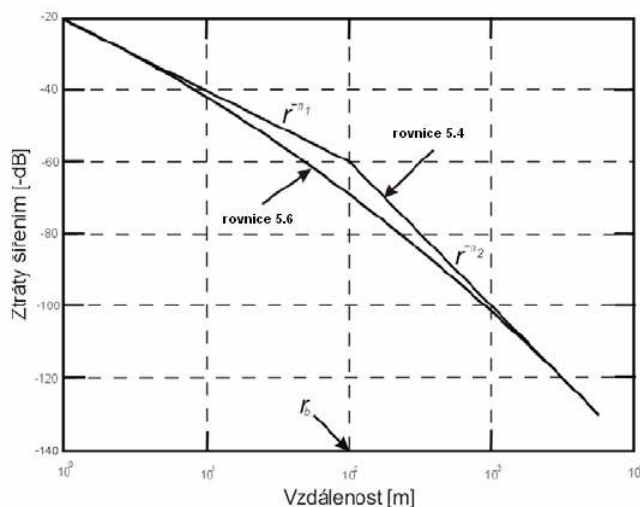
$$d_0 = \frac{h_1 h_2}{\lambda}, \quad (5.5)$$

kde h_1, h_2 jsou výšky antén spoje (m),
 λ vlnová délka (m).

Pokud chceme vyjádřit ztráty pro oblast kolem bodu zlomu, získáme podle vztahu (5.4) lomenou přímku. Pomocí vztahu (5.6) převzatého z [1] však můžeme v oblasti bodu zlomu získat hladký průběh.

$$L(d) = L_1 + 10n_1 \log d + 10(n_2 - n_1) \log \left(1 + \frac{d}{d_0} \right). \quad (5.6)$$

Porovnání rovnic (5.4) a (5.6) je graficky naznačeno na obrázku 5.2. Typické hodnoty exponentů jsou $n_1 = 2$ a $n_2 = 4$ se vzdáleností bodu zlomu 200 – 500 m.



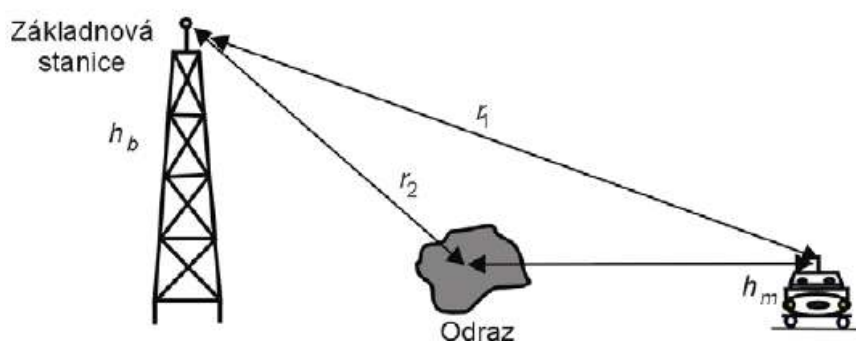
Obrázek 5.2: Empirické modely dual-slope ($n_1 = 2$, $n_2 = 4$, $r_b = 100\text{m}$ a $L_1 = 20\text{dB}$) [9].

5.2.2 Two-ray (dvoupaprskový) model

Pokud je mezi oběma konci spoje přímá optická viditelnost, tak existuje minimálně jeden přímý a jeden odražený paprsek. Tuto situaci nám řeší Dvoupaprskový model, viz. obrázek 5.3. V reálné zástavbě se setkáváme s vícenásobným odrazem, proto je tento model značně idealizovaný a řadíme ho k empirickým přístupům predikce. Útlum šířením lze dle [9] vyjádřit ze vztahu (5.7).

$$\frac{1}{L} = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + R \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right|^2, \quad (5.7)$$

kde R je Fresnelův koeficient odrazu pro danou polarizaci, viz. [1], [2]. Jedná-li se o horizontální polarizaci, blíží se hodnotě -1 a v případě vertikální má hodnotu 2.

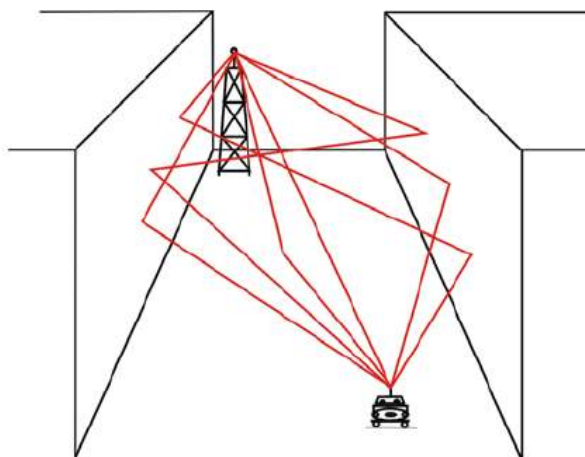


Obrázek 5.3: Princip dvoupaprskového modelu [9].

Dvoupaprskový model lze použít pouze v oblastech s otevřeným prostorem a jen minimálním počtem překážek. Příkladem mohou být dlouhé úseky dálnic, kde se vyskytuje jen přímá optická viditelnost mezi oběma konci spoje a kde dochází pouze k nepatrným rozptylům na překážkách.

5.2.3 Street canyon (šestipaprskový) model

Jak už bylo naznačeno výše, v reálné zástavbě se vlna šíří více než dvěma paprsky. Pokud uvažujeme umístění pevné a mobilní antény v jedné ulici podle obrázku 5.4, interaguje vlna s okolní zástavbou a uplatňuje se tzv. vlnovodový efekt. Ve skutečnosti se zde vyskytuje nekonečně mnoho paprsků, ale plně postačuje charakterizovat šíření základními šesti, proto mluvíme o Šestipaprskovém modelu.



Obrázek 5.4: Princip Šestipaprskového modelu (Optický model pro případ LOS) [9].

Pro tento případ se nemá smysl zabývat všemi paprsky, které se zde ve skutečnosti šíří. Plně postačuje uvažovat právě šest uvedených, ostatní jsou více či méně tlumeny.

Two-ray i Street Canyon model jsou typickými příklady Optických modelů pro přímou viditelnost. Optickými modely pro nepřímou viditelnost mezi oběma konci spoje se budeme zabývat v kapitole 5.3.4.

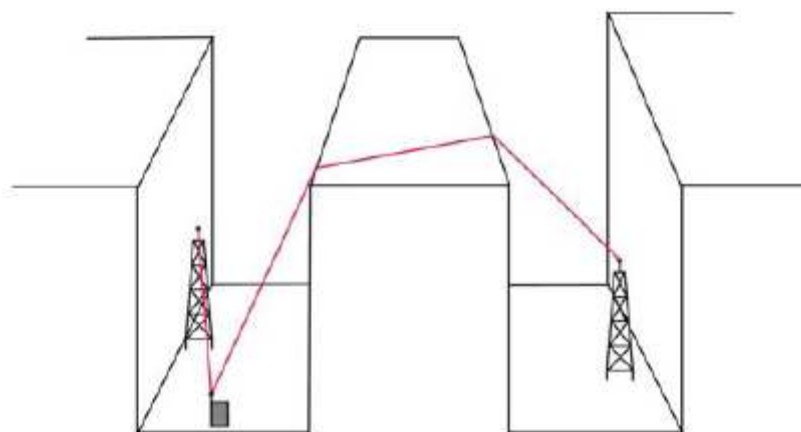
5.3 Modely nepřímé optické viditelnosti (NLOS)

Tyto modely obvykle rozdělují úlohu výpočtu na dvě části. Nejprve model řeší cestu signálu pro přímou optickou viditelnost a poté pro nepřímou optickou viditelnost. Pokud neexistuje přímá optická viditelnost mezi oběma konci spoje, dochází ke značnému úbytku energie elektromagnetické vlny. Toto mají za následek především tyto mechanismy šíření:

- difrakce kolem vertikálních hran budov,
- difrakce o střechy budov,
- refrakce a rozptyl od stěny budov a země.

Při difrakci kolem vertikálních hran budov dochází ke změně úhlu směru šíření. To má za následek nárůst ztrát šířením. Obecně platí, že čím větší úhel změny, tím více ztráty narůstají. Při mnohonásobné difrakci může dojít k tomu, že signál ztratí při průchodu prostředím takové množství energie, že se k přijímači dostane jen zanedbatelná hodnota. Proto je nutné volit umístění pevných antén základnových stanic s ohledem na tuto skutečnost. Difrakce kolem vertikálních hran budov je dominantní při šíření elektromagnetické vlny na kratší vzdálenost.

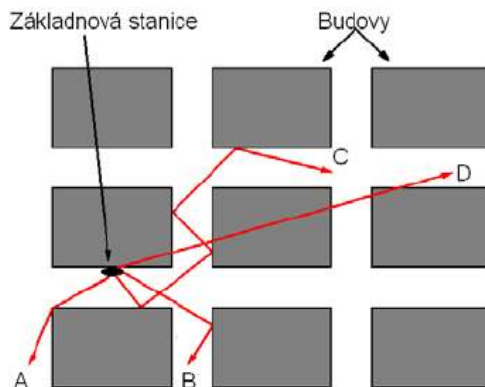
Případ difrakce o střechy budov je naznačen na obrázku 5.5. Tento je naopak dominantní při větších vzdálenostech mezi oběma konci spoje. Toto přináší problém s interferencemi při použití stejných kanálů u systému GSM (u UMTS se jedná o problematiku se „skremblovacími“ kódy, viz. [7] a [9]).



Obrázek 5.5: Difrakce o střechu budovy [9].

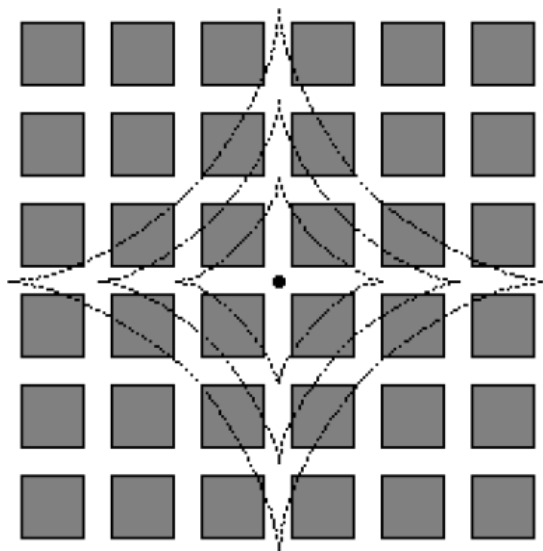
Vzhledem k malým výškám antén v mikrobuňce a hlavně v případech, kdy je cesta signálu obklopena převážně zástavbou, dochází i k časté refrakci a rozptylu od stěn budov. Tyto budovy se stávají reflexními body a výsledný signál je tedy daleko silnější než při šíření s dominující difrakcí.

Na obrázku 5.6 jsou naznačeny všechny zmiňované mechanismy šíření. Signál se šíří od místa základnové stanice do místa příjmu různými způsoby. V případě cesty A je dominující difrakce o vertikální roh budovy. U cesty B dominuje refrakce o budovu popř. i zem. Stejně tak v případě cesty C, kde se jedná o vícenásobnou refrakci. Cesta D reprezentuje největší virtuální vzdálenost do místa příjmu, proto je zde dominantní difrakce o střechy budov.



Obrázek 5.6: Mechanizmy šíření pro situaci NLOS [9].

Obecně tedy platí, že pokud se šíří signál při přímé optické viditelnosti, dochází jen k pozvolnému narůstání ztrát šířením, pokud však vlna zahne za roh, může dojít k úbytku signálu až o 20 dB. Vše samozřejmě záleží na konkrétních podmínkách a na velikosti změny úhlu při difrakci za roh. Pokud si tedy představíme pravidelné (manhattanské) rozmístění zástavby podle obrázku 5.7, nedochází k poklesu úrovně signálu v pravidelných kruhových konturách, nýbrž v konturách přibližně kosočtverečných. V těchto situacích by měli být buňky se stejnými kanály v GSM popř. „skremblovacími“ kódy v UMTS odděleny diagonálně od směrů ulic a s dostatečným rozstupem, aby zde nedocházelo k častým interferencím.



Obrázek 5.7: Změna úrovně signálu v pravidelné zástavbě [9].

5.3.1 ITU-R P.1411 model

5.3.1.1 Použití

ITU-R je radiokomunikační sektor Mezinárodní telekomunikační unie ITU (*International Telecommunication Union*). Ten přinesl jednoduchý model pro výpočet ztrát šířením pro malé městské mikrobuňky v UHF pásmu pod označením ITU-R P.1411. Výpočet je rozdělen na dvě části. První je případ přímé optické viditelnosti mezi oběma konci spoje LOS a druhý pro případ nepřímé optické viditelnosti NLOS. Je velice podobný základnímu empirickému modelu a stejně jako Dual-Slope model nese všechny jeho výhody a nevýhody.

5.3.1.2 Výpočet pro přímou viditelnost (LOS)

Výpočet ztrát šířením pro přímou viditelnost vychází z Dual-Slope modelu. Výsledek výpočtu zahrnuje i typickou geometrii městské mikrobuňky a empirické parametry a je to interval, v němž se modelovaná hodnota ztrát nachází. Následující vztahy jsou převzaty z [1].

$$\begin{aligned}
 L_{\min}(d) &= L_{BP} + 20 \log \frac{d}{d_0} & d \leq d_0, \\
 L_{\min}(d) &= L_{BP} + 40 \log \frac{d}{d_0} & d > d_0, \\
 L_{\max}(d) &= L_{BP} + 20 + 25 \log \frac{d}{d_0} & d \leq d_0, \\
 L_{\max}(d) &= L_{BP} + 20 + 40 \log \frac{d}{d_0} & d > d_0,
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

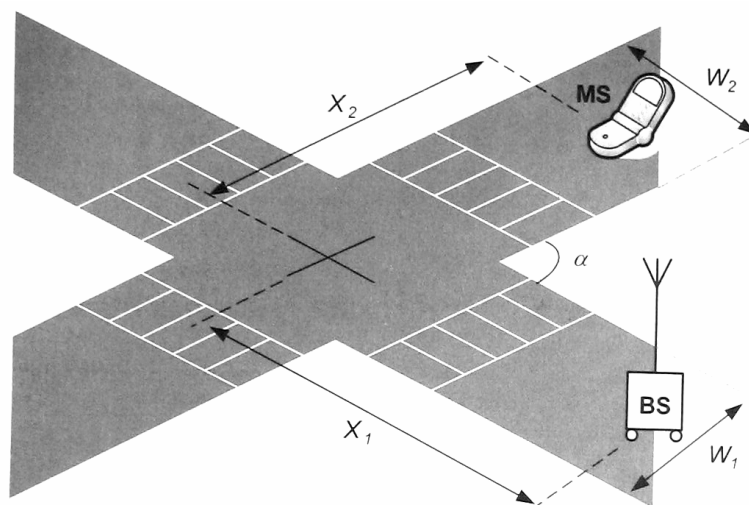
$$d_0 = \frac{4h_1h_2}{\lambda},$$

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

kde $L_{min}(d)$ je dolní mez střední hodnoty ztrát šířením (dB),
 $L_{max}(d)$ horní mez střední hodnoty ztrát šířením (dB),
 d vzdálenost (m),
 d_0 vzdálenost bodu zlomu (m),
 L_{BP} referenční hodnota ztrát (dB) v bodě zlomu,
 h_1, h_2 jsou výšky antén spoje (m),
 λ vlnová délka (m).

5.3.1.3 Výpočet pro nepřímou viditelnost (NLOS)

Na obrázku 5.8 je zobrazen základní případ zastínění přímé viditelnosti spoje, který model postihuje. Platnost tohoto modelu včetně vztahů (5.9) je pro pásmo 800-2000 MHz a jen v případě, že jsou antény základnové a mobilní stanice umístěny pod úrovní budov v mikrobuňce.



Obrázek 5.8: Model ITU-R P.1411 – základní geometrie při zastínění [1].

Střední hodnota ztrát šířením L (dB) je definována dle [1] následovně:

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

$$L_r = 20 \log(x_1 + x_2) + \frac{x_1x_2}{w_1w_2} \frac{3,86}{a^{3,5}} + 20 \log \frac{4\pi}{\lambda}, \quad (5.9)$$

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

kde L_r a L_d jsou činitele útlumu (dB) vyjadřující ztráty odrazy, resp. difrakcí,
 x_1, x_2 vzdálenosti (m) od středu křižovatky ke koncovým bodům spoje podle *obrázku 5.8*,
 w_1, w_2 šířky ulic (m) podle *obrázku 5.8*,
 α úhel (rad), který svírají ulice podle *obrázku 5.8* ($0,6 < \alpha < \pi$).

