

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Měření a analýza výkonu signálu základnových stanic
systému GSM

Zuzana Synková

Bakalářská práce

2012

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Jihlavě dne 03. 03. 2012

Zuzana Synková

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala Ing. Zdeňku Němcovi, Ph.D. a Ing. Michalu Mandlíkovi za nezměrnou trpělivost a cenné rady, které mi poskytli při vypracování této bakalářské práce. Zároveň patří mé velké poděkování rodině a blízkým přátelům, kteří mě podporovali v průběhu celého studia.

Anotace

Tato práce se zabývá v teoretické části šířením rádiových vln, rozbořem systému GSM a popisu základnových stanic této sítě. Praktická část je věnována analýze výkonu signálu vybraných základnových stanic v okolí Pardubic a vlivu vzdálenosti přijímací mobilní stanice od vysílací základnové stanice na výkon vysílaného signálu.

Klíčová slova

BTS, základnová stanice, GSM systém, analýza výkonu

Title

The measurement and analysis of received power of GSM base station.

Annotation

The theoretical part of this thesis deals with radio waves propagation, analysis of the GSM system and the basic characteristics of GSM base stations. The practical part of this thesis is focused on analyzing the signal power of base stations in the Pardubice area and analyzing how the power of the broadcasted signal is influenced by distance between base station and a mobile receiving station.

Keywords

BTS, base station, GSM system, analysis of received power

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	10
Úvod	11
1 Šíření elektromagnetických vln	12
1.1 Klasifikace šíření vln.....	12
2 Systém GSM	14
2.1 Historie	14
2.2 Vývojové fáze.....	14
2.3 Rádiové rozhraní systému GSM.....	15
2.4 Architektura GSM sítě.....	16
2.4.1 Mobilní stanice (MS - Mobile station)	17
2.4.2 Subsystem základnových stanic (BSS - Base Station Subsystem).....	18
2.4.3 Síťový podsystém (NSS - Network Switching Subsystem)	18
3 Popis základnové stanice v systému GSM	20
3.1 Diverzita	20
3.2 Sektorizace.....	20
3.3 Dělení	21
3.4 Jednotlivé součásti BTS	21
3.4.1 TRX - přijímač/vysílač	21
3.4.2 Výkonový zesilovač (PA).....	22
3.4.3 Combiner	22
3.4.4 Anténní přepínač (Duplexer).....	22
3.4.5 Signalizační systém (Alarm extension system).....	22
3.4.6 Ovládací funkce.....	22
3.4.7 Jednotka pásmového přijímače.....	22
3.5 Výkony základnových a mobilních stanic.....	23
4 Modely šíření vln	24
4.1 Celulární struktura rádiového spojení.....	24
4.2 Klasifikace modelů	25
4.2.1 Podle typu prostředí.....	25

4.2.2	Podle charakteru výpočtu	26
4.2.3	Fresnelův zlom	27
4.3	Mobilní spoj.....	28
4.3.1	Pomalé úniky (Slow fading)	28
4.3.2	Rychlé úniky (Fast fading)	28
5	Popis vybraných modelů	29
5.1	Modely šíření pro mikrobuňky	29
5.1.1	Dual-Slope model	29
5.1.2	Model ITU - R P.1411	30
5.1.3	Bergův rekurzivní model	32
5.2	Modely šíření pro makrobuňky	33
5.2.1	Hata model.....	33
5.2.2	Lee model	35
5.2.3	Walfish-Ikegami model	36
6	Výběr a popis konkrétních základnových stanic	39
6.1	Obec Srch	40
6.1.1	Trasy měření BTS Srch	40
6.2	Obec Sezemice	41
6.2.1	Trasy měření BTS Sezemice	42
6.3	Obec Časy.....	42
6.3.1	Trasy měření BTS Časy.....	43
7	Měření výkonu signálu v závislosti na vzdálenosti od základnové stanice.....	45
7.1	Přístroje použité k měření.....	45
7.1.1	Navilock NL-402U USB GPS / Galileo Receiver.....	45
7.1.2	Modem Siemens TC35i	45
7.1.3	Spektrální analyzátor Rohde&Schwarz FSH8	46
7.2	Záznam naměřených dat	46
7.2.1	GSM Net Monitor 1.0.15.....	46
7.3	Zpracování výsledků.....	48
7.3.1	Postup zpracování získaných dat	48
8	Analýza měřených dat.....	49
8.1	Grafické zobrazení trajektorií měření jednotlivých BTS	49
8.2	Grafické znázornění závislosti výkonu signálu základnové stanice na vzdálenosti. 51	

8.2.1	Porovnání vzdálenostně závislých výkonových grafů pro základnovou stanici v obci Srch.....	52
8.2.2	Porovnání vzdálenostně závislých výkonových grafů pro základnovou stanici v obci Sezemice.....	53
8.2.3	Porovnání vzdálenostně závislých výkonových grafů pro základnovou stanici poblíž obce Časy.....	54
	Závěr	55
	Literatura	56

Seznam zkratek

3GPP	Projekt Partnerství 3. Generace
ADC	Administrative Centre
ARFCN	Absolute Radio Frequency Channel Number
AuC	Authentication Centre
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CID	Cell ID
ČSN	České technické normy
DRX	Driver TRX
DSP	Digital Signal Processor
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
E-GSM	Extended-GSM
EHF	Extremely High Frequency
EIR	Equipment Identity Register
ETSI	European Technical Standards Institute
FDD	Frequency Division Duplex
GMSC	Gateway Mobile Switching Centre
GPRS	General Packet Radio System
GSM	Global System for Mobile communications
GSM-R	Railway GSM
HEX	Hexadecimal
HF	High Frequency
HLR	Home Location Register
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
ISDN	Integrated Services Digital Network
ITU	International Telecommunication Union
LAPD	Link Access Protocol on Dm Channel
LF	Low Frequency
MF	Medium Frequency
MS	Mobile station
MSC	Mobile Switching Centre
MSK	Minimum-shift keying
NF	Nízkofrekvenční
NMC	Network Management Centre
NSS	Network Switching Subsystem

OMC	Operational and Maintenance Centre
OSS	Operation Support Subsystem
PA	Power Amplifier
P-GSM	Primary-GSM
PIN	Personal Identification Number
PSTN	Public Switched Telephone Network
RSSI	Received Signal Strength Indication
SFH	Slow Frequency hopping
SHF	Super High Frequency
SIM	Subscriber Information Module
SMS	Short Message Service
SMSC	Short Message Service Center
TDM	Time Division Multiplex
TRX	Transceiver
UHF	Ultra High Frequency
USB	Universal Serial Bus
VF	Vysokofrekvenční
VHF	Very High Frequency
VLf	Very Low Frequency
VLR	Visitor Location Register

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Prostorová klasifikace elektromagnetických vln pro pozemní rádiové spoje (2)	12
Obrázek 2 - Označení frekvenčních pásem pro rádiový přenos dle ČSN IEC 60050-713 .	13
Obrázek 3 - Klasifikace šíření elektromagnetických vln v atmosféře (3)	13
Obrázek 4 - Architektura GSM sítě	16
Obrázek 5 – Sektorizace buněk v porovnání s použitím směrových antén	20
Obrázek 6 - Blokové schéma základnové stanice	21
Obrázek 7 – Část plánu městské celulární sítě (8)	24
Obrázek 8 - Určení efektivní výšky antény	35
Obrázek 9 - Mapa vybraných BTS (9)	39
Obrázek 10 - Příhradový stožár na okraji obce Srch (10)	40
Obrázek 11 - Měřené trasy pro BTS v obci Srch (9)	41
Obrázek 12 - Příhradový stožár SZ od obce Sezemice (10)	41
Obrázek 13 - Měřené trasy pro BTS v obci Sezemice (9)	42
Obrázek 14 - Příhradový stožár u silnice I/36 poblíž obce Časy (10)	43
Obrázek 15 - Měřené trasy pro BTS poblíž obce Časy (9)	43
Obrázek 16 - GPS Modul Navilock NL-402U (11)	45
Obrázek 17 - GPS Modem Siemens TC35i (12)	46
Obrázek 18 - Spektrální Analyzátor R&S® FSH8 (13)	46
Obrázek 19 - GUI programu GSM Net Monitor	47
Obrázek 20 - RSSI aktivní buňky dle GSM Net Monitoru	47
Obrázek 21 - RSSI okolních BTS dle GSM Net Monitoru	48
Obrázek 22 - Trajektorie měření v okolí BTS Srch	49
Obrázek 23 - Trajektorie měření v okolí BTS Sezemice	50
Obrázek 24 - Trajektorie měření v okolí BTS Časy	50
Obrázek 25 - Závislost výkonu signálu BTS Srch na vzdálenosti	52
Obrázek 26 - BTS Srch: Znázornění logaritmické spojnice trendu	52
Obrázek 27 - Závislost výkonu signálu BTS Sezemice na vzdálenosti	53
Obrázek 28 - BTS Sezemice: Znázornění logaritmické spojnice trendu	53
Obrázek 29 - Závislost výkonu signálu BTS Časy na vzdálenosti	54
Obrázek 30 - BTS Časy: Znázornění logaritmické spojnice trendu	54

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Výkonové úrovně v systému GSM	23
---	----

Úvod

Bakalářská práce je zaměřena na analýzu vysílaného signálu základnové rádiové stanice v síti GSM a jeho výkonu v závislosti na vzdálenosti od BTS. Cílem práce je porovnání reálného měření s vybranými modely šíření elektromagnetických vln.