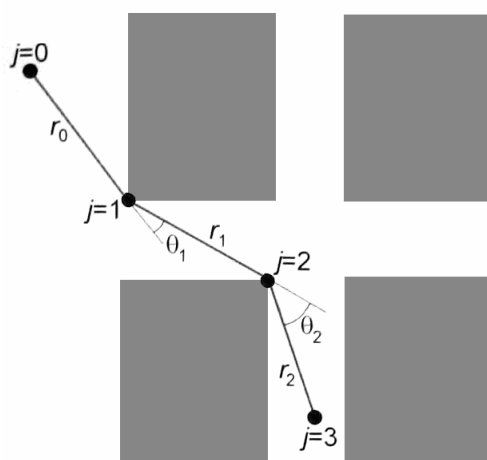
5.3.2 Bergův rekurzivní model

5.3.2.1 Použití

Bergův rekurzivní model je mezistupeň mezi empirickým a deterministickým modelem. Proto se jeví jako vhodný kompromis mezi výpočetní a časovou náročností a kvalitou výstupních dat. Slouží k predikci střední hodnoty ztrát šíření v městské mikrobuňce při nepřímé optické viditelnosti mezi základnovou a mobilní stanicí NLOS. Model vyžaduje 2D mapu zástavby. Respektuje tak reálné rozmístění zástavby, avšak nepotřebuje znalost o její výšce. Antény obou konců spoje musí splňovat požadavky pro mikrobuňku, musí tedy ležet bod úrovní nejvyšších střech a nad úrovní střední výšky střech.

5.3.2.2 Výpočet

Prvním úkolem tohoto modelu je najít nejkratší spojnici mezi základnovou a mobilní stanicí. Jednoduchý případ hledání nejkratší spojnice je na *obrázku 5.9*. Nejkratší spojnice je obvykle tvořena segmenty (r_0, r_1, r_2), mezi nimiž dochází k difrakci o vertikální hrany budov. Mezi jednotlivými segmenty spoje jsou vytvořeny uzly ($j = 0, 1, 2, 3$). Uzly nemusí ležet pouze na hranách budov, ale i v průsečících ulic nebo v pravidelných intervalech podél trasy šíření.



Obrázek 5.9: Princip Bergova rekurzivního modelu [1].

Vztah (5.10) převzatý z [1] nám definuje skutečnou délku segmentované spojnice od umístění základnové stanice až do n -tého uzlu spoje.

$$d_n = \sum_{j=1}^n r_{j-1}, \quad (5.10)$$

kde d_n je délka spojnice (m) z 0-tého do n -tého uzlu,
 r_j délka segmentu (m) mezi uzly s indexy j a $j+1$.

Dále je našim úkolem vypočítat fiktivní vzdálenost segmentové spojnice od nultého uzlu (místo základnové stanice) až k j -tému uzlu, kde $j > 0$. Výpočet je dán dle [1] následujícími rekurzivními vztahy:

$$k_j = k_{j-1} + D_{j-1} \left(\frac{\theta_j q}{90} \right)^v, \quad (5.11)$$

$$D_j = k_j r_{j-1} + D_{j-1}, \quad (5.12)$$

kde D_j je fiktivní délka spojnice z počátku (pevná anténa) do j -tého uzlu (m),
 r_j délka segmentu (m) mezi uzly s indexy j a $j+1$,
 θ_j úhel změny směru spojnice v j -tém uzlu ($^\circ$), viz *obrázek 5.9*,
 q empirický parametr modelu, doporučená hodnota $q = 0,5$,
 v empirický parametr modelu, doporučená hodnota $v = 1,5$.

Inicializační hodnoty pro výpočet jsou:

$$k_0 = 1, D_0 = 0.$$

Pro predikci útlumu je rozhodující právě fiktivní délka spojnice D_j . Ta je vždy mnohokrát delší než součet reálných délek všech segmentů d_j , a to tolikrát více, čím více a častěji lomená spojnice mění v uzlech svůj směr. Tento fakt nám říká, že s rostoucí vzdáleností, rostoucím počtem difrakcí a vyššími změnami úhlu mezi jednotlivými spojniciemi nám bude hodnota predikovaného útlumu narůstat.

Ztráty šířením vycházejí dle [1] ze vztahů pro Dual-Slope model aplikovaným na fiktivní délku spoje se spádovými koeficienty 2 a 4, které odpovídají spádovým koeficientům před a za Fresnelovým zlomem.

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi D_N}{\lambda} \right) \quad d_N \leq d_0, \quad (5.13)$$

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi D_N d_N}{\lambda d_0} \right) \quad d_N > d_0,$$

kde L jsou celkové ztráty šířením (dB),
 N index posledního uzlu (v místě mobilní antény),
 D_N fiktivní délka do N -tého uzlu (m),
 d_N skutečná délka lomené spojnice do N -tého uzlu (m),
 d_0 vzdálenost bodu zlomu (m).

$$d_0 = \frac{4h_1h_2}{\lambda}, \quad (5.14)$$

kde h_1, h_2 jsou výšky antén spoje (m),
 λ vlnová délka (m).

Pokud chceme vypočítat ztráty v dané mikrobuňce orientačně a nemáme k dispozici výšky antén, můžeme volit v okolí 2 GHz vzdálenost bodu zlomu $d_0 = 300$ m.

5.3.3 COST 231 Walfish-Ikegami model

5.3.3.1 Použití

Jedná se o semi-empirický model čili podobně jako Bergův rekursivní model je mezistupněm mezi empirickým a deterministickým přístupem. Vychází z principů šíření elektromagnetické vlny v makrobuňce, ale je upraven pro městskou zástavbu mikrobuňky. Vznikl spojením dvou modelů v rámci projektu COST, jehož autory jsou J. Walfisch a F. Ikegami, odtud název COST 231 Walfish-Ikegami model. Jeho použití obvykle vyžaduje znalost výšek budov, jelikož je založen na mnohonásobné difrakci o hrany střech.

5.3.3.2 Výpočet

U výpočtu difrakce se používá empirické přiblížení, viz. [1] a [2]. Situace pro tento model je znázorněna na obrázku 5.10. Zástavba je aproximována identickými bloky o výšce h_r (m) s pravidelnými odstupy b (m). Šířka ulic mezi bloky je w (m). Výška pevné, resp. mobilní antény (m) je h_b , resp. h_m . K dispozici musíme mít i pohled shora, viz. obrázek 5.11, kde úhel φ (°) označuje orientaci ulice s mobilní anténou vzhledem k mobilnímu spoji. Výpočet je opět rozdělen na dvě úlohy. První se zabývá přímou optickou viditelností LOS a druhá nepřímou optickou viditelností NLOS.

Výpočet ztrát při přímé viditelnosti mezi oběma konci spoje dle [1]:

$$L = 42,6 + 26 \log d + 20 \log f, \quad (5.15)$$

kde L je celkový střední útlum šířením (dB),
 d vzdálenost (km) mezi anténami ($d > 0,02$ km),
 f frekvence (MHz).

Výpočet ztrát při neexistenci přímé viditelnosti mezi oběma konci spoje dle [1]:

$$L = FSL(d) + L_{msd} + L_{rts}, \quad (5.16)$$

kde $FSL(d)$ jsou tzv. ztráty volným prostorem (dB) pro vzdálenost d ,
 L_{msd} ztráty (dB) způsobené mnohonásobnou difrakcí vlny na střechách bloků mezi pevnou a mobilní anténou,

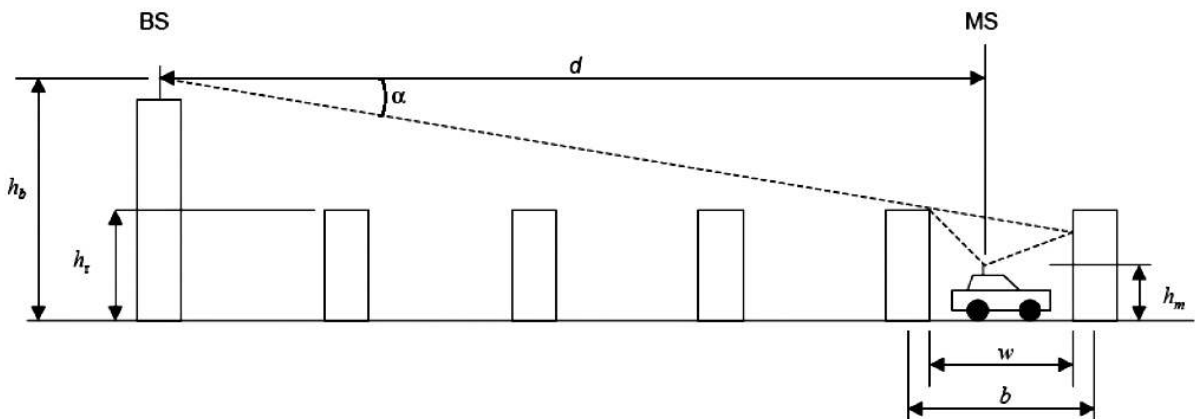
L_{rts} ztráty (dB) vzniklé difrakcí na hraně střechy posledního bloku u mobilní antény.

V případě, že $L_{msd} + L_{rts} < 0$, je $L = FSL(d)$ a dle [1] platí:

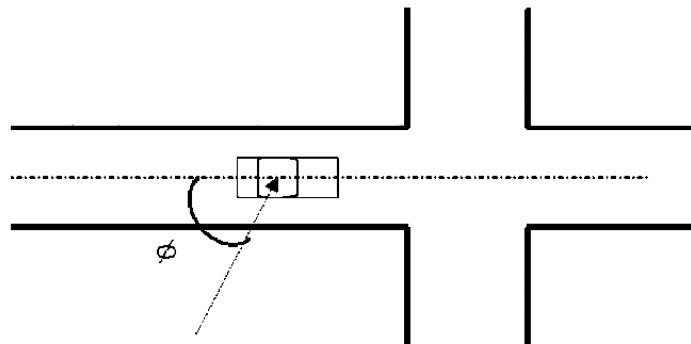
$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b, \quad (5.17)$$

kde

L_{bsh}	$= -18(1 + h_b - h_r)$	pro $h_b > h_r$,
	$= 0$	pro $h_b \leq h_r$,
k_a	$= 54$	pro $h_b > h_r$,
	$= 54 - 0,8(h_b - h_r)$	pro $h_b \leq h_r$ a $d \geq 0,5 \text{ km}$,
	$= 54 - 1,6d(h_b - h_r)$	pro $h_b \leq h_r$ a $d < 0,5 \text{ km}$,
k_d	$= 18$	pro $h_b > h_r$,
	$= 18 - 15(h_b - h_r) / h_r$	pro $h_b \leq h_r$,
k_f	$= -4 + 0,7(f / 925 - 1)$	pro předměstí a středně velká města,
	$= -4 + 1,5(f / 925 - 1)$	pro metropolitní centra (hustou zástavbu).



Obrázek 5.10: Princip modelu Walfish-Ikegami [13].



Obrázek 5.11: Princip modelu Walfish-Ikegami při pohledu shora [13].

a dále dle [1]:

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log(h_r - h_m) + L_{ori}, \quad (5.18)$$

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

Opět podobně jako u Bergova rekurzivního modelu můžeme v případě, že podrobně neznáme informace o zástavbě, použít následující parametry, které nám zavádějí do modelu částečné zjednodušení:

$$\begin{aligned} h_r &= (3\text{m} \times \text{počet podlaží}) + (3\text{m pro sedlové střechy, } 0\text{m pro rovné střechy}), \\ 20\text{m} &< b < 50\text{m}, \\ w &= b/2, \\ \varphi &= 90^\circ. \end{aligned}$$

Platnost Walfish-Ikegami modelu je omezena následovně:

$$\begin{aligned} 800 \text{ MHz} &< f < 2000\text{MHz}, \\ 4 \text{ m} &< h_b < 50 \text{ m}, \\ 1 \text{ m} &< h_m < 3 \text{ m}, \\ 200 \text{ m} &< d < 5 \text{ km}. \end{aligned}$$

5.3.4 Optické modely

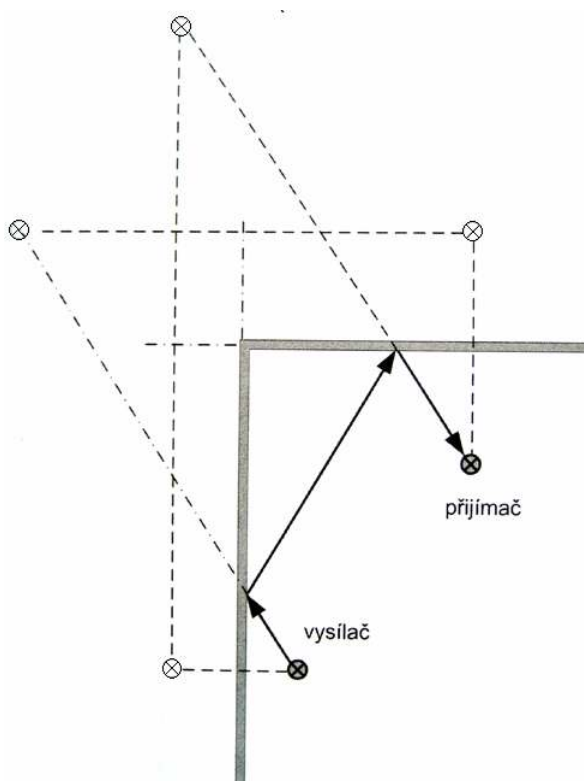
Optické modely zastupují deterministický přístup. Vychází přímo z fyzikální podstaty šíření elektromagnetické vlny a její vzájemné interakce se zástavbou. Je tedy zřejmé, že optické modely naleznou uplatnění především v mikrobeuňkách popř. pikobeuňkách, kde už jsou jednodušší empirické či semi-empirické modely nedostačující. S rostoucími požadavky na výstup deterministických modelů však roste i jejich výpočetní a časová náročnost. Odměnou je zato přesná predikce ztrát šířením nebo např. i širokopásmové parametry.

U optických modelů je šíření elektromagnetické vlny aproximováno paprsky. Tento paprskový přístup je podobný z optiky, proto používáme název Optické modely. Požadavkem jsou mnohonásobně větší velikosti objektů (budov) než je vlnová délka. Toto kritérium je v mikrobeuňkovém prostředí obvykle splněno.

Příklad paprskového šíření elektromagnetické vlny byl již popsán např. v kapitolách 5.2.2 a 5.2.3. Na obrázku 5.4 se jednalo o případ přímé viditelnosti mezi oběma konci spoje, kde se paprsek šíří přímo nebo odrazy od budov a o zem. Počet paprsků je prakticky nekonečný. Mnohem složitější je predikce ztrát v případě nepřímé optické viditelnosti NLOS, kdy vstupují do výpočtu i mnohonásobné difrakce o vertikální hrany budov a střech, popř. i průchod interiérem atd. S rostoucími odrazy, ohyby a průchody energie elektromagnetické vlny klesá. V praxi je proto třeba volit umístění pevných antén základnových stanic s uvážením těchto vlivů.

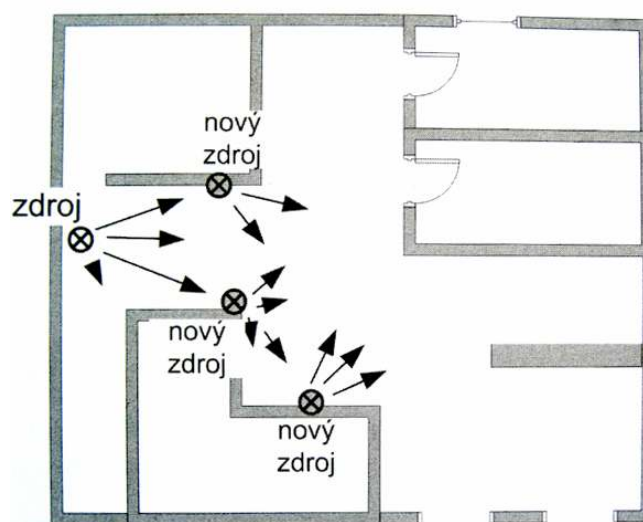
Pro výpočet modelu je nutné v místě příjmu sečíst paprsky (energii) ze všech významných cest. Sečítání musíme provádět komplexně i vektorově, čili každý příspěvek je dán polarizací (směrem), amplitudou a fází. Mezi významné cesty se zahrnují obvykle ty, které podstoupily maximálně pěti až šesti odrazy a jednou difrakcí. Tyto pak pro výpočet modelu nesou do místa příjmu nezanedbatelný přírůstek energie. Nalezení významných paprsků je obvykle velmi složité, více v [1],[2] a [10]. K tomuto účelu se používají dvě metody:

- **Ray-tracing** – metoda sledování paprsků, mezi pevnou a mobilní anténou jsou analyticky nalezeny všechny možné paprsky. K tomuto účelu se používá např. metoda zrcadlení, viz. obrázek 5.12.



Obrázek 5.12: Princip metody Ray-tracing [2].

- **Ray-launching** – Princip vystřelování několika paprsků od zdroje. Paprsky jsou vystřelovány pod určitým úhlem. Pokud paprsek dopadne, stává se novým zdrojem vystřelování. Vystřelování končí v okamžiku, kdy jsou v místě příjmu sečteny všechny paprsky, které sem dopadají. Princip této metody je zobrazen na obrázku 5.13. Metoda Ray-launching je často označována jako nepřímá metoda Ray-tracingu.



Obrázek 5.13: Princip metody Ray-launching [2].

Metodou Ray-tracing nalezneme vždy všechny paprsky mezi oběma konci, avšak metoda Ray-launching má problémy s nalezením všech difrakcí paprsků. Pro obě metody je důležitá přesná znalost geometrie objektů.

6 Modely pro pikobuňky a makrobuňky

Jelikož se máme v této práci zabývat především vlastnostmi modelů v mikrobičkách, bude zde problematika modelů pro ostatní typy buněk pouze nastíněna. Více v [1] a [2].

6.1 Modely pro pikobuňky

6.1.1 One-Slope model

One-Slope model je empirickým modelem pro predikci v pikobuňkách. Výpočetně je velmi jednoduchý, takže je efektivní pro rychlé a časově nenáročné výpočty. Výsledky predikce však musíme považovat pouze za orientační. Je nutné zaměřit se převážně na volbu empirických parametrů. Při použití jedné sady parametrů získáme predikované úrovně signálu v kruhových konturách. To je způsobeno tím, že One-Slope model uvažuje ztráty šířením resp. úroveň signálu pouze jako funkci vzdálenosti. Výhody a nevýhody tohoto modelu jsou totožné se základním empirickým modelem, viz. kapitolu 5.1.1.

6.1.2 Model ITU-R P.1238

Tento model byl standardizovaný ITU-R a vychází z One-Slope modelu. Rozdíl je v klasifikaci typu prostředí, způsobu vyjádření referenčního útlumu a zahrnutí šíření elektromagnetické vlny mezi podlažími. Díky tomu jsou výsledky predikce nepatrně přesnější než u One-Slope modelu. Jinak jsou parametry výpočtu totožné.

6.1.3 Multi-Wall model

Multi-Wall model patří do skupiny semi-empirických modelů, které jsou vhodným kompromisem mezi empirickým a deterministickým přístupem. Uvažují geometrii interiéru a přitom nejsou tak náročné na čas i výpočet jako deterministické modely. Jelikož však potřebují znalost typu a rozmístění jednotlivých příček na patře, nejsou tak jednoduché jako prosté empirické modely. Multi-Wall model je však nedostačující pro predikci v dlouhých chodbách, neumí totiž modelovat jejich vlnovodový efekt.

6.2 Modely pro makrobuňky

6.2.1 Hatův model

Jedná se o jeden z nejstarších a nejrozšířenějších modelů pro predikci šíření elektromagnetické vlny v městské makrobuňce. Byl vytvořen v Tokiu na základě mnoha měření a postupně upravován pro potřeby jiných měst. Jedná se o jednoduchý aproximovaný empirický model.

6.2.2 Lee model

Jedná se o vylepšení Hatova modelu pro predikci šíření v městské makrobuňce. Taktéž je založený na základním empirickém modelu. Jeho predikce je nepatrně přesnější než u Hatova modelu vzhledem k tomu, že uvažuje i korekci pro nerovný terén. Korekce je uvažována v případě, kdy se mezi spojnicí pevné a mobilní antény objeví překážka. Model je upraven pro frekvenční pásmo 800/900 MHz.

Veškeré modely jsou podrobně popsány v literatuře [1]. Jsou často modifikovány pro potřeby konkrétního prostředí a konkrétních požadavků. Většina z nich je upravována pro konkrétní městskou zástavbu a interiéry, ve které se má daná predikce provádět.

7 Návrh pro predikci úrovně elektromagnetického pole v mikrobuňce

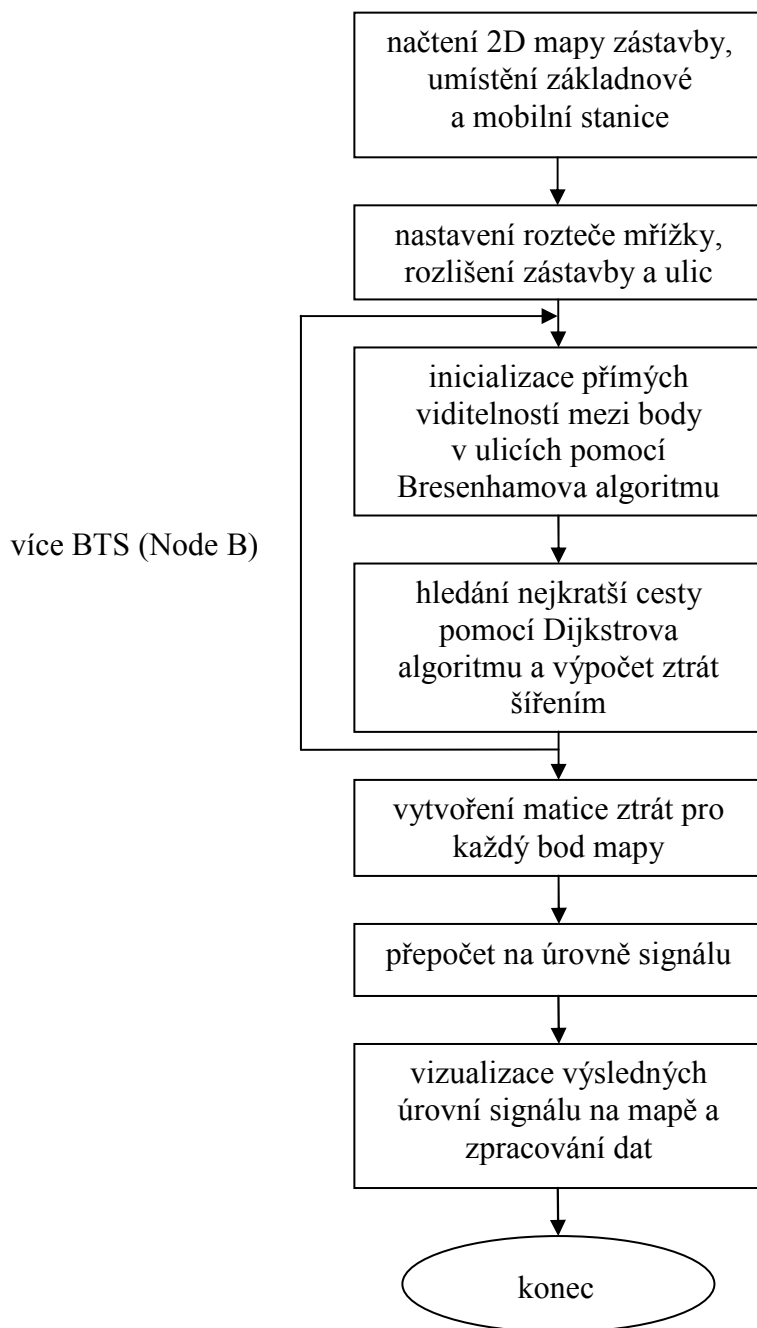
7.1 Cíle práce

Cílem této práce je nastínit uživateli konkrétní způsob šíření vlny v mikrobuňce a vytvoření programu pro predikci šíření elektromagnetické vlny a výpočet ztrát šířením resp. úrovně signálu v městské zástavbě. Pro tento účel je důležité vybrat vhodný model. Dle celkového rozboru modelů nejen pro mikrobuňky jsme se dozvěděli, že nejprostší empirické modely patří v praxi k nejpoužívanějším díky své nenáročnosti nejen na výpočetní prostředky a čas, ale především na vstupní data. Výstupní data jsou však v praxi často nedostačující. Deterministické modely jsou naopak náročné právě vzhledem k velkým požadavkům na vstupní data. Získání těchto dat je často zdlouhavé a finančně náročné. Stejně tak zdlouhavý a náročný je i výpočet. Výsledkem je ale přesnější predikce šíření vlny, vysoká přesnost výpočtu útlumu šíření vln nebo např. přesné hodnoty širokopásmových parametrů. Vzhledem k těmto úvahám je vhodné přikročit k jakémusi kompromisu mezi empirickým a deterministickým přístupem. Jako nejvhodnější volba se nabízí Bergův rekurzivní model. Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.4.2, Bergův rekurzivní model je určen pro predikci střední hodnoty ztrát šíření v městské mikrobuňce při neexistenci přímé viditelnosti (NLOS) mezi oběma konci spoje tj. kdy není možné použít jednoduchý empirický model. Obě antény musejí být umístěny pod úrovní střech. Model vyžaduje 2D plán zástavby a výpočet tak respektuje konkrétní členění zástavby v mikrobuňce. Výpočet střední hodnoty ztrát je výhodný pro určování pokrytí daného území signálem. Toto využijeme při tvorbě našeho programu.

Po výběru vhodného modelu přistoupíme k realizaci samotného programu. Klademe si za cíl vytvořit program, který na jednotlivých místech reálné mapy městské mikrobuňky vypočítá úroveň výkonu signálu v ulicích. To je založeno na vysílání pilotního signálu tzv. „beacon“ z BTS, který je vysílán periodicky s konstantním výkonem. Předpokladem bude libovolné umístění jedné nebo více základnových stanic a mobilní stanice. Musíme však dodržet zásadu pro výšky antén v mikrobuňkách, které musí ležet pod úrovní střech zástavby. Vypočtená data budou poté vyobrazena graficky. To je velmi výhodné, jelikož grafické znázornění pokrytí území signálem nám umožní efektivní plánování rozmístění základnových stanic. Pro přehlednost bude vytvořeno uživatelské prostředí (GUI), kde bude možnost načtení dané mapy zástavby, možnost rozmístění základnových stanic a mobilní stanice, volba systému GSM 900, GSM 1800 nebo UMTS, volba výšek umístění antén, frekvence a vysílacího výkonu základnové stanice atd.

7.2 Návrh v prostředí Matlab

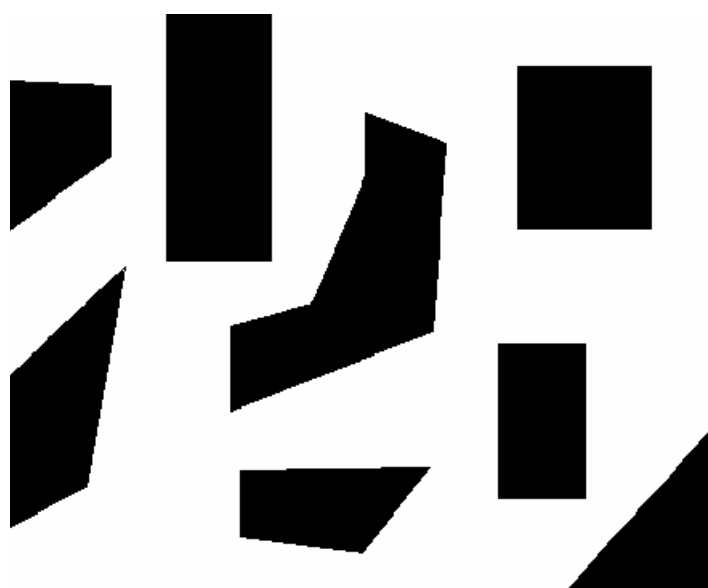
Návrh Bergova rekurzivního modelu pro predikci šíření elektromagnetického pole v mikrobuňkách budeme realizovat v prostředí Matlab ve verzi 7.1. Samotný model je efektivní v tom, že vyžaduje pouze 2D plán zástavby. Další parametry jako jsou například výška umístění antén základnové a mobilní stanice, vysílací výkon základnové stanice atd. jsou parametry volitelné. Úmyslně budeme používat pojem základnová stanice, jelikož se může jednat jak o BTS systému GSM, tak i Node B systému UMTS. Vývojový diagram programu je naznačen na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1: Algoritmus pro predikci úrovně elektromagnetického pole v mikrobuňce.

7.2.1 Načtení 2D mapy zástavby, umístění základnové a mob. stanice

Jak už bylo naznačeno výše, předpokladem pro predikci šíření signálu v mikrobuňce je znalost rozmístění zástavby a ulic. Pro náš program je nutné, abychom získaly 2D mapu zástavby, čili pohled na budovy a ulice musí být shora. Výsledkem tedy bude informace o tvaru a velikosti zástavby a ulic, což je z hlediska vstupních dat nenáročné a výhodné. Složité deterministické modely často vyžadují znalost výšek jednotlivých budov, členitosti terénu, hustoty dopravy v ulicích atd. Získání těchto informací by bylo daleko komplikovanější. Mapu je nutno převést do jednobitového formátu, kde budovy budou znázorněny černou barvou a ulice bílou. Jednobitovým formátem se myslí obraz pouze se dvěma barvami (černá a bílá). Nevyskytují se zde jejich odstíny a ani kombinace barev RGB. Jako testovací mapu zvolíme tu, která je znázorněna na obrázku 7.2.



Obrázek 7.2: Testovací mapa zástavby.

Mapa může mít libovolné rozměry, avšak pro potřeby našeho zobrazování bude převedena na rozměry 361x441 pixelů. Každý rozměr má na posledním místě číslo 1. Skutečnost proč tomu tak je bude vysvětlena v kapitole 7.2.2.

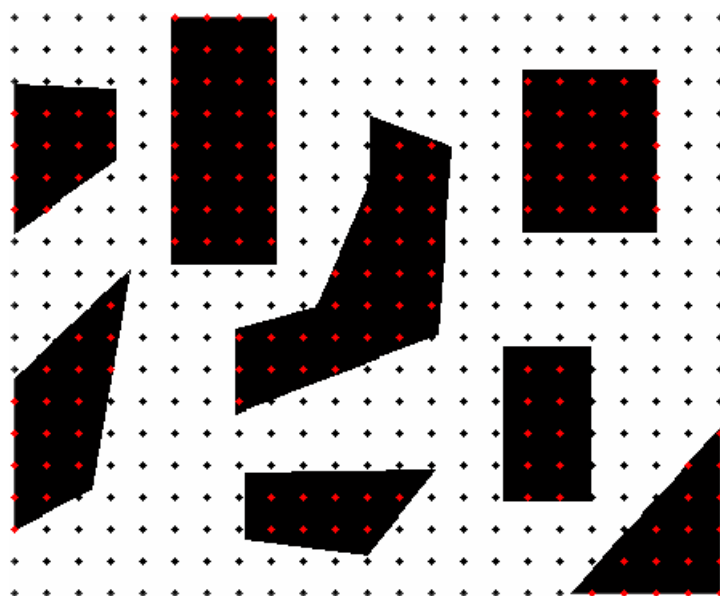
Tato kapitola si klade za cíl vysvětlit a názorně vyobrazit podstatu jednotlivých kroků výpočtu, proto nám bude stačit, když si je vysvětlíme na této mapě a nikoliv na komplikované mapě reálné zástavby. Kompletní algoritmus bude poté testován i na mapě reálné mikrobuňky. Taktéž je zde zbytečné vypisovat a komentovat celý kód z prostředí Matlab. Cílem je nastínění postupu predikce, který by poté mohl být implementován do libovolného programovacího prostředí.

Máme tedy načtenou mapu o daných rozměrech. Nyní je třeba zvolit umístění základnové stanice. Základnová stanice bývá v mikrobuňkách obvykle umístěna pod úroveň nejvyšších budov, často na stěně budovy. Proto náš program nepředpokládá umístění přímo na střeše budovy. Základnovou stanici budeme tedy umísťovat do bílé plochy testovací mapy a to buď přímo do ulic nebo na rozhraní budova – ulice, což by znázorňovalo právě stěnu dané budovy. Mobilní stanici umístíme taktéž do ulice. Pokud bychom uvažovali mobilní stanici uvnitř budovy, museli bychom se zaměřit také na predikci šíření v pikobuňkách, což už předmětem této práce není. Umístění mobilní stanice je ve své podstatě pro tento program nepodstatné, jelikož dochází k výpočtu ztrát šířením resp. úrovní signálu pro každé místo

mapy včetně polohy umístění mobilní stanice. Její poloha resp. souřadnice pixelu, kde se na mapě nachází, jsou potřebné pouze pro finální informaci případnému uživateli. Pokud je základnová nebo mobilní stanice umístěna do místa zástavby, uživatel je programem upozorněn a musí polohu změnit.

7.2.2 Nastavení rozteče mřížky, rozlišení zástavby a ulic

V této části programu si nejprve musíme vysvětlit pojem rozteč mřížky. Bitmapa se zástavbou obsahuje 361x441 pixelů. Nejžádanější by byla skutečnost vypočítat ztráty šířením resp. úroveň signálu pro každý pixel mapy samostatně. To by však bylo hardwarově i časově velice náročné. Uživatel si bude moci zvolit rozteč mřížky 5, 10 nebo 20 pixelů. To znamená, že se ztráty resp. úroveň signálu budou počítat pro každý pátý, desátý nebo dvacátý pixel mapy v obou směrech (x i y). S klesající hodnotou rozteče mřížky nám sice exponenciálně roste časová i hardwarová náročnost, ale taktéž nám exponenciálně roste přesnost výpočtu. Volbu rozteče mřížky musíme vhodně uvážit. Pro naši testovací mapu plně postačuje hodnota rozteče 20, jelikož je vyobrazena pouze část mikrobičky a velikost budov v mapě je tedy větších rozměrů. Avšak pokud budeme sledovat podrobnou reálnou zástavbu, budovy na mapě budou menších rozměrů, a proto musíme volit hodnotu rozteče mřížky menší. Rozlišení zástavby a ulic s nastavenou roztečí mřížky 20 pixelů je znázorněno na obrázku 7.3.