Téma této práce je mi poměrně blízké zejména pro jeho praktické využití, neboť i v dnešní době, kdy je GSM síť stále nejrozšířenějším mobilním komunikačním prostředkem, se najdou na mapách místa, která nejsou pokryta mobilním signálem. Díky tomu jsou poznatky pro plánování pozemních mobilních systémů stále ještě aktuálním tématem.

Úvod bakalářské práce je věnován šíření elektromagnetických vln a jejich prostorové klasifikaci. Další kapitola má čtenáře seznámit s obecnými informacemi a historickými událostmi na poli komunikačních technologií, které provázely vývoj systému GSM až do podoby, kterou dnes využívají miliardy uživatelů po celém světě. A navzdory tomu, že například ve Spojených státech amerických bude nejspíš do 5 let nahrazován moderními sítěmi (3G a LTE), tak dle (1) v České republice bude tento standard používán minimálně do roku 2024. V další kapitole následují informace o architektuře GSM systému se zaměřením na rozbor základnové stanice. Čtvrtá a pátá kapitola je věnována modelům šíření rádiových vln se zaměřením především na mikrobuňky a makrobuňky, neboť ostatními typy prostředí jsem se v rámci své práce příliš nezabývala. Následuje praktická část této bakalářské práce, v rámci které probíhalo měření výkonu signálu vybraných základnových stanic. Šestá kapitola je věnována výběru a popisu konkrétních základnových stanic, které byly předmětem měření. Vzhledem k dostupnosti z místa mých studií jsem si k tomuto účelu vybrala BTS v blízkém okolí města Pardubice. Sedmá kapitola je věnována stručnému seznámení s přístroji a softwarem používanými při měření. A konečně osmá kapitola je věnována analýze získaných dat a jejich porovnání s vybranými modely šíření rádiových vln. V samotném závěru práce jsou shrnuty poznatky a výsledky praktické části této bakalářské práce.

1 Šíření elektromagnetických vln

Pro potřeby plánování pozemních rádiových komunikačních systémů je důležitá znalost teorie šíření elektromagnetických vln. Klasická teorie šíření vln vychází z vlnové rovnice, která je odvozena z Maxwellových rovnic (2):

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

kde \mathbf{E} ... vektor intenzity elektrického pole [$N \cdot C^{-1}$]

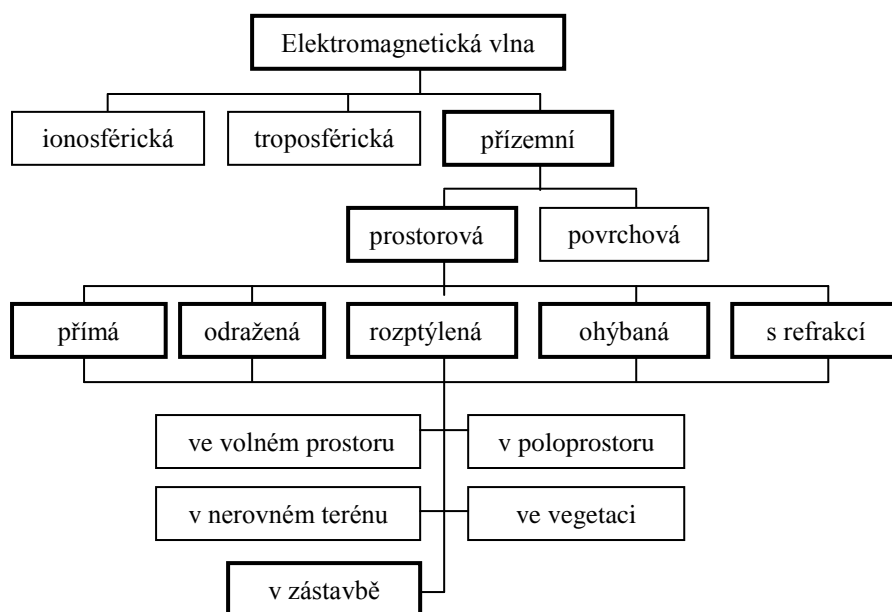
σ ... vodivost [S]

μ ... magnetická permeabilita [$H \cdot m^{-1}$]

ε ... elektrická permitivita prostředí [$F \cdot m^{-1}$]

1.1 Klasifikace šíření vln

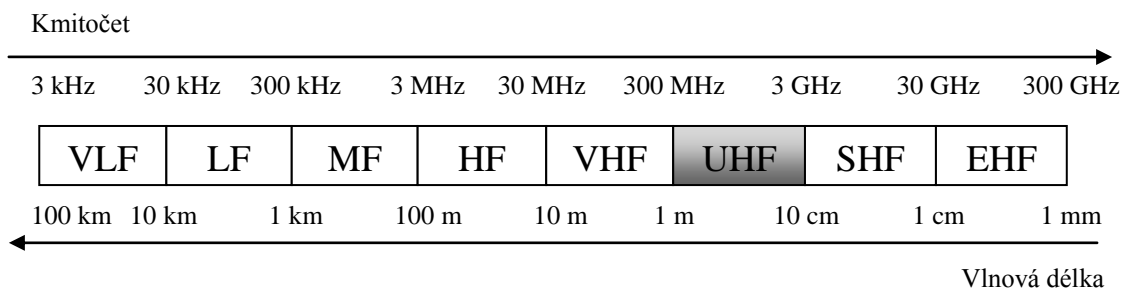
Na obrázku č. 1 je znázorněn jeden ze způsobů klasifikace šíření vlny pro pozemní rádiové systémy hlediska prostorového uspořádání spoje.



Obrázek 1 - Prostorová klasifikace elektromagnetických vln pro pozemní rádiové spoje (2)

Šíření elektromagnetických vln je ovlivňováno mnoha faktory, zejména pak vlnovou délkou a rozměry objektů v prostředí, ve kterém se vlna šíří. Ty totiž determinují, jak se bude vlna při šíření tlumit, odrážet, ohýbat a rozptylovat. Současné pozemní mobilní služby pracují převážně v kmitočtovém pásmu UHF, tedy v pásmu decimetrových vln. Důvodem jsou velmi vhodné vlastnosti elektromagnetických vln pro daný typ komunikace na těchto

frekvencích. Jsou jimi relativně malé ztráty šířením, dobrá schopnost odrážet se, ohýbat se a pronikat překážkami v zástavbě. (2)

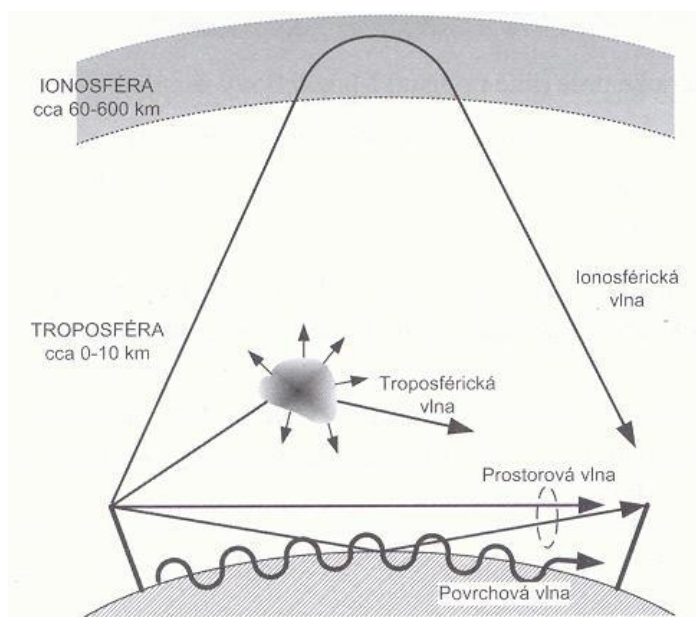


Obrázek 2 - Označení frekvenčních pásem pro rádiový přenos dle ČSN IEC 60050-713

Pro potřeby plánování rádiových komunikačních systémů je důležitá také teorie šíření vln v zemské atmosféře. Zemskou atmosféru lze rozdělit na několik vrstev:

- troposféru (0 – 11km)
- stratosféru (11 – 60km)
- ionosféru (60 – 600km)
- exosféru (nad 600km)

Hranice mezi jednotlivými vrstvami jsou pouze orientační a mohou se měnit v závislosti na geografické poloze a času. Z hlediska pozemních rádiových spojů jsou důležité zejména nejnižší vrstva, tedy troposféra a dále ionosféra, která je za jistých podmínek schopna odrážet elektromagnetické vlny. (3)



Obrázek 3 - Klasifikace šíření elektromagnetických vln v atmosféře (3)

2 Systém GSM

Celulární radiotelefonní systém GSM (Global System for Mobile Communication) se ve světě používá od roku 1992 a je jedním z nejpopulárnějších mobilních komunikačních prostředků. Patří mezi systémy druhé generace, které jsou plně digitální. V porovnání se systémy první generace jde o pokročilejší způsob komunikace, vyznačující se především vyšší kapacitou systému a vysokou odolností proti odposlechu a rušení. Přenos signálů v digitální formě umožňuje efektivnější využití přidělených kmitočtových pásem, větší kompatibilitu s pozemními i družicovými systémy, značné rozšíření nabídky poskytovaných služeb a v neposlední řadě také dosažení kompatibility s jinými digitálními sítěmi, a to nejen v rámci jednoho státu, ale po celém světě.