Obrázek 7.3: Rozlišení zástavby a ulic.

Jak je na obrázku 7.3 vidět, body mřížky, které spadají do zástavby jsou označeny červeně a body v ulicích černě. První bod mřížky má souřadnice (1,1). Matlab neumí pracovat s nulovou hodnotou řádku a sloupce. Rozměry mapy musí být dělitelné zadanou hodnotou rozteče mřížky, ale právě kvůli počátečním souřadnicím (1,1) musí být v každém směru zvětšeny o 1. Proto jsou rozměry mapy voleny 361x441 a ne 360x440. Všechny body spadající mimo zástavbu jsou uloženy do matice tak, že první sloupec matice obsahuje ID uzlu (1 až n), druhý a třetí sloupec obsahuje číslo řádku resp. sloupce daného bodu.

7.2.3 Inicializace přímých viditelností mezi body v ulicích pomocí Bresenhamova algoritmu

V tomto výpočetním kroku hledáme pro každý bod mřížky ležící mimo zástavbu body, na které má přímou optickou viditelnost. Toto je prováděno pomocí tzv. Bresenhamova algoritmu pro kreslení úsečky. Mezi body, pro které se kontroluje přímá viditelnost, vytvoříme úsečku a taktéž využijeme rovnice přímky, na níž body leží

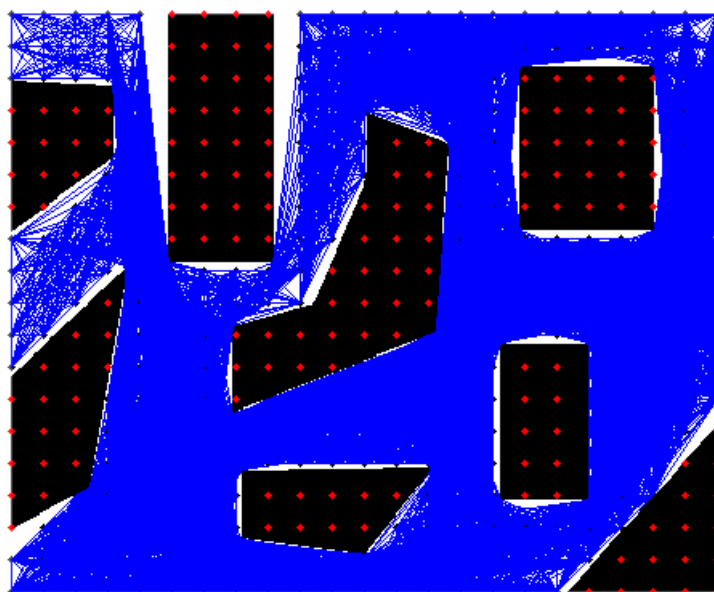
$$y = k \cdot x + q. \quad (7.1)$$

Ze znalosti souřadnic obou bodů úsečky a úpravou vztahu 7.1 zjistíme směrnici přímky k a q .

$$k = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}, \quad (7.2)$$

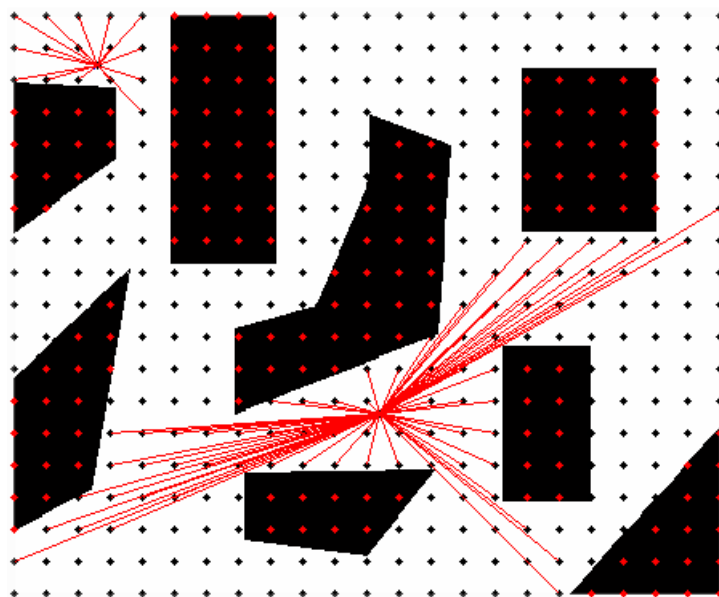
$$q = y_1 - k \cdot x_1. \quad (7.3)$$

Pixel po pixelu virtuálně vykresluje úsečku a kontrolujeme, zda-li aktuální pixel spadá do zástavby či nikoliv. Pokud se tak stane, vykreslování úsečky se přeruší a přejde se k dalšímu bodu mřížky. Výsledkem je matice přímých optických viditelností pro každý bod mřížky spadající mimo zástavbu. Řádek této matice definuje ID bodu mřížky a ve sloupcích jsou uloženy souřadnice bodů, na které přímou viditelností vidí. Nesmíme však zapomenout, že je třeba vyhledat přímé viditelnosti i mezi základnovou resp. mobilní stanicí a body mřížky. Na obrázku 7.4 jsou vykresleny všechny spojnice přímých optických viditelností mezi body mřížky.



Obrázek 7.4: Přímé optické viditelnosti mezi body mřížky.

Na obrázku 7.5 je zobrazen dodatečný výpočet přímých optických viditelností mezi základnovou resp. mobilní stanicí a vhodnými body mřížky.

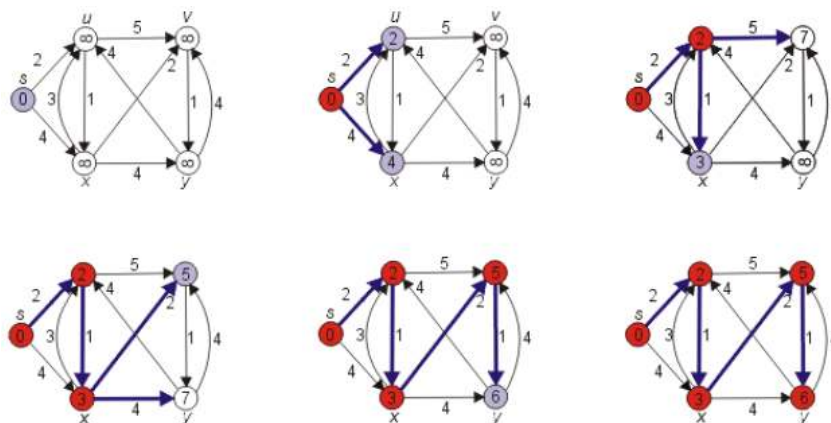


Obrázek 7.5: Přímé optické viditelnosti mezi základnovou resp. mobilní stanicí a body mřížky.

U této části výpočtu se poprvé setkáváme s velkým neduhem prostředí Matlab a tím je dlouhý výpočetní čas při zpracovávání smyček cyklů. Hledání přímých viditelností je při volbě malé rozteče mřížky místy velmi zdoluhavé. Časová náročnost souvisí také s tím, kolik bodů mřížky spadá právě mimo zástavbu. Čím více bodů mřížky leží mimo zástavbu, tím více se nám prodlužuje délka výpočtu.

7.2.4 Hledání nejkratší cesty pomocí Dijkstrova algoritmu a výpočet ztrát šířením

Jak je patrné z obrázku 5.9, podle Bergova rekurzivního modelu dochází při šíření signálu od základnové k mobilní stanici k difrakci (ohybu) o rohy zástavby. Taktéž platí, že se signál bude šířit právě nejkratší cestou. K nalezení nejkratší cesty mezi základnovou a mobilní stanicí použijeme Dijkstrův algoritmus.

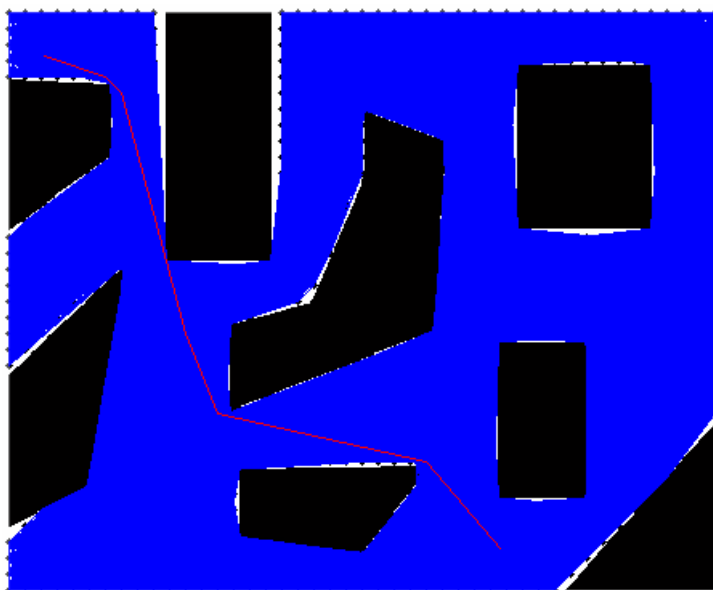


Obrázek 7.6: Provedení Dijkstrova algoritmu [9].

Je třeba poznamenat, že je našim cílem zjistit ztráty resp. úroveň signálu pro všechny body mřížky. Proto nehledáme nejkratší spojnici pouze mezi základnovou a mobilní stanicí,

ale i pro základnovou stanici (označíme bod A) a všechny body mřížky v ulicích (body B). Provedení Dijkstrova algoritmu je zobrazeno na obrázku 7.6. Podrobnější informace nalezneme v [11].

V našem programu je pro tento algoritmus stěžejní znalost přímých optických viditelností pro všechny body mřížky v ulicích. Algoritmus začne v místě základnové stanice, bodu A, a zjistí všechny spojnice, které z něj přímou optickou viditelností vedou. Pro každou tuto spojnici je vypočítána její délka, která je uložena k jejímu koncovému bodu. Tento se pak stává novým bodem našeho zájmu. Původní bod zájmu je vymazán a v případě, že se k němu algoritmus později dostane, nebude se již znovu počítat. Od nového bodu zájmu se opět hledají spojnice na přímou optickou viditelnost a k nim je opět přiřazena vzdálenost, avšak nyní prodloužená o délku k předcházejícímu bodu zájmu. Pokud se v budoucnu k danému bodu dostane algoritmus kratší cestou, délka původní cesty se přepíše. Tento postup se opakuje tak dlouho, dokud není aktuálním bodem zájmu bod B. Příklad nejkratší cesty mezi základnovou a mobilní stanicí je na obrázku 7.7. Zde byla zvolena rozteč mřížky 10 pixelů. Z obrázku je patrné, že nedochází k ideální difrakci o rohy zástavby. To je způsobeno tím, že cesta vede po jednotlivých bodech mřížky a ty jsou od sebe v tomto případě vzdáleny právě 10 pixelů. V ideálním případě, kdy by byla rozteč mřížky nastavena na 1 pixel, by docházelo k ideální difrakci o rohy zástavby. Takto jemnou mřížku však není možné zvolit vzhledem k výpočetním nárokům. Získáme tedy částečně aproximovaný model. Jedná se jen o hledání vhodného kompromisu mezi přesností výpočtu a časovými resp. hardwarovými nároky celého procesu.



Obrázek 7.7: Nejkratší cesta vypočtena pomocí Dijkstrova algoritmu.

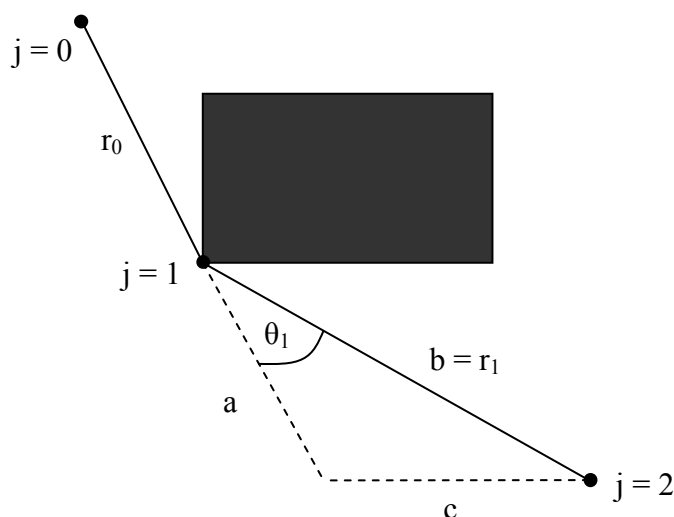
Pokud máme vypočtenou nejkratší cestu mezi body A a B, musíme si o této cestě poznamenat pár důležitých parametrů. Ty nám poslouží k výpočtu ztrát šířením v místě B. Jak je popsáno v kapitole 5.3.2.2, pro výpočet ztrát pomocí Bergova rekurzivního modelu potřebujeme znát délku jednotlivých segmentových spojníc mezi uzly cesty r_j a úhly změny směrů spojníc v j -tých uzlech θ_j . Pro nás bude tedy velice užitečné vytvořit si matici o $n+m$ řádcích, kde n je počet bodů mřížky v ulicích a řádky o m prvcích budou reprezentovat uzly základnových a mobilní stanice. Každý řádek matice bude reprezentovat ID uzlu, pro který budeme počítat ztráty šířením a ve sloupcích budou obsaženy ID uzlů, přes které segmentová spojnice směřuje. První sloupec samozřejmě obsahuje ID základnové stanice, od které se

výpočet provádí, a poslední ID koncového bodu. Tento je tedy totožný s číslem řádku. Velmi komplikovaným krokem je určování úhlu změny směru spojnice. K tomuto účelu musíme vytvořit samostatný skript, který postihne všechny možnosti změny úhlu při šíření signálu. Po vytvoření virtuálního trojúhelníku mezi uzly, viz. obrázek 7.8, můžeme s využitím Kosinové věty vypočítat velikost změny úhlu mezi danými spojnicemi.

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos \theta_1, \quad (7.4)$$

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}\right) \quad [rad]. \quad (7.5)$$

Na vztahu vidíme, že je třeba využít cyklometrickou funkci arkus kosinus, která je inverzní ke goniometrické funkci kosinus.



Obrázek 7.8: Vytvoření virtuálního trojúhelníku pro výpočet změny úhlu.

Podle vztahů (5.13) poté vypočteme ztráty šířením ve všech bodech mřížky a navíc v místě mobilní stanice. Opět vytvoříme matice, kde číslo řádku bude reprezentovat ID uzlu mřížky a ve sloupci bude obsažena hodnota ztrát šířením. Cílem této práce však není vyjádření ztrát šířením v jednotlivých oblastech mikrobuňky, nýbrž úroveň signálu, proto musíme ztráty na úroveň přepočítat. Předpokladem je znalost vysílacího výkonu základnové stanice. Tu si bude moci uživatel zvolit manuálně. Výkonové úrovně systému GSM jsou uvedeny v tabulce 7.1.

Tabulka 7.1: Výkonové úrovně systému GSM [7].

Třída	Max. výkon MS		Max. výkon BTS	
	dBm	W	dBm	W
1	43	20	55	320
2	39	8	52	160
3	37	5	49	80
4	33	2	46	40
5	29	0,8	43	20
6			40	10
7			37	5
8			34	2,5

Podle [7] má mobilní stanice definován jako minimální vysílaný výkon 20 mW (13dBm). Ve specifikaci GSM Phase2 došlo k definici mikro a piko buněk pro městské prostředí, které mají definovány výkonové úrovně v tabulce 7.2. Minimální výkon MS je 2,5 mW.

Tabulka 7.2: Výkonové třídy pro specifikaci mikro a piko buněk [7].

Třída	Max. výkon BTS	
	dBm	W
M1	24	0,25
M2	19	0,08
M3	14	0,03

Vysílací výkon Node B pro běžné mikrobuňky mívá hodnotu kolem 5W čili zhruba 37 dBm. Více o problematice výkonu pro GSM i UMTS se dozvíme v [3] a [7].

7.2.5 Vytvoření matice ztrát pro každý bod mapy

Pro vizualizaci ztrát resp. úrovní signálu potřebujeme znát hodnoty ztrát šířením nejen pro body mřížky, ale pro každý pixel na mapě. Ztráty jsou však vypočteny pouze pro body mřížky v ulicích. Čili prvním úkolem je zjištění ztrát v bodech mřížky spadající do zástavby. Toto provedeme postupným procházením matice mapy po řádcích a sloupcích s krokem rovným velikosti rozteče mřížky. Pokud nastane případ, kdy spadá pixel do zástavby, ve všech osmi okolních směrech (vlevo, vpravo, nahore, dole a v diagonálních směrech) od něj se naleznou body mřížky a provede se průměr hodnot jejich ztrát. Do tohoto průměrování se však započítají pouze body mimo zástavbu, jelikož ostatní nenesou žádnou informaci. Musíme ošetřit případy, kdy se bod nachází na okraji mapy. Na okrajích nebude směrů osm, ale pět. V rozích mapy dokonce pouze tři. Pokud ve všech směrech neexistuje takový bod mřížky, který leží v ulici, čili takový, který nese údaj o hodnotě ztrát, poté je danému pixelu přiřazena nekonečná hodnota ztrát šířením. Tímto se ošetří výpočet ztrát v místě zástavby při rozhraní zástavba – ulice. Body uvnitř budov s nekonečnou hodnotou ztrát jsou pro nás v rámci grafického vykreslování nepodstatné, jelikož se zabýváme pouze pokrytím v ulicích.

Nyní již máme vytvořenu matici ztrát šířením pro všechny body mřížky. Podle nastavené rozteče má tato matice následující rozměry

$$r = \frac{r_m - 1}{n} + 1 \quad [\text{pix}],$$

$$s = \frac{s_m - 1}{n} + 1 \quad [\text{pix}],$$
(7.6)

kde

r, s – je počet řádků resp. sloupců vytvořené matice,
 r_m, s_m – je počet řádků resp. sloupců použité mapy se zástavbou,
 n – hodnota rozteče mřížky.

S nastavenou roztečí např. $n = 5$ bychom dostali matici o rozměrech 73x89. Poté můžeme přistoupit k výpočtu hodnot pro ostatní pixely mapy. Toto provedeme 2D interpolací jednotlivých hodnot v matici. Mezi všechny body interpolujeme takový počet pixelů, abychom ve výsledku dostali mapu ztrát s rozměry 361x441. Důležité je poznamenat, že Matlab nedovoluje nastavit 2D interpolaci tak, abychom zadali přesný počet pixelů, které chceme interpolovat v osách x a y. Toto umožňuje pouze u jednorozměrné interpolace. Proto je třeba ji nastavit s dostatečným parametrem. Jeho podrobné nastavení můžeme zjistit v nápovědě prostředí Matlab. Výsledkem je sice rozměrově větší matice, ale tuto poté přepočítáme na potřebnou velikost.

7.2.6 Přepočet na úrovně signálu

Jelikož jsme si kladli za cíl zobrazit výslednou mapu pokrytí ve formě úrovní výkonu signálu ve všech místech mapy, je nutné matici ztrát přepočítat právě na matici úrovní. K tomuto kroku potřebujeme znalost vysílacího výkonu základnové stanice. Tu uživatel sám zadá. Pro každý bod matice vypočteme úroveň výkonu signálu podle vztahu

$$P_p[\text{dBm}] = P_v[\text{dBm}] - L_p[\text{dB}],$$
(7.7)

kde

P_p – úroveň výkonu v daném pixelu mapy,
 P_v – výkon na výstupu základnové stanice,
 L_p – ztráty v daném pixelu mapy.

Nyní máme vytvořenou matici, která je připravená ke grafickému vykreslení pokrytí.

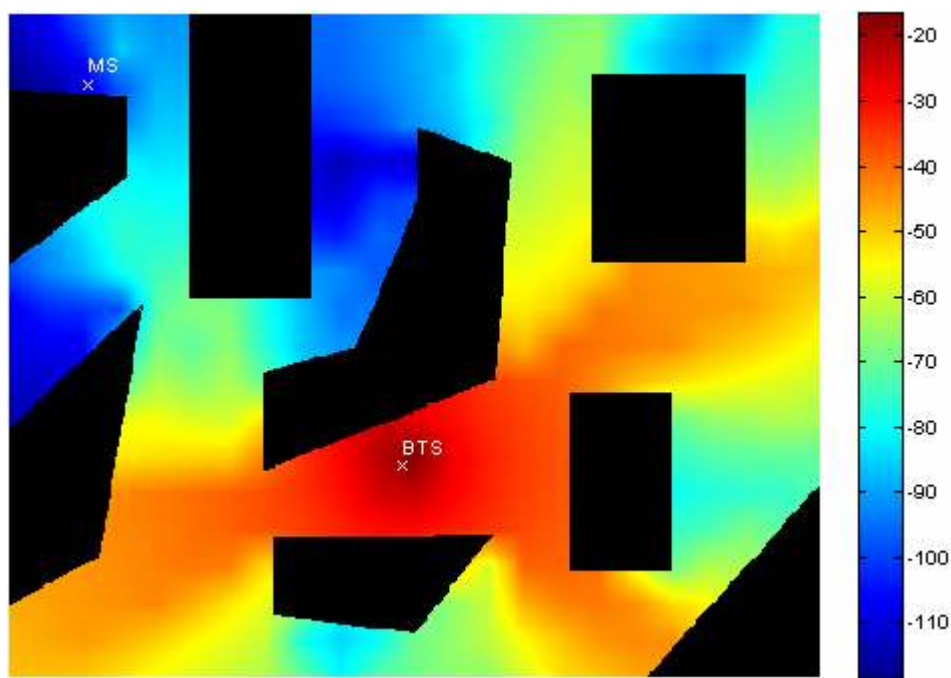
7.2.7 Vizualizace výsledných úrovní signálu na mapě a zpracování dat

7.2.7.1 Vizualizace

V tomto výpočetním kroku potřebujeme matici úrovní signálu určitým způsobem graficky vykreslit. Zvolíme si vykreslení hodnot pomocí barev RGB od červené po modrou. Červená barva bude reprezentovat oblast s nejvyšší úrovní signálu a modrá naopak oblast s nejnižší úrovní. Čili s červenou barvou se setkáme bezpochyby v oblasti základnové stanice,

s rostoucí vzdáleností a difrakcí o rohy zástavby již bude úroveň klesat a s ní se bude barva měnit, až do míst s nejmenší úrovní reprezentovaných právě modrou barvou. Body mřížky, ke kterým nelze podle kapitoly 7.2.4 vzhledem k nastavené rozteči vytvořit spojnicí od základnové stanice, budou mít automaticky přidělenou minimální hodnotu úrovně. V našem případě je stupnice RGB v rozmezí 0 až 255. Je tedy třeba přepočítat úrovně tak, aby místo s maximální úrovní (při základnové stanici) mělo hodnotu 255 a místo s minimální úrovní hodnotu 0. Místům v zástavbě je nutné přidělit černou barvu. Takto nadefinovaná mapa bude vykreslena způsobem, který je znázorněn na obrázku 7.9. Můžeme si všimnout, že na pravé straně od vykreslené mapy je umístěn „colorbar“. Ten definuje barvy pro jednotlivé hodnoty úrovní signálu. V naší použité verzi Matlabu nelze colorbaru nadefinovat popisek osy y (úroveň [dBm]). Proto jej vytvoříme později v uživatelském prostředí GUI.

Jak již bylo naznačeno výše, největší problém nastává v případě, kdy podle kapitoly 7.2.4 nelze vzhledem k nastavené rozteči vytvořit spojnicí od základnové stanice k aktuálnímu bodu mřížky. To je řešeno zprůměrováním okolních bodů mřížky. Může však nastat případ, kdy všechny okolní body leží v místě zástavby. Pak nám nezbývá jiné řešení, než přidělit tomuto bodu nejnižší úroveň ztrát. To se může negativně projevit na vykresleném místě mapy v okolí tohoto bodu. A to hlavně v případě, že nejbližší bod se známou informací o úrovni signálu bude mít rapidně vyšší hodnotu. Proto je nutné volit rozteč mřížky úměrně k hustotě zástavby na mapě.



Obrázek 7.9: Grafická vizualizace úrovní signálu na mapě.

7.2.7.2 Zpracování dat

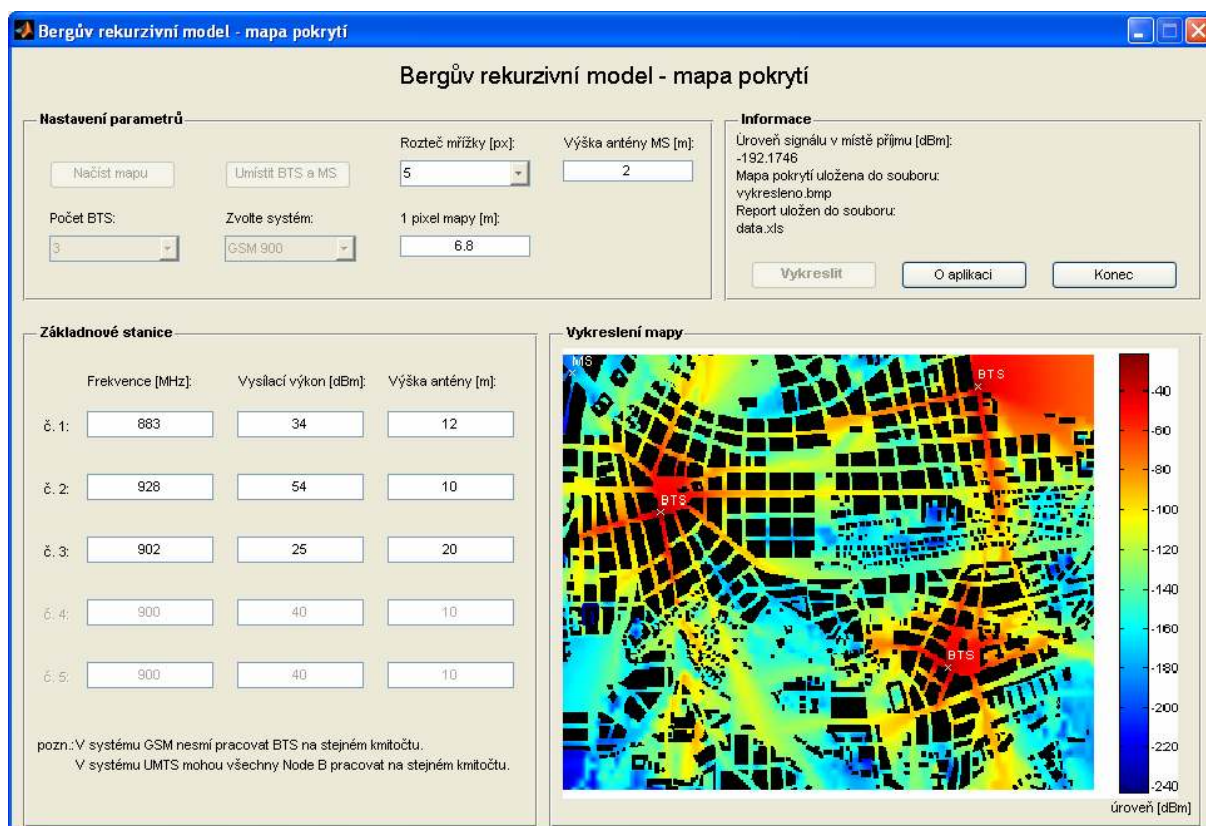
Po získání grafického výstupu s mapou pokrytí následuje zpracování naměřených dat. Prvním krokem je uložení vykreslené mapy do souboru. Zvolíme soubor ve formě 24-bitové bitmapy. Tento volíme vzhledem ke kvalitě obrazu. Obraz ve formátu JPEG je nedostačující a např. TIFF naopak zbytečně kvalitní, což se zobrazuje i na jeho výsledné velikosti. Obraz mapy bude uložen do souboru „vykresleno.bmp“.

Dalším krokem je vytvoření zprávy (reportu) o měření. Ta bude ve formě tabulky. Ideální bude vytvoření souboru xls pro nejpoužívanější tabulkový software Microsoft Excel. Výsledná zpráva obsahuje informaci o úrovních signálu ve všech bodech mřížky. Bylo by možné uložit úroveň pro každý pixel mapy, ale to je pro uživatele zřejmě zbytečné. Takovýto výstup plně postačuje. Aby bylo zřetelné, kde se bod s danou úrovní nachází, budou u něj uloženy souřadnice mapy x a y. Ty reprezentují vzdálenost v metrech, kde se bod nachází. Jelikož načítáme data z matice, jsou tyto souřadnice uvažovány od levého horního bodu mapy. Následující parametry, které budou taktéž ve zprávě uloženy, si uživatel nadefinuje před samotným měřením v uživatelském prostředí. Patří mezi ně počet základnových stanic, frekvence a vysílací výkon základnových stanic, výšky antén základnových stanic a mobilní stanice, rozteč mřížky, informace o tom kolik metrů definuje jeden pixel mapy a nakonec zvolený systém (GSM 900, GSM 1800 či UMTS). Ve výsledné zprávě se objeví i informace o úrovni signálu v místě mobilní stanice. Zpráva o měření se uloží do souboru „data.xls“.

Samotné ukládání dat není sice tak náročné na výpočetní čas jako např. hledání přímých optických viditelností nebo hledání nejkratší spojnice pomocí Dijkstrova algoritmu, ale taktéž zabere určitou dobu. Vše závisí na počtu bodů mřížky v ulicích. Čím více bodů mřížky, tím výpočetní čas narůstá.

7.2.8 Tvorba uživatelského prostředí

Cílem uživatelského prostředí, označovaného jako GUI (Graphical User Interface), je usnadnit a zpřehlednit potenciálnímu uživateli práci s navrhnutým programem. Celkový pohled na aplikaci uživatelského prostředí je na obrázku 7.10.



Obrázek 7.10: Celkový pohled na uživatelské prostředí.

Základem jsou čtyři navigační panely. Prvním z nich je panel „Nastavení parametrů“. Ten obsahuje tlačítko „Načíst mapu“. Po jeho stisknutí je třeba zvolit vhodnou jednobitovou bitmapu s plánkem zástavby. K výběru jsou nastaveny pouze soubory s příponou BMP. Program má ošetřen i případ, kdy je zvolena jiná než potřebná jednobitová mapa zástavby. Po zvolení souboru s mapou se tato zobrazí v panelu s názvem „Vykreslení mapy“. Nyní následuje volba počtu základnových stanic a systému GSM 900, GSM 1800 nebo UMTS. Poté stiskneme tlačítko „Umístit BTS a MS“. Vyskočí nám objekt Figure s mapu zvolené zástavby a pokud přejíždíme kurzorem myši po mapě, vidíme navigační kříž. Ten slouží ke zjištění souřadnic základnových stanic a mobilní stanice. Pokud byly dříve zvoleny např. tři základnové stanice, bude objekt figure čekat celkem na čtyři stisky myši v pořadí 3x základnová a 1x mobilní stanice. Program má ošetřenu situaci, kdy by došlo k umístění kurzoru do místa zástavby. V tomto případě vyskočí varovná hláška a volba umístění se musí provést znovu. Taktéž je ošetřeno umístění základnových stanic na stejnou pozici. Po určení poloh stanic se objekt figure ukončí a nastavené údaje se zobrazí opět v panelu „Vykreslení mapy“. Nyní provedeme volbu zbývajících parametrů potřebných pro výpočet. Prvním z nich je „Rozteč mřížky“, jejíž funkci jsme si vysvětlili v kapitole 7.2.2. Druhým je údaj o tom, kolik metrů ve skutečnosti představuje jeden pixel mapy. Mapa na obrázku 7.10 představuje reálnou část města Prahy a byla převzata z publikace [9]. Jeden pixel zde odpovídá ve skutečnosti 6,8 metrů. Dalším potřebným údajem je výška mobilní stanice. Nastavení parametrů pro základnové stanice provádíme v samostatném panelu „Základnové stanice“. Zde je třeba zvolit frekvenci, na kterém stanice vysílá, vysílací výkon a výšku umístění antény. V případě umístění více základnových stanic v systému GSM nesmí být jejich vysílací frekvence totožné. V systému UMTS, který pracuje na kódovém přístupu CDMA, je volba shodných kmitočtů možná. Výška umístění základnových stanic je omezena na 3 – 20 metrů. Naopak výška mobilní stanice na 0,5 – 3 metry. Vysílací výkon základnových stanic je omezen na rozmezí 0 – 55 dBm. Při volbě hodnot mimo rozsah nebude možné provést výpočet, proto je potřeba nastavit parametry správně. Čtvrtý panel je označen „Informace“. V něm nalezne uživatel stručný návod, jak v jednotlivých krocích nastavování postupovat. Po vykonání celého výpočtu pokrytí se zde zobrazí stručný výsledek měření. Kompletní report je uložen tak, jak je popsáno v kapitole 7.2.7.2. Informační panel obsahuje tlačítko pro spuštění výpočtu, zjištění informace o programu a autorovi a tlačítko pro ukončení celé aplikace.