2.1 Historie

Vývoj systému GSM byl zahájen v počátku 80. let na podnět organizace CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations), za účelem sjednocení tehdejších evropských celulárních radiotelefonních systémů. V té době měly jednotlivé státy (např. Skandinávie, Velká Británie, Francie a Německo) vyvinutý svůj analogový celulární systém, který byl však neslučitelný s jakýmikoliv jinými systémy celulární komunikace. Tato situace byla neudržitelná nejen z praktických, ale především ekonomických důvodů - používaná zařízení nebyla použitelná za hranicemi země, tudíž trh s jednotlivými typy zařízení nebyl schopen nabídnout odpovídající množství produktů a zároveň tato koncepce bránila komunikačnímu rozvoji sjednocující se Evropy.

Proto Konference evropských správ a pošt (CEPT) vytvořila v roce 1982 novou standardizační skupinu **GSM** (Groupe Spécial Mobile), která měla za úkol vytvořit standardy pro nový digitální systém, který by byl kompatibilní v zemích celé Evropy a zároveň splňoval jistá kritéria - perfektní kvalitu přenášené řeči, efektivitu i pro budoucí využití, nízké ceny poskytovaných služeb, možnost mezinárodních roamingových smluv, ISDN (Integrated Services Digital Network) slučitelnost a samozřejmě výkonnost.

V roce 1989 pak byla odpovědnost za standardizaci tohoto systému přesunuta na Evropský telekomunikační normalizační institut (ETSI) a v roce 1990 byla specifikace fáze 1 sítě GSM prohlášena standardem. Samotný komerční provoz této 2G sítě byl spuštěn roku 1991. Postupně docházelo k připojování hlavních evropských měst a následně pokrývání celých oblastí. (4) (5)

2.2 Vývojové fáze

Zpočátku se systém používal pouze pro přenos hovorových signálů, avšak postupem času docházelo k rozvoji, a tím i rozšíření služeb.

Fáze 1 - zveřejněna r. 1990. GSM síť umožňovala svým klientům základní služby týkající se především telefonování, jakými jsou například přijímání a přesměrování hovorů, zame-

zení odchozích/příchozích hovorů, funkce blokování hovorů, předávání hovoru při nedostupnosti účastníka či globální roaming.

Fáze 2 z roku 1991 byla průlomová, neboť od té doby síť GSM umožňuje svým klientům datové přenosy a rozesílání SMS (Short Message Service) zpráv, kterých je třeba jen v naší republice ročně odesláno více než 8 miliard. (6) Dalším rozšířením služeb byly funkce např. čekání a podržení hovoru, možnost konferenčních hovorů, identifikace účastníka, sledování nákladů za telefonování či Cell Broadcast, umožňující přihlášení se k odběru místních zpravodajských kanálů.

I tato fáze se však vyvíjela a roku 1997 přešla do **Fáze 2+**, což s sebou přineslo další inovace orientované především na podnikání a obchod. Většina z nich se týkala přenosu dat, zejména pak implementaci nových technologií HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) a GPRS (General Packet Radio System). Za zmínku, ale rozhodně stojí také Enhance Full Rate či SIM Toolkit (Subscriber Identity Module Application Toolkit).

V roce 1998 byl zformován Projekt Partnerství 3. Generace (3GPP), který měl původně pouze vytvořit specifikaci pro následující třetí (3G) generaci mobilních sítí. Avšak 3GPP převzal také údržbu a vývoj GSM specifikace. Vyšší přenosové rychlosti dat byly představeny jako technologie EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) ve verzi z roku 1999. (7)

2.3 Rádiové rozhraní systému GSM

Systém GSM má vyhrazena dvě rádiová pásma o šířce 2 x 25 MHz. Pro komunikaci směrem od mobilní stanice k základnové stanici (tzv. Uplink) se jedná o rozmezí frekvencí 890 - 915 MHz a pro komunikaci směrem od základnové stanice k mobilní stanici (tzv. Downlink) je toto rozmezí 935 - 960 MHz.

Systém poskytuje plně duplexní provoz ve formě frekvenčního duplexu FDD (Frequency Division Duplex) s duplexním odstupem 45 MHz. Nosné vlny mají vzájemný odstup 200 kHz, takže v pásmu 25 MHz je jich celkem 125. Kanál č. 0 je oddělovací a nepoužívá se pro přenos hovorů, využitelných je tedy 124 duplexních kanálů. Každá dvojice uplink/downlink je potom označena absolutním číslem rádiového frekvenčního kanálu ARFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number). U systému GSM nabývá ARFCN hodnot 1 - 124.

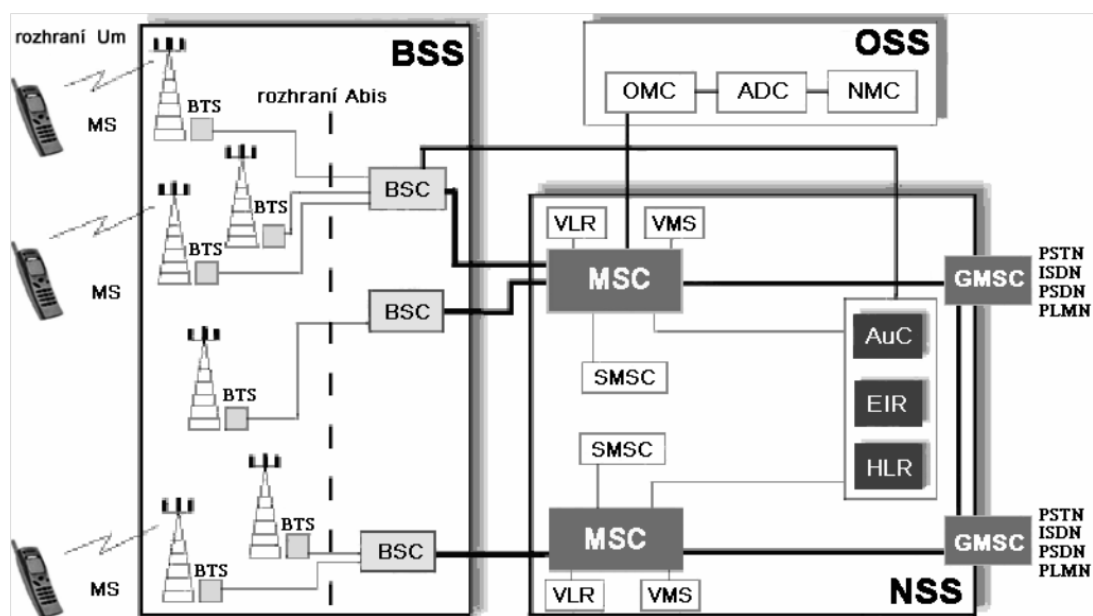
Kapacita frekvenčního pásma v oblasti 900 MHz se ukázala nedostačující, a proto bylo rozhodnuto o použití dalších kmitočtových pásem. Vznikl tak systém nazývaný **GSM 1800** [**DCS 1800** (Digital Cellular System)], který je založen na standardech GSM a je koncipován pro nasazení v buňkách malých rozměrů. Liší se především v použitém kmitočtovém pásmu (1710 - 1785/1805 - 1880), které poskytuje kapacitu 375 rádiových kanálů (ARFCN 512 - 885). Šířka přiděleného pásma je tedy 75 MHz a duplexní odstup 95 MHz. V USA je systém **PCS 1900** (Personal Communication System) nebo též zvaný **DCS 1900, GSM 1900**. PCS 1900 je přiděleno pásmo 1850 - 1910/1930 - 1990, což znamená, že šířka pás-

ma je 60 MHz a odstup 80 MHz. Použit lze 300 rádiových (ARFCN 512 - 810) a 2400 uživatelských kanálů.