7.3 Zhodnocení návrhu

V této části se pokusíme zhodnotit celkový návrh a jeho vlastnosti. Je nutné odlišit vlastnosti samotného programu s jeho aplikací a programovacího prostředí Matlab, ve kterém byl navržen. V průběhu realizace jsme narazili na nejzásadnější problém prostředí Matlab, kterým je neúměrný nárok na hardware počítače a s ním spojený zdoluhavý výpočetní čas při výpočtu smyček cyklů. Pro výpočty je proto doporučen alespoň dvou-procesorový systém s 2 GB vnitřní paměti. Pro názornost, společnost T-mobile používá profesionální software pro predikci pokrytí území signálem na šesti-procesorovém systému s 32 GB vnitřní paměti a plánuje upgrade až na dvojnásobek. Další nevýhodou je omezení zobrazení velkých matic. Především při nastavení malé hodnoty rozteče mřížky pracujeme s maticemi velkých rozměrů. Tyto není možné ve workspace zobrazit a kontrolovat jejich správnost. Možností je vyčítání této matice po částech. Naopak výhodou tohoto prostředí je systematická a přehlednost. Především přehled jednotlivých proměnných ve workspace. Dalším obrovským kladem je velice rozsáhlá nápověda a její názornost. Prostor Matlab bohatě využijeme i při realizaci aplikace, obsahuje totiž nástroj pro tvorbu GUI.

Nyní přejdeme k hodnocení samotného programu. Program názorným způsobem demonstduje šíření elektromagnetické vlny v prostředí reálné mikrobuňky. Pracuje na základě zvoleného Bergova rekurzivního modelu. Při nastavení vhodné rozteče mřížky je schopen poměrně přesně vypočítat ztráty šířením a ty následně přepočítat na úroveň ze znalosti vysílacího výkonu základnových stanic. Nejpresnější nastavení rozteče je omezeno na 5 pixelů, vzhledem k výpočetním nárokům uvedeným výše. Jak bylo popsáno v kapitolách 7.2.3 a 7.2.4, program využívá Bresenhamova algoritmu pro hledání přímých viditelností a Dijkstrova algoritmu pro nalezení nejkratší cesty mezi základnovou stanicí a jednotlivými body mřížky. Nejkratší cesta je spojnici jednotlivých bodů, avšak může nastat případ, kdy spojnice vlivem „velké“ rozteče mřížky neexistuje. Takovému bodu je přidělena nekonečná hodnota ztrát, i když má ve skutečnosti hodnotu naprosto jinou. Toto je částečně řešeno zprůměrnováním úrovní okolních bodů mřížky, ale pokud je bod obestavěn zástavbou, nekonečná hodnota mu zůstane. Uvedený problém je v programu ten nejzásadnější a může v jistém případě přinést zkreslené údaje o pokrytí v daném místě.

Přistupme nyní k výhodám. Jednou z nich je přehlednost modelu díky použité aplikaci. Největším přínosem je bezpochyby možnost umístění více základnových stanic a získání grafického výstupu pokrytí. Díky němu je možné plánovat rozmístění základnových stanic do oblasti s nedostatečnou úrovní signálu. Pro informaci o úrovních v jednotlivých místech mapy jsou data uložena do zprávy o měření. Dalším přínosem aplikace je možnost nastavení mnoha parametrů, které byly uvedeny v kapitole 7.2.8.

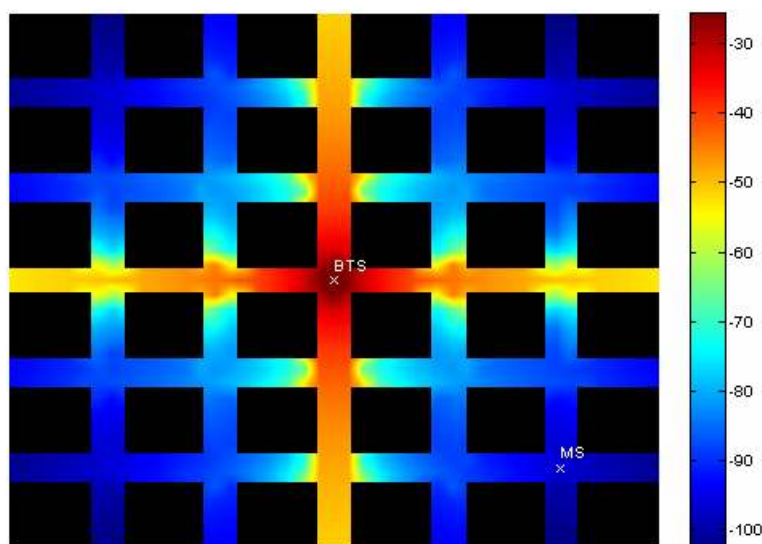
Pokud si výše uvedené shrneme, můžeme konstatovat, že celkový návrh byl proveden logicky a uceleně. Bylo by však vhodné pokusit se vzhledem k časovým a hardwarovým nárokům o implementaci do jiného programovacího prostředí, než je Matlab.

8 Simulace

V této části práce se zaměříme na sledování výsledků pokrytí pro určité případy rozmístění zástavby v mikrobeuře. Především se zaměříme na změnu úrovně signálu při průchodu elektromagnetické vlny mikrobeuňkovým prostředím. Při výpočtu úrovně signálu pomocí Bergova rekurzivního modelu hrají hlavní roly dva faktory. Prvním je rostoucí vzdálenost mezi jednotlivými uzly spoje a druhým úhel změny směru spojnice. Tyto parametry jsou slučitelné pouze při nepřímé optické viditelnosti NLOS mezi oběma konci spoje. Při přímé viditelnosti LOS nastává změna úrovně pouze s měnící se vzdáleností.

8.1 Změna úrovně vlivem vzdálenosti

Tuto problematiku bude nejlepší zachytit při rozložení zástavby typu Manhattan. Pojmeme manhattanské rozmístění se myslí pravidelné mřížové umístění budov, tak jak již bylo uvedeno na obrázku 5.7. Pokud je základnová stanice umístěna ve středu tohoto seskupení, výsledné pokrytí bude vypadat tak, jak je znázorněno na obrázku 8.1.



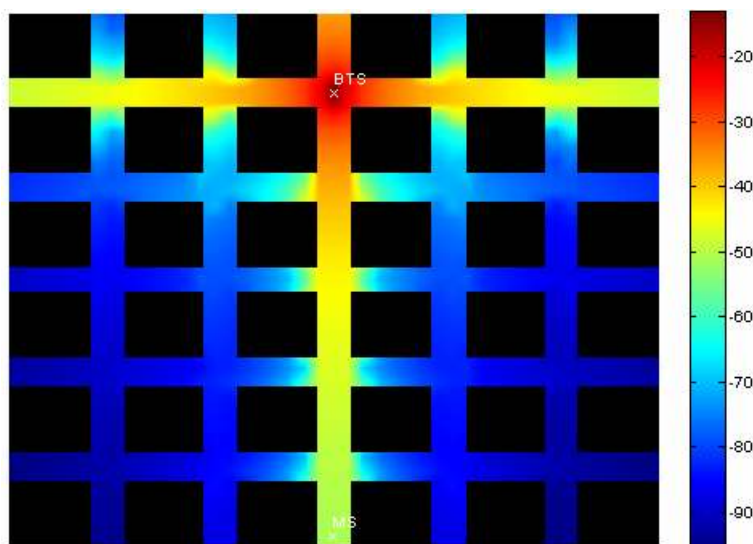
Obrázek 8.1: Pokrytí zástavby v manhattanském rozmístění.

Jelikož se jedná o ilustrativní zobrazení, bylo v konkrétním případě použito systému GSM s roztečí mřížky 10 pixelů a s definovanou hodnotou 3 metry na jeden pixel mapy. Takovéto seskupení může být pro nás vzhledem k cíli simulačních výpočtů velmi užitečné. Můžeme na něm totiž sledovat jednak dlouhé ulice nezastíněné zástavbou, čili s přímou viditelností LOS. Taktéž můžeme sledovat rostoucí útlum resp. klesající úroveň signálu vlivem zastínění budovami, čili případ nepřímé optické viditelnosti NLOS.

8.1.1 Přímá optická viditelnost LOS

Nejprve se tedy zaměříme na přímou optickou viditelnost mezi základnovou stanicí a místem, ve kterém chceme zjistit úroveň signálu. V situaci naznačené na obrázku 8.2 máme základnovou i mobilní stanici umístěnou na stejné dlouhé ulici. Představují nám tedy případ

přímé viditelnosti LOS. Každá budova má rozměry přibližně 45x50 pixelů což při 3 metrech na jeden pixel odpovídá velikosti 135x150 metrů. Jejich velikost by byla ve skutečnosti zřejmě menší, ale tyto hodnoty byly voleny tak, aby byla měnící se úroveň na mapě zřetelná. Celkové rozměry mapy jsou tedy 1083x1323 metrů (361x441 násobeno třemi metry). Rozměry jsou stále uváděny ve tvaru „řádky x sloupce“, jelikož s nimi pracujeme ve formě matic.



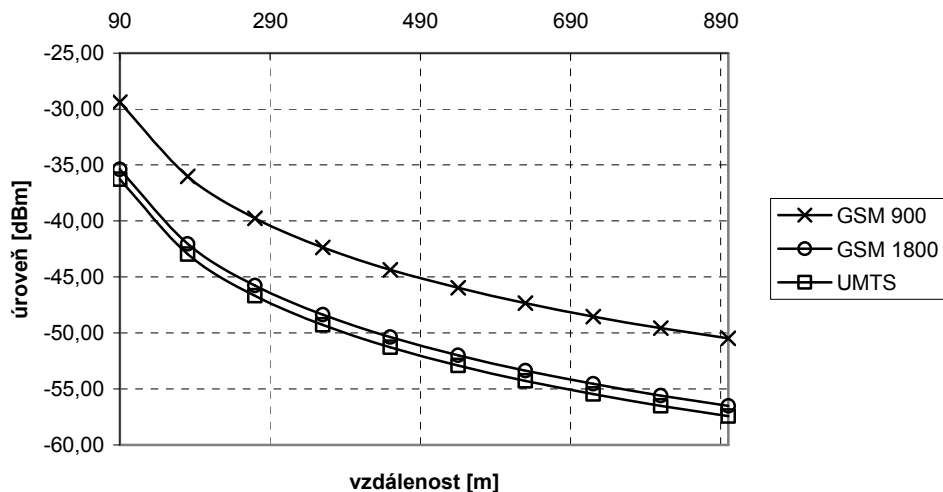
Obrázek 8.2: Přímá optická viditelnost LOS mezi základnovou a mobilní stanicí.

Z obrázku 8.2 je patrné, že má základnová stanice přímé optické viditelnosti na všechna místa v ulicích, která jsou umístěna ve svislém a vodorovném směru. V těchto dvou směrech dochází s rostoucí vzdáleností pouze k pozvolnému poklesu úrovně, jelikož nejsou spojnice mezi základnovou stanicí a místy zájmu zastíněny žádnou zástavbou. Pokud se však zaměříme na případ, kdy nastává difrakce o vertikální hrany budov zjistíme, že dochází k výraznému poklesu úrovně. Tento pokles může mít při jedné difrakci hodnotu až několika desítek dB.

Závislost úrovně signálu na rostoucí vzdálenosti pro přímou viditelnost je zobrazena v tabulce 8.1 a na obrázku 8.3.

Tabulka 8.1: Změna úrovně signálu v závislosti na vzdálenosti (případ LOS).

systém	vzd. [m]	90	180	270	360	450
GSM 900	úroveň [dBm]	-29,37	-36,03	-39,76	-42,36	-44,36
GSM 1800	úroveň [dBm]	-35,39	-42,05	-45,78	-48,38	-50,38
UMTS	úroveň [dBm]	-36,30	-42,97	-46,69	-49,29	-51,29
systém	vzd. [m]	540	630	720	810	900
GSM 900	úroveň [dBm]	-45,98	-47,35	-48,53	-49,57	-50,49
GSM 1800	úroveň [dBm]	-52,00	-53,37	-54,55	-55,59	-56,52
UMTS	úroveň [dBm]	-52,92	-54,28	-55,46	-56,50	-57,43

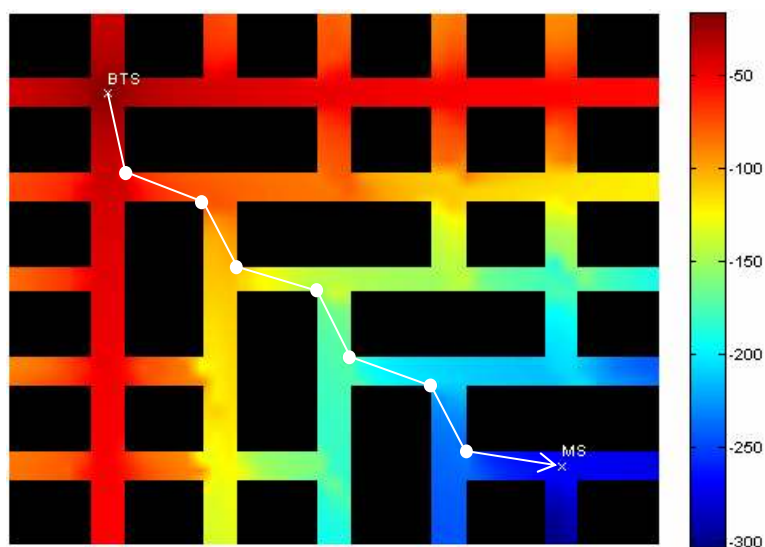


Obrázek 8.3: Závislost úrovně signálu na vzdálenosti pro dané systémy (případ LOS).

Z výše uvedeného grafu je patrné, že pokles úrovně při přímé optické viditelnosti je přibližně exponenciální. Jak můžeme taktéž vidět, Bergův rekursivní model odlišuje jednotlivé systémy pouze vzhledem ke kmitočtu, na kterém pracují. Platí, že úroveň signálu bude tím vyšší, čím nižší bude kmitočet zvoleného systému. Systémy GSM 1800 a UMTS mají charakteristiku téměř totožnou, protože je rozdíl jejich základních pracovních frekvencí 200 MHz. Úroveň signálu u GSM 1800 je přibližně o 1 dB vyšší než u UMTS. Systém GSM 900 má již kmitočet výrazně nižší, proto jsou jeho úrovně přibližně o 7 dB vyšší než u systému UMTS.

8.1.2 Nepřímá optická viditelnost NLOS

Na příkladu znázorněném na obrázku 8.4 budeme sledovat případ nepřímé optické viditelnosti NLOS. Zaměříme se na místa v diagonálním směru od základnové stanice.

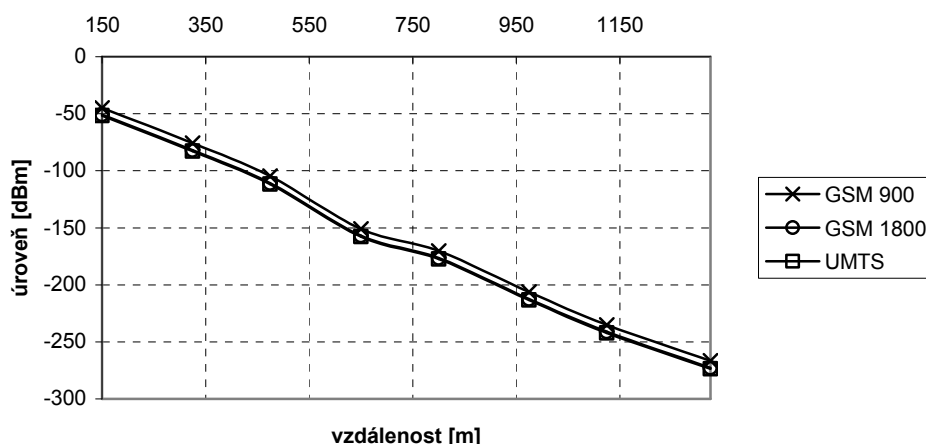


Obrázek 8.4: Nepřímá optická viditelnost NLOS mezi základnovou a mobilní stanicí.

Zástavba typu Manhattan byla upravena tak, aby byla zajištěna cesta signálu po diagonálním směru. Skutečnou cestu nám znázorňuje bílá spojnice na obrázku 8.4. Dochází tedy k difrakci o vertikální hrany budov. Budeme nyní sledovat úroveň signálu ve vyznačených uzlech této lomené spojnice. Změna úhlu spojnice je mezi jednotlivými uzly vlivem pravidelnosti zástavby stejná, proto bude hlavním parametrem změny charakteristiky rostoucí vzdálenost. Změnu úrovně signálu v závislosti na úhlu změny směru spojnice si popíšeme v kapitole 8.2. Situaci z obrázku 8.4 máme znázorněnu v tabulce 8.2 a na obrázku 8.5.

Tabulka 8.2: Změna úrovně signálu v závislosti na vzdálenosti (případ NLOS).