Dále vznikla novější varianta GSM, označená **E-GSM** (Extended-GSM), kde je rozšířeno frekvenční pásmo standardní P-GSM (Primary-GSM) na 880 - 915/925 - 960 MHz (ARFCN jako u P-GSM a navíc 975 - 1023) a zmínit je třeba i variantu **GSM-R** (Railway GSM), kterou odsouhlasili provozovatelé železnic jako jednotný komunikační systém pro použití v železniční dopravě. Pro tuto službu ETSI vymezila pásmo 876 - 880/921 - 925 MHz (odpovídá ARFCN 955 - 974). (4) (8)

2.4 Architektura GSM sítě

Systém GSM je navržen tak, aby nebyl autonomní a uzavřený, ale aby umožňoval přístup i do jiných sítí. GSM síť je složena ze tří základních subsystémů, jejichž funkce a vztahy jsou přesně definovány.



Obrázek 4 - Architektura GSM sítě

BTS	(Base Transceiver Station): Základnová rádiová stanice
MS	(Mobile station): Mobilní stanice
BSS	(Base Station Subsystem): Subsystem základnových stanic
NSS	(Network Switching Subsystem): Síťový podsystém
OSS	(Operation Support Subsystem): Operační subsystém
BSC	(Base Station Controller): Základnová řídicí jednotka
MSC	(Mobile Switching Centre): Mobilní radiotelefonní ústředna
HLR	(Home Location Register): Domovský lokační registr
VLR	(Visitor Location Register): Návštěvnický lokační registr
SMSC	(Short Message Service Center): Servisní centrum SMS
GMSC	(Gateway Mobile Switching Centre): Brána k MSC
AuC	(Authentication Centre): Centrum autentičnosti
EIR	(Equipment Identity Register): Registr mobilních stanic
IMEI	(International Mobile Equipment Identity): Mezinárodní identifikační číslo registrované MS

OMC	(<i>Operational and Maintenance Centre</i>): Provozní a servisní centrum
NMC	(<i>Network Management Centre</i>): Centrum managementu sítě
ADC	(<i>Administrative Centre</i>): Administrativní centrum

Rozhraní Um: Vzdušný prostor mezi mobilní stanicí (MS) a základnovou stanicí (BTS). Toto prostředí používá LAPDm protokol (Link Access Protocol on Dm Channel) pro signalizaci, řízení volání kontroly, měření a podávání zpráv, handover, regulaci výkonu, autentizaci, autorizaci, umístění aktualizací, apod. Zprávy a signalizace jsou zasílány v bursstech po 0,577 ms v intervalech 4,615 ms, ve formě datových bloků každých 20 ms.

Rozhraní Abis: Prostředí mezi základnovou stanicí (BTS) a základnovou řídicí jednotkou (BSC). Obecně prováděné prostřednictvím DS-1, ES-1, nebo E1 TDM obvodů. Používá TDM subkanály pro komunikaci, LAPD protokol ke kontrole BTS a telekomunikační signalizaci a synchronizaci přenosu z BSC na BTS a MS.

Tři základní části sítě GSM:

- Mobilní stanice a základnové stanice udržující si spojení mezi sebou pomocí rádiového spojení (na frekvenci přibližně 900 MHz).
- Subsystem základnových stanic v roli řídicího centra.
- Síťový a spínací podsystém provádějící vlastní propojení mezi jednotlivými účastníky a účastníky jiných telekomunikačních sítí.

2.4.1 Mobilní stanice (MS - Mobile station)

Uživatel komunikuje s ostatními uživateli sítě GSM prostřednictvím mobilní stanice. Dle specifikací GSM je mobilní stanicí jednak vlastní mobilní telefon, tedy mobilní přijímač/vysílač a současně také modul SIM (subscriber identity module), který umožňuje unikátní identifikaci uživatele v rámci celé sítě GSM. Mobilní stanice obsahuje patřičné vybavení pro práci v GSM pásmu, tj. fullduplexní transceiver, displej, digitální signálový procesor (DSP) a smart kartu, nazývanou též SIM kartou. Mobilní stanici lze používat pouze, je-li zaktivována vložením SIM karty. SIM karta obsahuje údaje o majiteli – jeho telefonní seznamy, informace o předplacených službách a především jeho přihlašovací údaje, s jejichž pomocí se identifikuje u operátora – poskytovatele služeb (provede se kontrola v databázi s daty uloženými o uživateli). SIM karta je přenosná mezi jednotlivými mobilními stanicemi vyjma těch, které jsou blokovány operátorem, a tudíž jsou funkční pouze pro síť konkrétního operátora.

Každá mobilní stanice je identifikována jedinečným číslem - IMEI (International Mobile Equipment Identity). SIM karta také obsahuje tzv. IMSI kód (International Mobile Subscriber Identity), tajný klíč (Ki) pro přihlášení do sítě GSM a ostatní uživatelské informace. SIM karta může být ještě chráněna tzv. PIN kódem (Personal Identification Number), který je základní ochranou proti zneužití SIM karty. IMEI a IMSI jsou navzájem nezávislé, jelikož jsme schopni používat telefon s jinou SIM kartou a naopak.

2.4.2 Subsystém základnových stanic (BSS - Base Station Subsystem)

System základnových stanic se skládá ze dvou částí. Základnové stanice (BTS – Base Transceiver Station) a základnové řídicí jednotky (BSC - Base Station Controller). Komunikace mezi nimi probíhá na specifikovaném Abis rozhraní.

BSS řídí pomocí rádioroleových spojů jednu nebo více BTS stanic. BSS zajišťuje správné přidělování rádiových kanálů i dynamické přidělování kanálů během komunikace (tzv. frequency hopping) a předávání hovorů mezi BTS v případě, že se mobilní stanice pohybuje (tzv. handover).

BSC v podstatě řídí provoz BTS, a tím zároveň vytváří komunikační spojnicu mezi mobilní stanicí a Mobilní spínací ústřednou (MSC - *Mobile Switching Centre*). BSC také překládá 13 kbps hlasový kanál přes radiové spojení do standardního 64 kbps kanálu, který používá veřejná telefonní síť (PSTN - Public Switched Telephone Network) nebo ISDN (Integrated Services Digital Network).

2.4.3 Síťový podsystém (NSS - Network Switching Subsystem)

Komunikace mezi NSS a BSC je realizována přes tzv. A rozhraní. Hlavní komponentou NSS je mobilní spínací ústředna (MSC). MSC zajišťuje funkci jako klasická telefonní ústředna v pevné síti. Základní funkcí je registrace v síti, ověřování, lokalizace polohy v rámci GSM sítě, směrování hovorů, roaming a spojení s pevnou telefonní sítí (PSTN, ISDN...).

Domovský lokační registr (HLR - Home Location Register) a návštěvnický lokační registr (VLR – Visitor Location Register) tvoří dohromady s mobilní spínací ústřednou celek, který se tedy stará o routování hovorů a roaming.

Domovský lokační registr (HLR) je databáze uchovávající všechny informace o všech účastnících „domovské“ oblasti této HLR. Zde jsou uloženy např. informace o předplacených službách. Každý účastník je evidován v jedné bázi HLR, aby se předešlo chybám, které by vznikly špatnou synchronizací databáze. Existuje pouze jedna HLR na celou GSM síť, ačkoli může být implementovaná jako distribuovaná databáze.

Návštěvnický lokační registr (VLR - Visitor Location Register) obsahuje vybrané informace z HLR nezbytné pro řízení hovorů těch mobilních stanic, které se právě pohybují v geografické oblasti spravované danou MSC. Když vstoupí mobilní stanice na území řízené daným MSC, jsou veškerá data vyžádána registrem VLR od HLR. V okamžiku, kdy mobilní stanice opustí danou oblast, data z VLR se zruší. Data ve VLR nejsou nikdy měněna. Veškerá aktualizace uživatelských dat jsou vždy prováděna směrem od HLR k VLR, nikdy ne naopak.

Registr mobilních stanic (EIR - Equipment Identity Register) je databáze, která obsahuje seznam všech platných mobilních telefonů celé sítě, kde je každý telefon identifikován pomocí IMEI čísla. Pomocí tohoto registru se vytváří tzv. black list (tj. seznam odcizených telefonů), pomocí něhož se dá zamezit telefonu přihlásit se do GSM sítě.

Autentifikační centrum (AuC - Authentication Center) je chráněná databáze obsahující kopii tajných klíčů, které jsou používány k přihlášení daného telefonu do GSM sítě a ke kódování informací mezi telefonem a GSM sítí. (8)

3 Popis základnové stanice v systému GSM

Základnová stanice je obecně zařízení, které umožňuje bezdrátovou komunikaci mezi uživatelskými zařízeními a sítí. Uživatelská zařízení představují mobilní telefony, WLL telefony, počítače s bezdrátovým připojením k internetu, WiFi a, WiMAX přístroje a další. BTS je v 3G sítích označována jako Node B.

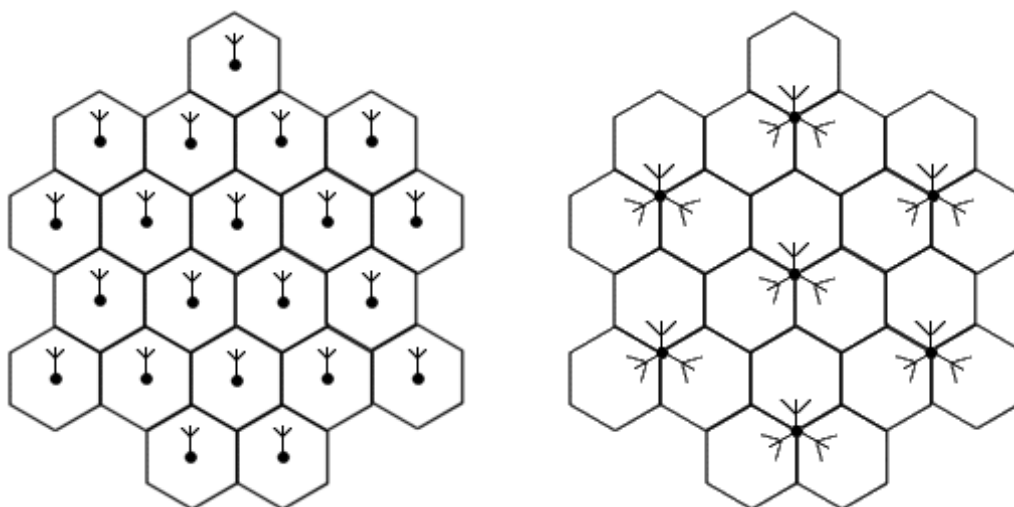
Ačkoliv můžeme termín BTS použít pro některý z bezdrátových komunikačních standardů, je obecně spojován s mobilními komunikačními technologiemi, jako jsou GSM a CDMA. V tomto ohledu je BTS součástí subsystému základnových stanic (BSS). BTS může mít vybavení pro šifrování a dešifrování signálů, spektrum filtračních nástrojů (např. filtry s pásmovou propustí) a za součást BTS jsou považovány v obecném slova smyslu i antény, které slouží jako podpora funkčnosti BTS.

3.1 Diverzita

Pro zlepšení kvality přijímaného signálu, jsou často použity dvě přijímací antény, umístěny ve vzdálenosti rovnající se různým násobkům čtvrtiny vlnové délky. Tato technika známá jako anténní diverzita či prostorová diverzita se shoduje s řešením problému úniků. Anténa může být umístěna horizontálně či vertikálně.

3.2 Sektorizace

Buňka je rozparcelována na jistý počet polí a každé z těchto polí je „ozářeno“ směrovou anténou. Tato anténa nevyzařuje do všech směrů, ale soustředí tok energie do speciálního prostoru buňky, známé jako sektor. Každé pole proto může být považováno za jednu novou buňku. Použitím směrových antén snížíme riziko směšování signálů v rámci společného kanálu. Typickou strukturou je disektor, ve kterém jsou 3 sektory, a každý je obsluhován vlastní anténou. Každý sektor má vlastní směr sledování 120° s ohledem na sousedící sektor. V případě, že není použita sektorizace, buňka může být obsluhována všesměrovou anténou. Bi-sekterní buňky jsou realizovány pomocí antény obsluhující sektory 180° .

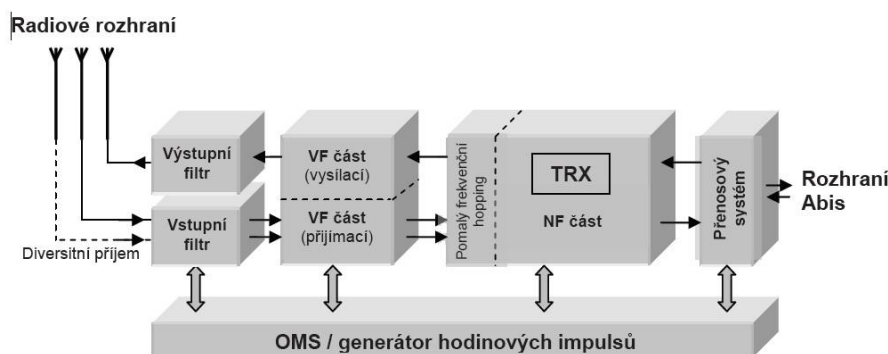


Obrázek 5 – Sektorizace buněk v porovnání s použitím směrových antén

3.3 Dělení

Proces, který má za důsledek větší pokrytí a kapacitu v bezdrátovém systému, který má více než jednu buňku pokrývající určitou část území. Každá buňka pokrývá malou část území, malým výkonem v řádech MHz, a tímto způsobem je možné vícekrát použít již využité kmitočty ve větších oblastech pokrytí, jako jsou například velkoměsta.

3.4 Jednotlivé součásti BTS



Obrázek 6 - Blokové schéma základnové stanice

3.4.1 TRX - přijímač/vysílač

Z pohledu zpracování signálu je nejdůležitější částí celé BTS. Běžně označovaný jako driver přijímače (DRX). V podstatě vysílá a přijímá signály, kromě toho však komunikuje s vyššími síťovými entitami - BSC. BTS může obsahovat dle doporučení až 16 těchto směrových modulů, zpravidla však obsahuje 1 - 4 moduly TRX. Jednotku TRX můžeme rozdělit na část nízkofrekvenční a vysokofrekvenční. Nízkofrekvenční část je určena pro digitální zpracování signálu, zajišťuje kanálové kódování a dekodování řečového signálu, prokládání a zpětné přeuspořádání, šifrování a dešifrování za účelem ochrany před zneužitím a obsahuje další bloky pro formátování a multiplexování časových slotů. Bitová rychlost hovorového signálu po zdrojovém zakódování je 13 kbit/s. Po zabezpečení proti chybovosti (kanálový kódér) se tato rychlost zvýší na 22,8 kbit/s. Na jedné nosné se však časově multiplexuje 8 účastnických kanálů. Jejich sdružením a doplněním o další bity, plnicích např. pomocné funkce signalizace se dostáváme k rychlosti přibližně $f_{bc} = 271$ kbit/s na jednu nosnou vlnu. Vysokofrekvenční část obsahuje především Gaussovský modulátor a demodulátor MSK (tj. GMSK) s normovanou šířkou pásma předmodulační Gaussovské dolní propusti $B_G T_b = 0,3$.

Obě tyto části jednotky TRX (NF a VF) jsou propojeny přes oddělenou nebo integrovanou jednotku pomalého frekvenčního hoppingu SFH (Slow Frequency hopping). Ta zajišťuje kmitočtové skoky, při nichž se kmitočty nosné vlny mění přibližně 217krát za sekundu, a to podle pseudonáhodné řady mezi 64 diskrétními hodnotami. Hlavním důvodem zavedení SFH je kmitočtová diverzita, která pomáhá redukovat nebezpečí ztráty radiového spojení v oblastech s rychlým Rayleighovým únikem, a to v případech, kdy se mobilní stanice nepohybuje, nebo se pohybuje jen velmi pomalu.

3.4.2 Výkonový zesilovač (PA)

Zajišťuje zesílení signálu z DRX pro vysílání anténou, může být součástí DRX.

3.4.3 Combiner

Kombinuje vysílání z několika DRX tak, aby mohlo být rozesíláno prostřednictvím jediné antény. Umožňuje tedy efektivní snížení počtu používaných antén.

3.4.4 Anténní přepínač (Duplexer)

Slouží k oddělení odesílaného a přijímaného signálu.

3.4.5 Signalizační systém (Alarm extension system)

Shromažďuje pracovní a stavová hlášení z různých jednotek v BTS a předává je provozu a údržbě monitorovacích stanic (O&M centru).

3.4.6 Ovládací funkce

Kontrola a řízení různých jednotek BTS včetně softwaru.

3.4.7 Jednotka pásmového přijímače

Dynamické přidělování kanálů (Frequency hopping), signál DSP a další.

3.5 Výkony základnových a mobilních stanic

Základnové stanice se dělí do osmi výkonových tříd. Tab. 1 ukazuje konkrétní přiřazení maximálních výkonových úrovní mobilní stanice a základnové stanice v návaznosti na konkrétní výkonovou třídu. Minimální výkon mobilní stanice je 20 mW (13 dBm).

Tabulka 1 - Výkonové úrovně v systému GSM

Výkonová třída	Maximální výkon mobilní stanice		Maximální výkon BTS	
	[W]	[dBm]	[W]	[dBm]
1	20	43	320	55
2	8	39	160	52
3	5	37	80	49
4	2	33	40	46
5	0,8	29	20	43
6			10	40
7			5	37
8			2,5	34

Pro GSM – Phase 2, jsou maximální výkony základnových stanic určených pro mikrobuňky a pikobuňky menší. Dělí se do tříd:

- M1 – 0,25W (24 dBm)
- M2 – 0,08W (19 dBm)
- M3 – 0,03W (14 dBm).