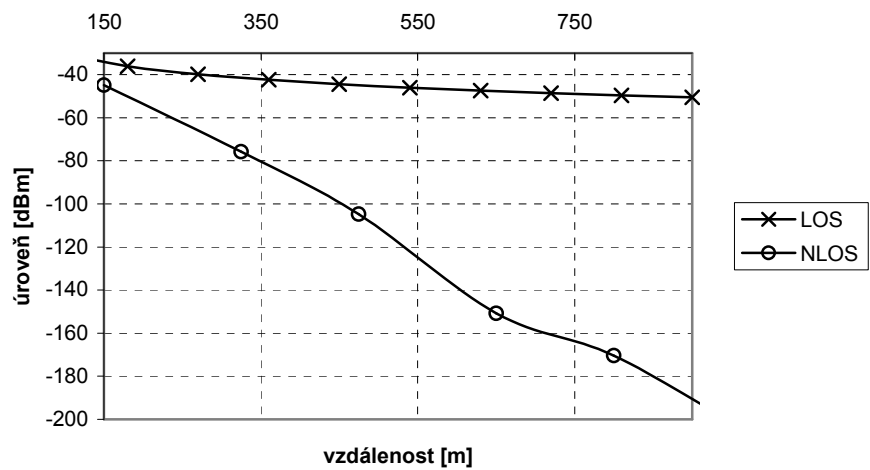
systém	vzd. [m]	150	325	475	650
GSM 900	úroveň [dBm]	-44,82	-75,81	-104,76	-150,88
GSM 1800	úroveň [dBm]	-50,84	-81,84	-110,78	-156,90
UMTS	úroveň [dBm]	-51,76	-82,75	-111,69	-157,82
systém	vzd. [m]	800	975	1125	1325
GSM 900	úroveň [dBm]	-170,42	-206,34	-235,14	-266,63
GSM 1800	úroveň [dBm]	-176,44	-212,36	-241,16	-272,65
UMTS	úroveň [dBm]	-177,36	-213,27	-242,07	-273,56



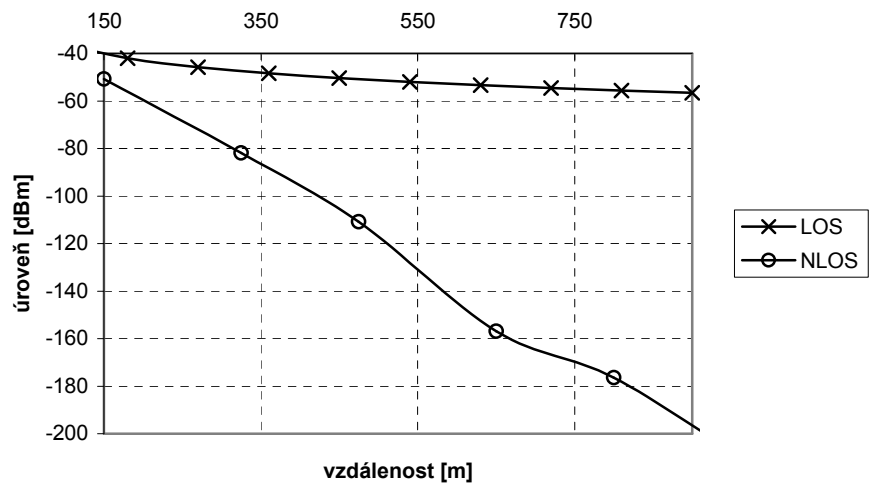
Obrázek 8.5: Závislost úrovně signálu na vzdálenosti pro dané systémy (případ NLOS).

Pokles úrovně signálu s rostoucí vzdáleností je narozdíl od situace LOS téměř lineární. Úroveň signálu je opět při nižší pracovní frekvenci vyšší. Systémy GSM 1800 a UMTS mají charakteristiku téměř totožnou. Systém GSM 900 má přibližně o 7 dB vyšší úroveň jako systém UMTS, což je totožná situace jako u LOS. Toto nám poukazuje na skutečnost, že v jistých situacích bude pro pokrytí území signálem v systému UMTS zapotřebí většího počtu základnových stanic Node B než základnových stanic BTS systému GSM 900.

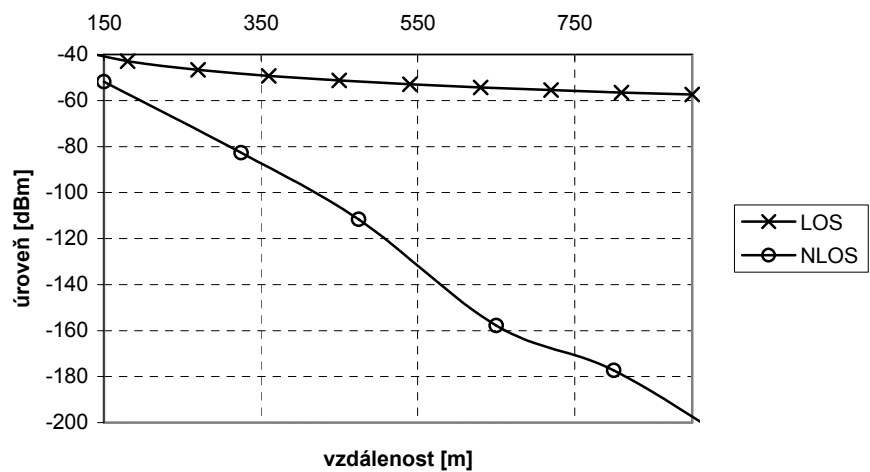
Charakteristiky na obrázku 8.5 jsou samozřejmě ovlivněny i velikostí zástavby mezi jednotlivými uzly. Na reálné mapě je členitost zástavby různorodá, proto by měla charakteristika kolísavou úroveň, což si ověříme v kapitole 8.4. V grafech na obrázku 8.6 si porovnáme pokles úrovně signálu pro LOS i NLOS a jednotlivé systémy.



a)



b)



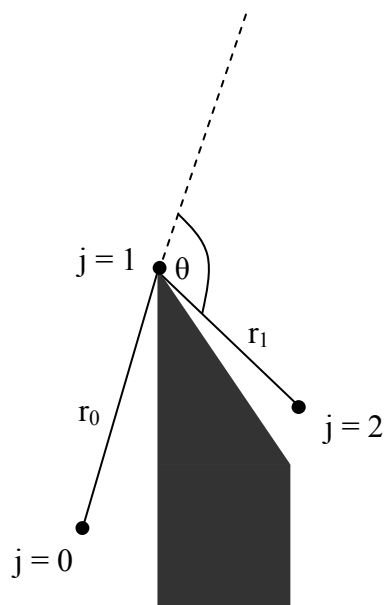
c)

Obrázek 8.6: Porovnání LOS a NLOS pro a) GSM 900 b) GSM 1800 c) UMTS.

Charakteristiky jsou pro všechny systémy velmi podobné, jen úroveň signálu je s rostoucím kmitočtem použitého systému nižší. V grafech na obrázku 8.6 jsou jednotlivé charakteristiky zobrazeny od vzdálenosti 150 m po vzdálenost 900 m, jelikož je spojnice mezi základnovou a mobilní stanicí v případě NLOS lomená a navíc v diagonálním směru, čili je delší. Cílem bylo sledovat pouze společné hodnoty vzdáleností.

8.2 Změna úrovně vlivem změny úhlu směrů spojnice

Jak už bylo uvedeno v kapitole 5.3.2.2, dalším výrazným parametrem ovlivňujícím úroveň signálu při šíření elektromagnetické vlny zastíněnou zástavbou u Bergova rekurzivního modelu je velikost úhlu, o který se změní cesta signálu mezi jednotlivými body spoje, viz. obrázek 5.9. Při rozložení zástavby dle manhattanského stylu by docházelo ke změně úhlu maximálně o 90° , jelikož se jedná o obdélníkové popř. čtvercové budovy. V současné době se však setkáváme s velkým množstvím budov, které se svým architektonickým pojetím výrazně odlišují v pravidelnosti tvarů. Příklad takového tvaru budovy je na obrázku 8.7. Jedná se o budovu, jejíž roh je výrazně ostrý.

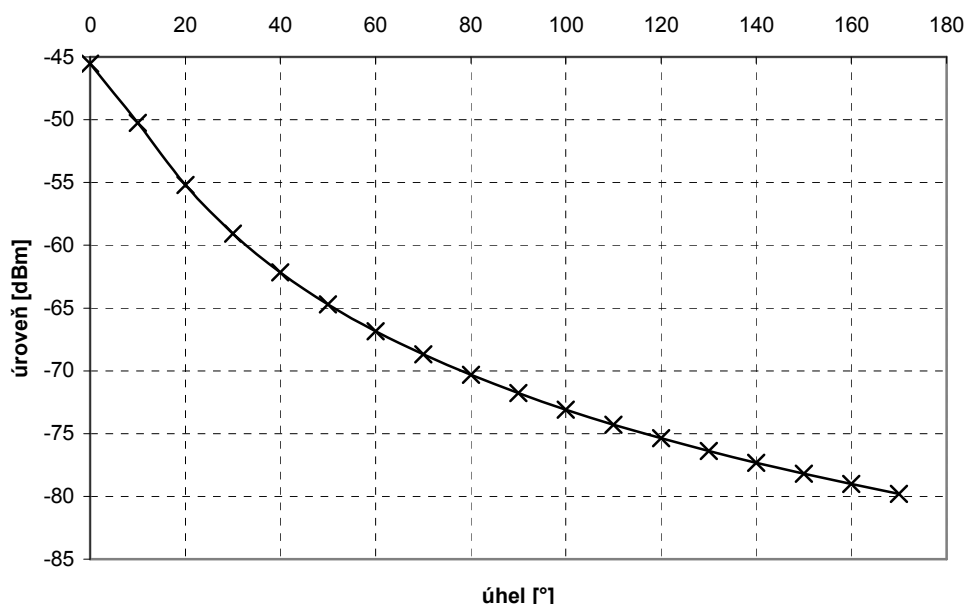


Obrázek 8.7: Příklad změny úhlu větší než 90° .

Nyní si ověříme, jak se mění úroveň signálu vlivem změny úhlu směru. Toto je zachyceno v tabulce 8.3 a na obrázku 8.4. Jednalo se o konkrétní příklad změny směru, kde úsek r_0 má délku 130 m a úsek r_1 délku 95 m. Úhel jsme postupně měnili od 0° (přímá viditelnost) až do 170° . Úhel změny 180° logicky nepřípadá v úvahu. V našem programu hraje výraznou roli pro definování velikosti úhlu taktéž hodnota rozteče mřížky. Ta nám skutečnou velikost ovlivní. Opět bude platit, že čím menší hodnota rozteče mřížky, tím více se bude velikost úhlu blížit reálné hodnotě. Bod $j = 1$ je ve skutečnosti rohem zástavby, v našem programu se jedná právě o bod mřížky, který může být rohu zástavby vlivem rozteče nepatrně vzdálen.

Tabulka 8.3: Změna úrovně signálu v závislosti na úhlu změny směru spojnice.

θ [°]	0	10	20	30	40	50	60	70	80
úroveň [dBm]	-45,54	-50,26	-55,21	-59,08	-62,16	-64,7	-66,84	-68,69	-70,32
θ [°]	90	100	110	120	130	140	150	160	170
úroveň [dBm]	-71,78	-73,09	-74,28	-75,37	-76,39	-77,32	-78,2	-79,02	-79,8



Obrázek 8.8: Závislost úrovně signálu na úhlu změny směru spojnice.

Z grafu je patrné, že úroveň signálu nám s rostoucí velikostí úhlu exponenciálně klesá. Pokud je součástí reálné zástavby větší množství budov s ostrými hranami a elektromagnetická vlna se právě přes tyto ohýbá, dochází k vyššímu nárůstu ztrát šířením resp. poklesu úrovně signálu, než by tomu bylo v případě rohů typu pravých popř. tupých úhlů. Změna úhlu se projeví na velikosti fiktivní délky spojnice, viz. vztahy (5.11) a (5.12). Její hodnota má právě rozhodující vliv na velikosti ztrát šířením dle vztahu (5.13).

8.3 Ostatní parametry ovlivňující úroveň

Nejen rostoucí vzdálenost, úhel směru spojnice a pracovní kmitočet hrají rozhodující vliv při výpočtu úrovně signálu v daném místě mikrobuňky. Pokud se podíváme na vztahy (5.13) a (5.14), všimneme si, že je třeba uvažovat i výšky antén základnových stanic a mobilní stanice. Důležité je poznamenat jednu skutečnost související s Bergovým rekurzivním modelem. V případě, že výšky antén nejsou známy, či pro rychlé orientační výpočty, lze v okolí 2 GHz pro typickou mikrobuňku volit $d_0 = 300$ m. Součástí vztahu (5.13) je i vlnová délka, která souvisí opět s pracovním kmitočtem. V tabulce 8.4 jsou uvedeny hodnoty vlnových délek pro základní kmitočty použitých systémů.

Tabulka 8.4: Vlnové délky odpovídající základním kmitočtům mobilních systémů.

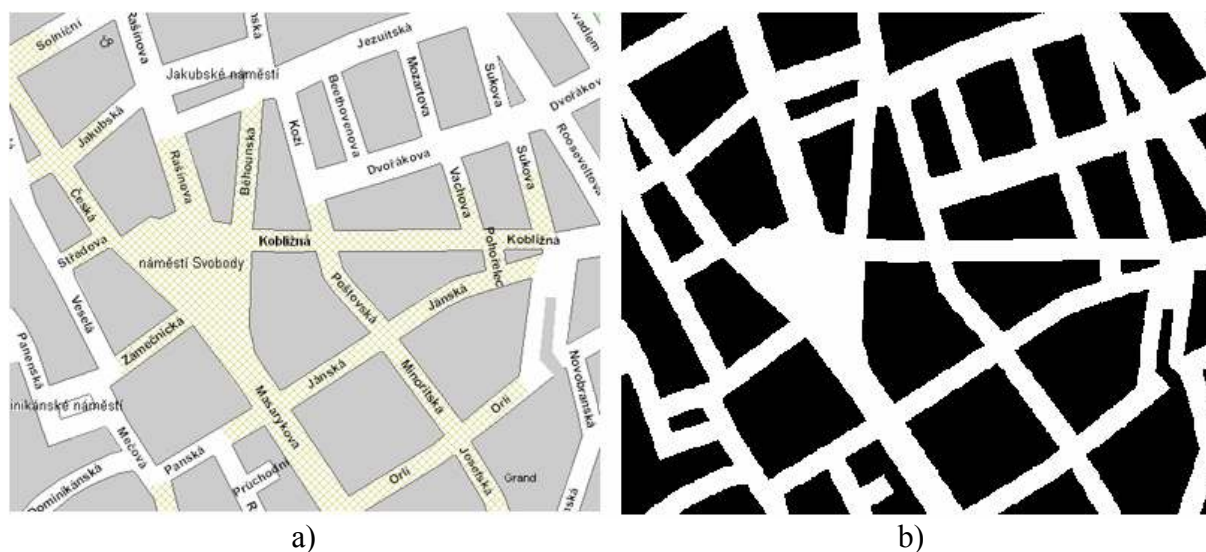
systém	λ [m]
GSM 900	0,333
GSM 1800	0,167
UMTS	0,150

Vzdálenost bodu zlomu d_0 dle vztahu (5.14) je přímo úměrná velikosti výšek antén základnové a mobilní stanice a nepřímo úměrná právě velikosti délky vlny. Hodnota d_0 je nepřímo úměrná ztrátám šíření. Můžeme tedy konstatovat, že s rostoucí výškou antén základnových stanic a mobilní stanice se nám úroveň signálu zvyšuje. Stejně tak se nám úroveň zvyšuje s rostoucí hodnotou vlnové délky resp. s klesajícím pracovním kmitočtem.

Další parametr ovlivňující úroveň signálu je vysílací výkon základnové stanice. Jeho vliv jsme si již vysvětlili na vztahu (7.7). Z něj je patrné, že s lineárně rostoucí hodnotou vysílacího výkonu lineárně roste i úroveň signálu v jednotlivých místech mikrobuňky.

8.4 Simulace na reálné mapě

V této kapitole provedeme výpočet pokrytí na reálné mapě městské mikrobuňky. Pro tuto část práce byla použita mapa okolí Náměstí Svobody v Brně. Původní mapa a její podoba pro potřeby programu jsou vyobrazeny na obrázku 8.9.



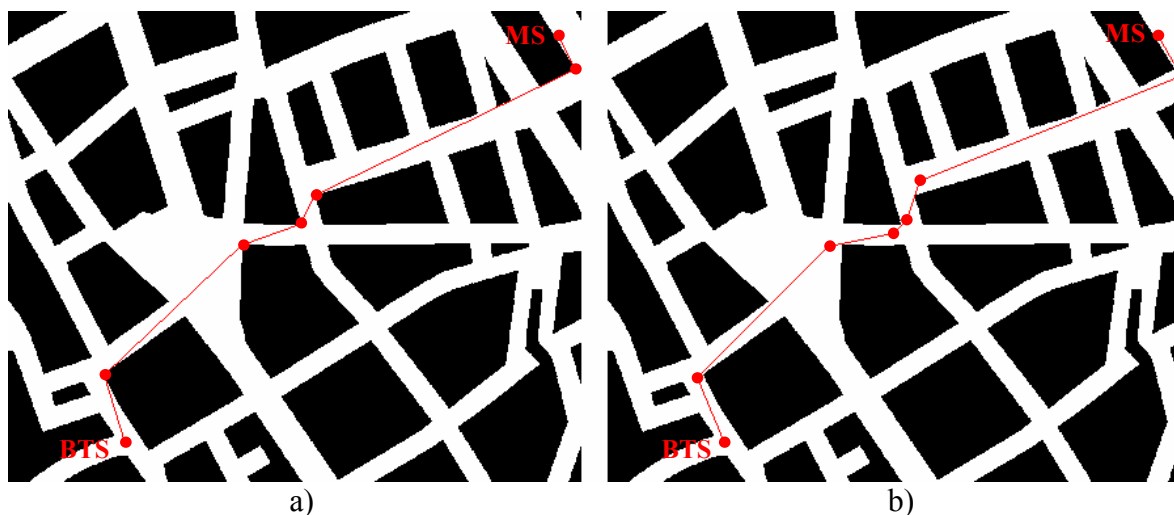
Obrázek 8.9: Reálná mapa městské zástavby:
a) reálná mapa, b) mapa pro potřeby programu.