Přičemž minimální výkon mobilní stanice odpovídá 2,5 mW (4 dBm). (8)

4 Modely šíření vln

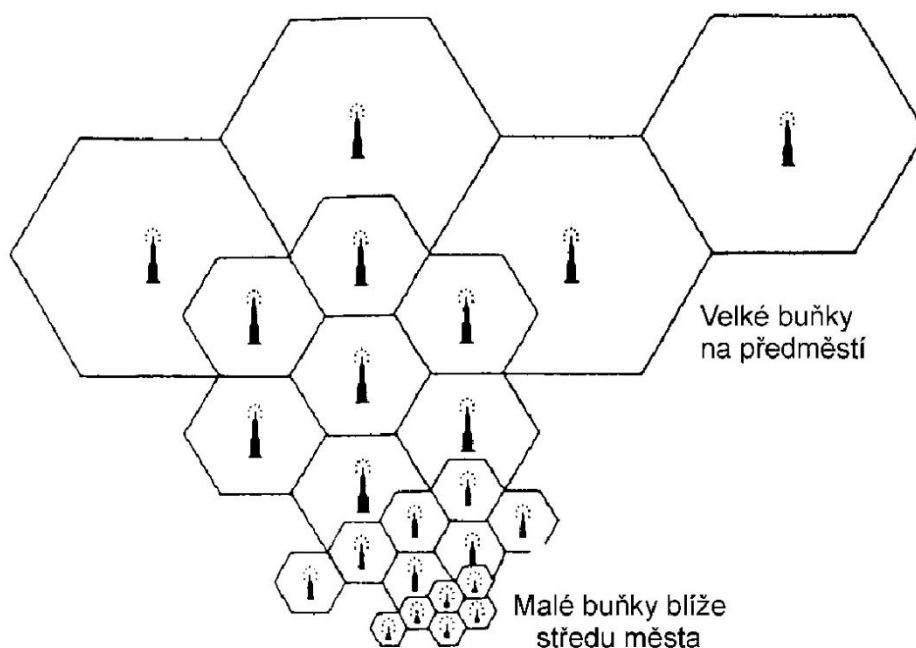
Pro modelování mobilního spoje jsou určující nejen druh spoje a vlastnosti přenosového prostředí, ale také typ a umístění antén. Pro určení středního útlumu signálu závislosti na typu okolního prostředí existuje řada nejrůznějších modelů.

Modely dělíme podle různých kritérií. Primární klasifikace se řídí typem okolního prostředí a charakterem výpočtu. (2)

4.1 Celulární struktura rádiového spojení

Celulární - buňková struktura umožňuje rozdělení příslušného území na velké množství malých území, buněk. Obvykle uprostřed každé buňky je umístěna BTS, která zajišťuje spojení mobilních účastníků v této buňce se systémem. Velikost jednotlivých buněk není stejná a buňky nejsou pravidelné nejen z důvodů různého terénu, ale jejich velikost se mění podle předpokládané hustoty provozu a předpokládaného počtu účastníků.

Malé buňky s poloměrem menším než 50 metrů se nazývají **pikobuňky** a jsou používány pro místa s vysokou koncentrací uživatelů, např. nádraží, obchodní domy, buňky v poschodích nad sebou ve výškových budovách, aj. **Mikrobuňky** mají poloměr do 1 km a používají se pro oblasti s větším provozem, například v centru měst. Velké buňky nebo **makrobuňky** se používají pro oblasti s malou hustotou provozu, například pro pokrytí venkovských oblastí a mají poloměr až desítky km. Zvláštním typem buněk jsou **buňky deštníkového typu** (*umbrella cells*), které vykrývají nepokryté části území mezi menšími pikobuňkami nebo mikrobuňkami. (8)



Obrázek 7 – Část plánu městské celulární sítě (8)

4.2 Klasifikace modelů

Modely šíření vln v zástavbě dělíme dle dvou základních kritérií:

- Dle typu prostředí, ve kterém se šíří (volné prostranství, městská zástavba, hustá městská zástavba, uvnitř budov...), a umístění pevné základnové antény.
- Dle charakteru výpočtu, pomocí kterého ke konkrétnímu modelu dospějeme.

4.2.1 Podle typu prostředí

Dle typu prostředí rozlišujeme makrobuňky, mikrobuňky a pikobuňky.

Makrobuňky

Anténa základnové stanice je umístěna nad úrovní okolních překážek. Poloměr této buňky se pohybuje od 1 km až do 30 km. Pevná anténa základnové stanice je umístěna nad úrovní okolních překážek, (tj. nad úrovní střech zástavby) a mobilní anténa je umístěna na ulici, makrobuňka je při neexistenci přímé optické viditelnosti mezi anténami (v praxi je tento případ téměř stálý) dominujícím mechanismem difrakce na hranách střech a odrazy od objektů v blízkosti mobilní antény.

Tvar makrobuňky je předpokládán kruhový, hlavně díky tomu, že vlivy místních nepravidelností zástavby se vzhledem k rozměrům makrobuňky nemusejí příliš uplatnit. Takový tvar buňky nám přispívá k zjednodušení predikce. Poloměr makrobuňky se pohybuje od 1 km až do 30 km.

Mikrobuňky

Anténa základnové stanice je typicky umístěna 3 až 6 m nad zemí, tedy pod úrovní okolních překážek. Poloměr této buňky bývá v rozmezí 100 m až 1 km.

Pevná anténa základnové stanice je umístěna hluboko pod úrovní střech. Rozhodující je šíření signálu na přímou viditelnost a odrazy od stěn budov. Zde se uplatní zejména vlnovodný efekt ulic, kde se vlna šíří díky odrazům podél ulice. Tvar mikrobuňky není kulový, ale sleduje konkrétní geometrii zástavby.

Pikobuňky

Anténa základnové stanice je umístěna ve více či méně uzavřeném interiéru, např. v budovách kanceláří, autobusovém nádraží či v nákupních centrech. Rozměry pikobuňky dosahují řádově desítky metrů.

Tato buňka, díky velké členitosti interiéru a umístění obou antén mobilního spoje uvnitř budov, představuje nejkomplicovanější případ. Energie se šíří přímo, průchodem stěnami a mobiliárem, ohyby, odrazy atd. Do hry vstupuje interiér se svým vybavením a také okolní budovy. Signál se mezi patry může šířit různými šachtami či odrazem od oken vedlejší-

ho objektu. Je zde na místě si uvědomit, že komplexnost interiéru se může významně měnit a jeho popsání může být velmi náročné.

Tvar pikobuňky oproti mikrobuňce je pravidelnější, protože elektromagnetická vlna většinou velmi dobře proniká běžnými překážkami v interiéru. Poloměr pikobuňky se pohybuje řádově v desítkách metrů.

Pro pikobuňky lze použít i ty nejjednodušší empirické modely s jedním spádovým koeficientem, podobně jako v makrobuňce. Zásadní rozdíl je však v tom, že v makrobuňce se pohybujeme za Fresnelovým zlomem a v pikobuňce se pohybujeme v oblasti před Fresnelovým lomem. (2)

4.2.2 Podle charakteru výpočtu

Dle charakteru výpočtu rozlišujeme empirické, deterministické, semi-deterministické a stochastické modely.

Empirické modely

Jedná se o nejpoužívanější typ modelů, neboť jejich aplikace je možná všude tam, kde předpokládáme hladkou spádovou křivku úměrnou n -té mocnině vzdálenosti. Vyznačují se jednoduchými a rychlými výpočty pro daný typ prostředí. Výpočet neřeší konkrétní geometrickou situaci (rozložení ani velikost překážek), ale přesnost výpočtu je závislá na empirických parametrech získaných z velkého počtu měření za daných podmínek. Útlum narůstá s příslušnou mocninou vzdálenosti:

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

Kde L představuje ztráty šířením [dB], d značí vzdálenost od vysílací antény [m], d_1 je referenční vzdálenost [m], L_1 označuje referenční útlum [dB] pro referenční vzdálenost d_1 a nakonec n vyjadřuje spádový koeficient [-].

Tento základní model šíření je následně použit pro porovnání naměřených a teoreticky předpokládaných hodnot přijímaných výkonů nebo útlumů. Komplikovanější modely sice přidávají detailnější popis konkrétního prostředí, pro obecné použití však vyhovují méně.

Deterministické modely

Deterministické modely patří k těm nejpřesnějším. Jsou založeny na fyzikálních principech šíření elektromagnetických vln pro idealizovaný popis daného prostředí (geometrie a materiál zástavby, terén, apod.). Obecně lze konstatovat, že představují výpočetně složitě a sofistikované algoritmy, které však na oplátku poskytnou cenné informace, neboť s jejich pomocí dokážeme modelovat jak útlum šířením, tak i širokopásmové parametry s velkou přesností bez ohledu na geometrickou členitost konkrétního prostředí. Tato přesnost je však přímo závislá na kvalitě vstupních dat. K odpovídajícím informacím je zapotřebí velké množství dat doplněné o přesnou definici měřeného prostoru.

Jedná se např. o metodu sledování paprsku (ray tracing). Tato metoda dokáže kromě střední úrovně signálu určit i další parametry, jakými jsou zpoždění od jednotlivých paprsků a směry, odkud energie přichází. Také dokáže analyzovat rychlé a pomalé úniky. To však lze použít pouze tehdy, jestliže všechny okolní objekty jsou podstatně větší než je vlnová délka.

Semi-empirické modely

Jedná se o kombinaci dvou předchozích modelů. Základ tvoří deterministický model, který je různě korigován podle výsledků reálných měření.

Stochastické modely

Na základě vstupních parametrů je náhodně generován průběh signálu pro simulaci přenosového kanálu, kdy obvykle není přímá vazba na geometrii přenosového prostředí a umístění pevné a mobilní antény. Tyto modely vychází ze statistiky a pravděpodobnostních funkcí. Mimo modelování úrovně signálu umožňují též modelaci dalších parametrů šíření, jakým je např. impulsová odezva kanálu. Vzhledem k tomu, že modely vychází z náhodných veličin a z teorie pravděpodobnosti, je pro každou jednotlivou simulaci šíření odlišný výsledek. Provedením několika simulací tak vzniká soubor možných rozložení výkonu elektromagnetické vlny v časově proměnném kanálu. Provedením velkého počtu simulací lze tedy, do jisté míry, zpřesnit model a snížit tak oblast, ve které se parametry kanálu mohou pohybovat.

Všechny stochastické modely pracují s vícecestným šířením signálu v radiovém kanálu. Vývoj těchto metod stále probíhá a hledají se náhodné modely, které budou schopny popsat jak kanály s rychlými úniky (fast fading), tak kanály s dominancí pomalých úniků (slow fading). Tyto modely jsou stále zdokonalovány a zpřesňovány, aby mohly být nasazovány i pro některé konkrétní aplikace, kde se v současné době používají modely jiné. (2)

4.2.3 Fresnelův zlom

K Fresnelovu zlomu dochází v místě, ve kterém je dráhový rozdíl přímého a odraženého paprsku roven právě polovině vlnové délky. Při malých výškách antén vzhledem k jejich vzdálenosti lze vzdálenost Fresnelova zlomu d_0 vyjádřit jako

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

kde d_0 ... vzdálenost Fresnelova zlomu

h_1 a h_2 ... výšky antén spoje

λ ... je vlnová délka

Všechny parametry jsou uváděny v metrech. Určení Fresnelova zlomu je pro predikci šíření signálu velmi důležité, protože v místě zlomu se výrazně mění závislost útlumu šířením na vzdálenosti. S výškou antén a velikostí buňky se mění i jeho relativní význam. (3)

4.3 Mobilní spoj

Mobilním spojem se rozumí spoj, ve kterém je vysílací anténa pevně umístěna, zatímco přijímací anténa je volně pohyblivá. Nejsložitějším případem pro plánování mobilního spoje je šíření vln v městské zástavbě. Signál, šířící se v zástavbě mezi pevnou a mobilní anténou, je ovlivňován řadou různých fyzikálních mechanismů. Jedná se o odraz, ohyb, rozptyl vlny a difrakci na hranách střech. Tyto jednotlivé mechanismy šíření vln jsou dány především typem okolního prostředí a polohou obou antén mobilního spoje. Častým jevem je vícecestné šíření.

Kromě rovnoměrného poklesu signálu, který je dán především délkou spoje, se při pohybu mobilní stanice přidávají další jevy, tzv. pomalé a rychlé úniky. (2)

4.3.1 Pomalé úniky (Slow fading)

Pomalé úniky představují plynulý pokles signálu se vzdáleností, který je způsobený zastíněním uživatele okolními překážkami (zástavbou, terénem, vegetací apod.). Z hlediska vlnové délky dochází ke kolísání úrovně signálu „pomalu“, tzn. pomalé změny stavu zastínění spoje. Pokles úrovně signálu způsobený pomalými úniky může být velmi velký, až desítky dB.

4.3.2 Rychlé úniky (Fast fading)

Příčinou rychlých úniků je především vícecestné šíření, kdy se od antény vysílací k anténě přijímací šíří velké množství odražených paprsků, které přicházejí z různých směrů, od různých objektů. Takto odražené paprsky mají různou fázi a vlivem fázového sčítání pak při pohybu stanice dochází k rychlému kolísání signálu s periodou asi poloviny vlnové délky. Rychlé úniky jsou vlivem rychle se měnícího prostředí a pohybem uživatele silně proměnné v čase. (2)

5 Popis vybraných modelů

Analytický popis šíření vlny pro mobilní spoje v zástavbě je prakticky neřešitelná úloha. Při šíření vln v zástavbě se uplatňují všechny typy interakcí vlny s překážkami, jako jsou odraz, ohyb či rozptyl. Šíření signálu v náhodně nestacionárním prostředí lze postihnout modelem šíření. Ani nalezení vhodného modelu pro daný typ prostředí však není jednoduché. Vždy se jedná o kompromis mezi přesností modelu, náročností požadavků na vstupní data a složitostí výpočtu. (2)

5.1 Modely šíření pro mikrobuňky

Jak je již uvedeno výše, mikrobuňky mají poloměr v rozmezí 100 m – 1000 m a jejich pevná základnová stanice je umístěna hluboko pod úrovní střech ve výšce přibližně 3 – 6 m nad zemí.

5.1.1 Dual-Slope model

Tento model vychází ze základního empirického modelu. Je určen převážně pro mikrobuňky, ale lze jej využít i ve větších pikobuňkách při přímé optické viditelnosti mezi oběma konci spoje. Od empirického modelu se liší zahrnutím Fresnelova zlomu, přičemž spádový koeficient modelu je rozdílný pro úsek před a za zlomem. Model sdílí všechny výhody i nevýhody modelu empirického.

Výhodou je velmi jednoduchá implementace a rychlý výpočet.

Nevýhody tohoto modelu lze spatřovat ve skutečnosti, že výpočet nerespektuje konkrétní geometrickou situaci, lze tedy predikovat pouze úroveň signálu a je použitelný víceméně pouze v homogenním prostředí s hladkým nárůstem ztrát šířením se vzdáleností.

Výpočet aplikujeme rozdílný pro oblast před a po Fresnelově zlomu a dále pak odlišný pro hladký průběh kolem bodu zlomu.

Před Fresnelovým zlomem

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

Po Fresnelově zlomu

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

S hladkým průběhem kolem bodu zlomu

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

L	ztráty šířením [dB]
d	vzdálenost od vysílací antény [m]
L_1	referenční útlum pro vzdálenost 1 m [dB]
n_1	spádový koeficient pro $d < d_0$, typicky $n_1 = 2$
n_2	spádový koeficient pro $d > d_0$, typicky $n_2 = 4$
d_0	bod zlomu, typicky Fresnelův zlom [m]

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

h_1, h_2 výšky antén spoje [m]

λ vlnová délka [m]

5.1.2 Model ITU - R P.1411

Doporučení ITU-R obsahuje semi-empirické modely šíření pro krátké vzdálenosti do 1 km a mimo to i jednoduchý výpočet ztrát šířením pro městské mikrobuňky v UHF pásmu. Výpočet je rozdělen na dva případy. První případ předpokládá přímou optickou viditelnost mezi oběma anténami a v druhém případě je spoj zastíněn překážkami.

Výpočet pro přímou viditelnost mezi MS a BTS principiálně vychází z empirického modelu Dual-Slope. Výsledkem výpočtu, který přímo zahrnuje i empirické parametry pro UHF pásmo a typickou geometrii městské buňky, je interval, v němž se pohybuje modelovaná hodnota ztrát šířením.

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

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

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

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

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

$$L_{BP} = 20 \log \frac{4\pi d_0}{\lambda} = 20 \log \frac{8\pi h_1 h_2}{\lambda^2}$$

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]

Provádíme – li **výpočet při zastínění**, pak je střední hodnota ztrát šířením L [dB] dána jako:

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

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

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

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

w_1, w_2 šířky ulic [m]

α úhel [rad], který svírají ulice ($0,6 < \alpha < \pi$)

Platnost modelu je omezena na pásmo 800 – 2000 MHz a pro antény v běžných výškách hluboko pod úrovní okolních střech husté zástavby.

5.1.3 Bergův rekurzivní model

Tento model je určen pro predikci střední hodnoty ztrát šířením v městské zástavbě při neexistenci přímé viditelnosti mezi oběma konci spoje, tj. v případech, kdy nelze použít empirický model. Obě antény musejí být umístěny hluboko pod úrovní střech. Výpočet respektuje konkrétní členění zástavby v mikrobuňce, k jeho zhotovení je zapotřebí 2D plán měřeného prostředí.