Je nutné připomenout, že výpočet pokrytí závisí na umístění základnové stanice. Zde si zvolíme umístění tak, abychom mohli dobře sledovat měnící se úroveň signálu. Pro výpočet byla zvolena výška antény základnové stanice 10 m, výška antény mobilní stanice 2,5 m, vysílací výkon základnové stanice 40 dBm, rozteč mřížky 10 pixelů a 1 pixel jsou 2 m ve skutečnosti. Výpočet byl opět proveden pro všechny tři systémy. Na obrázku 8.10 je zobrazeno pokrytí pro systém GSM 900. Na vykreslené mapě můžeme sledovat poklesy úrovně signálu po difrakci o vertikální hrany zástavby. Taktéž je názorně vidět pozvolný pokles úrovně v dlouhých ulicích.



Obrázek 8.10: Pokrytí území reálné mikrobuňky pro GSM 900.

Při volbě rozteče mřížky 10 pixelů vedla cesta signálu přes 8 uzlů včetně základnové a mobilní stanice. Ve skutečnosti by bylo těchto uzlů 7, viz. obrázek 8.11. Touto problematikou jsme se již zabývali v kapitole 7.2.4.

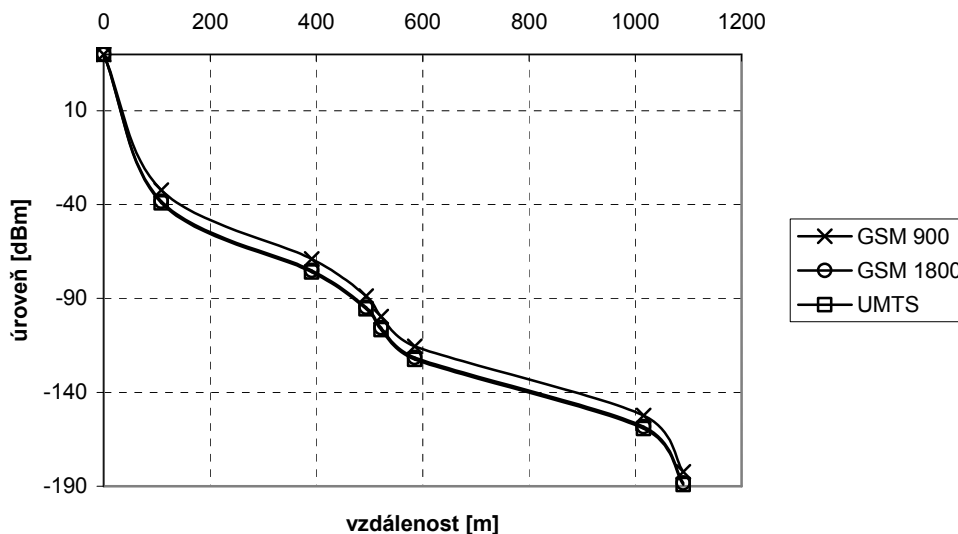


Obrázek 8.11: Hledání nejkratší spojnice mezi základnovou a mobilní stanicí:
a) skutečná spojnice, b) spojnice vytvořená programem.

Nyní se zaměříme na výpočet úrovně signálu v jednotlivých osmi uzlech spojnice. Tyto hodnoty byly odečteny v prostředí Matlab spolu s hodnotou vzdálenosti daných bodů lomené spojnice od základnové stanice. Hodnoty jsou k dispozici v tabulce 8.5 a na obrázku 8.12.

Tabulka 8.5: Hodnoty úrovně signálu v daných uzlech reálné mikrobuňky.

	vzd. [m]	0	108,46	391,30	493,29	521,57	584,81	1015,63	1090,06
GSM 900	úroveň [dBm]	40	-32,24	-69,01	-88,67	-99,65	-115,48	-152,30	-182,34
GSM 1800	úroveň [dBm]	40	-38,24	-75,01	-94,67	-105,64	-121,48	-158,30	-188,26
UMTS	úroveň [dBm]	40	-39,17	-75,94	-95,60	-106,58	-122,41	-159,23	-189,19



Obrázek 8.12: Závislost úrovně signálu na vzdálenosti v reálné mikrobuňce.

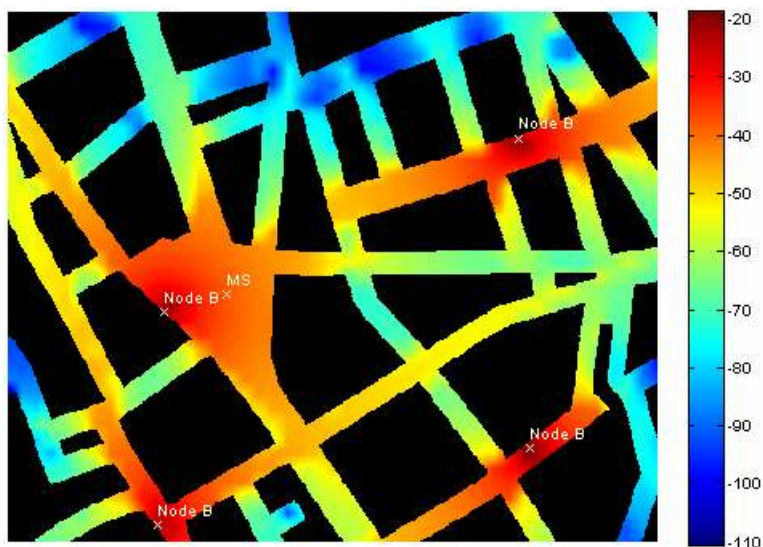
Pokud se zaměříme na rozdíl úrovní signálu mezi systémy GSM 900 a UMTS zjistíme, že pro systém UMTS je úroveň signálu v místě příjmu přibližně o 7 dB nižší. Rozdíl mezi GSM 1800 a UMTS je přibližně 1 dB. Čili opět naprosto stejná situace jako u simulací pro LOS i NLOS. Jednotlivé charakteristiky mají různorodý pokles signálu, což je způsobeno různorodou velikostí a rozmístěním zástavby. Pokud chceme oblast z obrázku 8.9 pokrýt kompletně signálem, musíme volit základnové stanice tak, aby úroveň ve všech místech mikrobuňky nebyla nižší než cca. -100 dBm až -105 dBm. Toto je totiž teoretická úroveň síly přijímaného signálu, kdy je ještě mobilní stanice schopna se zaregistrovat do sítě. V praxi se může tato hodnota lišit pro různé typy mobilních stanic. Z výše uvedených skutečností vyplývá, že v jistých případech je k pokrytí území signálem pro systém UMTS zapotřebí více základnových stanic.

Pokud pokryjeme území z obrázku 8.9 dostatečným množstvím základnových stanic, čili budeme požadovat, aby úroveň signálu byla na celé mapě vyšší než -105 dBm, bude pokrytí pro systém GSM vypadat tak, jak je znázorněno na obrázku 8.13.



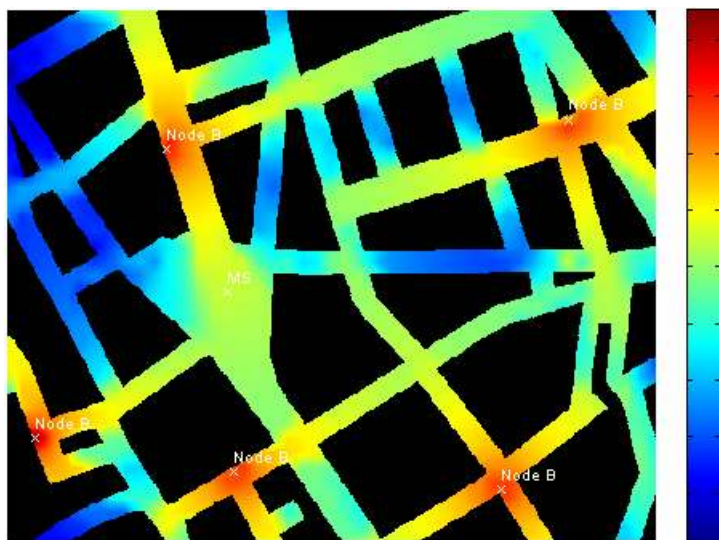
Obrázek 8.13: Pokrytí území systému GSM čtyřmi základnovými stanicemi.

Pokud stejné území pokryjeme stejným množstvím základnových stanic umístěných na stejném místě pro systém UMTS, bude pokrytí vypadat tak, jak je znázorněno na obrázku 8.14. Mírné nepřesnosti pokrytí mohou být způsobeny volbou rozteče mřížky.



Obrázek 8.14: Pokrytí území systému UMTS čtyřmi základnovými stanicemi.

Pokud si pokrytí pro tyto dva systémy porovnáme zjistíme, že u systému UMTS vznikají místa, která již pokryta signálem nebudou. U GSM 900 lze považovat místa kolem úrovně -105 dBm za hraniční, kdy ještě lze uskutečnit hovor nebo realizovat datový přenos. U UMTS bychom však museli přidat alespoň jednu základnovou stanici nebo se pokusit umístit stávající stanice efektivněji na jiná místa. Pokrytí při rozmístění pěti Node B můžeme vidět na obrázku 8.15. Opět platí, že výsledné pokrytí může vypadat nepatrně odlišně vlivem použité rozteče mřížky. Úroveň signálu je však nyní dostatečná.



Obrázek 8.15: Pokrytí území systému UMTS pěti základnovými stanicemi.

Úroveň je možné zvýšit i použitím vyššího vysílacího výkonu Node B popř. použít vyšší výšky antén základnových stanic.

9 Závěr

Tato práce se zabývá modelováním predikce šíření elektromagnetické vlny a to především v mikrobeuňkovém prostředí. V teoretické části je popsáno šíření mobilního signálu v pásmu UHF a taktéž vlivy, které na něj při průchodu komunikačním kanálem působí. Práce objasňuje princip buňkové (celulární) sítě včetně typu buněk, které se v jednotlivých oblastech používají.

Prioritním cílem bylo seznámení s existujícími modely šíření vln v mikrobeuňkovém prostředí. Jako nejvhodnější model pro predikci střední hodnoty ztrát šířením resp. střední úrovně výkonu signálu v mikrobeuňce byl zvolen Bergův rekurzivní model. Tento je vhodným kompromisem mezi výpočetně jednodušším empirickým přístupem, který nám obvykle neposkytuje dostatečná data pro určení pokrytí území buňkové sítě a deterministickým přístupem, jenž obvykle poskytuje daleko přesnější výstupní informace o šíření elektromagnetické vlny avšak na úkor časové a výpočetní náročnosti. Bergův rekurzivní model je založen na hledání nejkratší spojnice mezi základnovou a mobilní stanicí pomocí difrakce o vertikální hrany budov a to při znalosti 2D mapy prostředí.

Na základě informací o Bergově rekurzivním modelu byl v prostředí Matlab vytvořen program pro výpočet pokrytí území zvolené mikrobeuňky. Program je založen na Bresenhamově algoritmu pro inicializaci přímých viditelností v ulicích městského prostředí a Dijkstrově algoritmu pro hledání nejkratší spojnice mezi základnovou stanicí a místem výpočtu úrovně signálu. V Matlabu byla vytvořena přehledná aplikace, v níž si může uživatel zvolit mapu ve formátu BMP pro výpočet pokrytí území, do ní umístit až pět základnových stanic a nastavovat řadu parametrů. Mezi tyto parametry patří volba pracovní frekvence 900, 1800 MHz (systém GSM) a 2 GHz (systém UMTS), vysílací výkon základnových stanic, výška umístění antén základnových stanic a mobilní stanice, definování kolik metrů na mapě odpovídá jednomu pixelu, přesnost výpočtu, atd. Aplikace obsahuje i informační panel, který uživateli objasňuje obsluhu programu. Po výpočtu je do pracovního adresáře uložena výsledná mapa pokrytí a taktéž zpráva o měření.

Na základě simulací bylo zjištěno, že volba vyššího pracovního kmitočtu má za následek pokles úrovně signálu. Úrovně v systému GSM 900 byly přibližně o 7 dB vyšší než u systému UMTS. Exponenciální pokles úrovně nastává též s rostoucím úhlem změny směru cesty signálu vlivem difrakce o vertikální hrany budov. Úroveň signálu je možné zvýšit použitím vyššího vysílacího výkonu základnových stanic, zvýšením výšky antén základnových stanic či mobilní stanice, popř. umístěním vyššího počtu základnových stanic do dané oblasti.

Program spolu s aplikací je vhodným nástrojem pro predikci pokrytí signálem v mikrobeuňce. Výhodou je především okamžitá informace o úrovni signálu v daných místech zvolené oblasti a s tím spojená možnost efektivního plánování výstavby základnových stanic. Největší nevýhodou je však časová a hardwarová náročnost při použití podrobných map a volbě vyšší přesnosti výpočtu vlivem programovacího prostředí Matlab. Matlab počítá neúměrně dlouho složitější smyčky cyklů (až desítky hodin). Proto by bylo vhodné pokusit se program implementovat do jiného programovacího prostředí.

Seznam použité literatury

- [1] PECHAČ P. *Šíření vln v zástavbě. Modely pro plánování mobilních rádiových systémů*. 1 vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 108 s. ISBN 80-7300-186-1.
- [2] PECHAČ P., ZVÁNOVEC S. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. 1 vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007. 200 s. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [3] HANUS, S. *Rádiové a mobilní komunikace*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2002.
- [4] NAWROCKI M., DOHLER M., AGHVAMI A. *Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation*. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2006. ISBN 0-470-01567-5
- [5] ZANDL P. *Historické pozadí GSM – vznik standardu GSM*. Mobil.cz [online]. Leden 2002. Dostupné na WWW: http://www.volny.cz/ok1dub/mobily/17_Historicke_pozadi_GSM_vznik_standardu_GSM.htm.
- [6] VELICKÝ T. *Datové přenosy po GSM sítích, technologie HSCSD, GPRS a UMTS: diplomová práce*. České Budějovice: Pedagogická fakulta Jihočeské Univerzity, Katedra informatiky, 2002. 68 s., 1 příl.
- [7] PROKOPEC J., HANUS S. *Systémy mobilních komunikací*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [8] PETERKA J. *Data v mobilních sítích, Celulární (buňkový) princip*. eArchiv [online]. Srpen 2000. Dostupné na WWW: <http://www.earchiv.cz/a008s200/a008s201.php3>.
- [9] HOLIŠ, J. *Radio Network Planning of 3G Mobile Networks (UMTS): Diploma thesis*. CTU Prague: Department of Electromagnetical Field, 2005. 90 s., 2 příl.
- [10] LÁČÍK J. *Navrhování rádiových spojů, přednáškové prezentace*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [11] ŠIMŮNEK M. *Hledání nejkratší cesty v grafu (Dijkstrův algoritmus)*. Dostupné na WWW: <http://nb.vse.cz/~simunek/it418/sg/cesta/Cesta.html>.
- [12] RICHTR T. *Princip buňkového systému*. Praha: ČVUT v Praze, 2002. Dostupné na WWW: <http://tomas.richtr.cz/mobil/bunk-princip.htm>.
- [13] AKCAKAYA O., KOCHAN E., KALDIRIM O. *Propagation models*. Darmstadt: Technische universität Darmstadt. Dostupné na WWW: http://www.mwe.tu-darmstadt.de/fileadmin/lehre/Radio_Systems/materialien/PROPAGATION%20MODELS.pdf.
- [14] ZAPLATÍLEK K., DOŇAR B. *MATLAB. Tvorba uživatelských aplikací*. 1 vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. 216 s. ISBN 80-7300-133-0.

Seznam zkratek

2D	Two Dimensional
3G	3 rd Generation
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CEPT	The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
COST	European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
GPRS	General Packet Radio System
GSM	Global System for Mobile Communications
GUI	Graphical User Interface
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IMT 2000	International Mobile Telecommunications for the time after year 2000
IS-54	Interim Standard – 54
ITU	International Telecommunications Union
LOS	Line of Sight
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Centre
NLOS	Non Line of Sight
NMT	Nordic Mobile Telephone
OLN	Openbaar Landelijk Net
RGB	Red – Green – Blue
S/N	Signal-to-Noise Ratio
SMS	Short Message Service
TDMA	Time Division Multiple Access
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WAP	Wireless Application Protocol