Výpočet lze rozdělit na tři fáze:

1. Práce s 2D plánkem okolní zástavby – určení nejkratší možné spojnice mezi oběma konci mobilního spoje.

Skutečná délka segmentované spojnice z bodu základnové antény do n -tého uzlu je:

$$d_n = \sum_{j=1}^n r_{j-1}$$

d_n délka spojnice z 0-tého do n -tého uzlu [m]

r_j délka segmentu [m] mezi uzly s indexy j a $j + 1$

2. Výpočet tzv. fiktivní délky lomené spojnice mezi pevnou anténou (uzlem $j = 0$) a j -tým uzlem ($j > 0$) je dána rekurzivními vztahy:

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

$$D_j = k_j r_{j-1} + D_{j-1}$$

D_j fiktivní délka spojnice z počátku (od pevné antény) 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 [°]

q empirický parameter modelu, doporučená hodnota $q = 0,5$

v empirický parameter modelu, doporučená hodnota $v = 1,5$

Počáteční hodnoty pro rekurzivní výpočet jsou $k_0 = 1, D_0 = 0$.

3. Aplikace Dual-Slope modelu na fiktivní délku spoje se spádovými koeficienty 2 a 4 pro vzdálenosti před a za Fresnelovým zlomem.

Před zlomem

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi D_N}{\lambda} \right) \quad d_n \geq d_0$$

Za zlomem

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

L 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]

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

h_1, h_2 výšky antén spoje [m]

λ vlnová délka [m]

5.2 Modely šíření pro makrobuňky

Pro naše účely jsou makrobuňky neoptimálnějším prvkem zkoumání. Poloměr těchto buněk se pohybuje v rozmezí od 1 do 30 km. Antény základnových stanic jsou umístěny nad úrovní okolních překážek. K tomuto účelu jsou využívány výškově výrazné prvky okolí – komíny či stožáry elektráren, sila, panelové domy, ale také střechy kostelů či rozhledny. Pokud okolí neskýtá žádnou podobnou možnost, jsou antény základnových stanic umísťovány na samostatné stožáry.

5.2.1 Hata model

Jedná se o jeden z nejstarších a nejrozšířenějších modelů šíření vln v zástavbě založen na principu základního empirického modelu. Původně vznikl odvozením z rozsáhlých měření v hustě osídlených tokijských ulicích. Postupně byl mnoha autory upravován pro konkrétní podmínky jiných měst. Pro naše účely uvedeme úpravu označovanou jako COST231 Hata Model.

Výpočet střední hodnoty ztrát šířením [dB]:

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

Empirické parametry

$$L_1 = C_1 + C_2 \log f - 13,82 \log h_b - a(h_m) + C_0$$

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

L střední hodnota ztrát šířením [dB]

d vzdálenost [km]

f kmitočet [MHz]

h_b výška pevné antény [m]

h_m výška mobilní antény [m]

$C_0 = 0$ koeficient pro městskou zástavbu

$C_0 = 3$ koeficient pro hustou městskou zástavbu

$C_0 = -2 \left(\log \frac{f}{28} \right)^2 - 5,4$ koeficient pro předměstskou zástavbu

$C_0 = -4,78(\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94$ koeficient pro otevřená prostranství

$C_1 = 69,5$ pro $150 \text{ MHz} < f < 1000 \text{ MHz}$

$C_1 = 46,3$ pro $1500 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$

$C_2 = 26,16$ pro $150 \text{ MHz} < f < 1000 \text{ MHz}$

$C_2 = 33,9$ pro $1500 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$

$a(h_m) = h_m(1,1 \log f - 0,7) - (1,56 \log f - 0,8)$ pro předměstskou zástavbu

$a(h_m) = 8,29[\log(1,54h_m)]^2 - 1,1$ pro $f < 200 \text{ MHz}$

$a(h_m) = 3,2[\log(17,75h_m)]^2 - 4,97$ pro městskou zástavbu a $f < 400 \text{ MHz}$

Limity a podmínky modelu

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

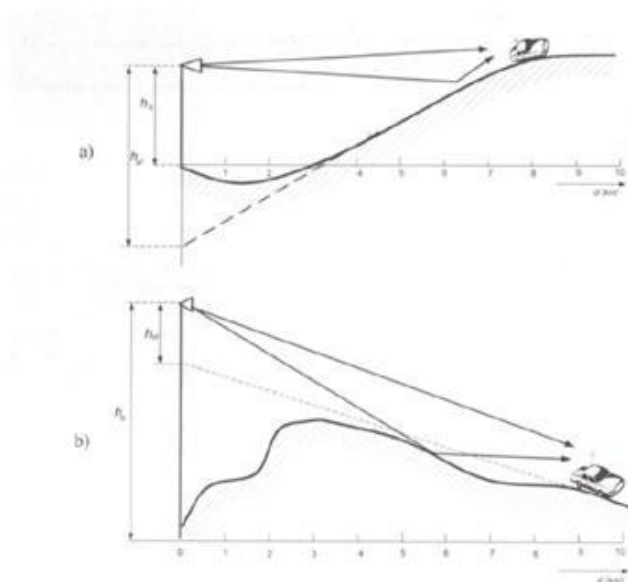
$30 \text{ m} < h_b < 200 \text{ m}$

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

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

5.2.2 Lee model

Další z modelů, který je určen pro výpočet útlumu při šíření vln zástavbou v městských makrobuňkách. Vychází ze základního empirického modelu, navíc umožňuje korekci pro nerovnosti terénu a určení celkové výkonové bilance spoje. Do výpočtu je tedy nutno zahrnout též konkrétní profil terénu na spojnici základnové a mobilní stanice. Parametry modelu jsou optimalizovány pro frekvenční pásmo 800/900 MHz.



Obrázek 8 - Určení efektivní výšky antény

Výpočet pro přímou viditelnost probíhá skrze následující rovnici:

$$L(d) = L_1 + 10n \log d - 20 \log \frac{h_{ef}}{h_b}$$

L	ztráty šířením [dB]
d	vzdálenost od vysílací antény [m]
L ₁	referenční útlum [dB] pro vzdálenost 1 m
h _b	výška pevné antény BTS [m]
h _{ef}	efektivní výška pevné antény BTS [m]

Pro každou polohu mobilní antény je nutno zvlášť vyhodnotit efektivní výšku pevné antény tak, aby bylo možno určit vliv terénního profilu na výsledky výpočtu. V případě, že nebudeme zohledňovat terénní nerovnosti, $h_{ef} = h_b$.

$L_1 = 91,3 \text{ dB}$ $n = 4,35$ pro otevřený prostor

$L_1 = 104,0 \text{ dB}$ $n = 3,84$ pro předměstí

Je-li spojnice mezi oběma koncovými body spoje zastíněna terénními nerovnostmi, použijeme následující **výpočet při zastínění**:

$$L(d) = L_1 + 10n \log d - 20 \log \frac{h_{ef}}{h_b} + L_{dif}$$

L_{dif} přídavné ztráty difrakcí na překážce [dB]

Hodnotu efektivní výšky pevné antény při zastínění získáme tím, že uvažujeme tečnu k profilu terénu zastíňující překážky.

$$v = h_p \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

$$v \geq 1 \qquad L = 0$$

$$0 \leq v < 1 \qquad L = 20 \log(0,5 + 0,62v)$$

$$-1 \leq v < 0 \qquad L = 20 \log(0,5e^{0,95v})$$

$$-2,4 \leq v < -1 \qquad L = 20 \log\left(0,4 - \sqrt{0,1184 - [0,1v + 0,38]^2}\right)$$

$$v < -2,4 \qquad L = 20 \log\left(-\frac{0,225}{v}\right)$$

v ztráty difrakcí na překážce získané empirickým výpočtem

5.2.3 Walfish-Ikegami model

Semi-empirický model, který vznikl díky projektu COST kombinací dvou modelů Walfish a Ikegami, aplikovatelný na pravidelnou zástavbu. Je založen na principech opakované difrakce elektromagnetické vlny na hranách střech. Pro výpočet difrakce je použito empirické přiblížení. Někdy bývá též označován jako COST231 Walfish-Ikegami model. Budeme-li považovat za dominantní mechanismus šíření vlny difrakci přes střechy budov, lze ho omezeně aplikovat také v mikrobuňkách.

Platnost modelu je omezena následovně:

$$800 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$$

$$4 \text{ m} < h_b < 50 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} < h_m < 3 \text{ m}$$

$$200 \text{ m} < d < 5 \text{ km}$$

Pro výpočet je nutné znát následující parametry, přičemž pravidelnou zástavbu představují identické, pravidelně uspořádané bloky.

h_R [m] výška identických bloků představujících pravidelnou zástavbu

b [m] pravidelné odstupy mezi jednotlivými identickými bloky

w [m] šíře ulic mezi bloky

h_b [m] výška pevné antény

h_m [m] výška mobilní antény

Výpočet pro přímou optickou viditelnost mezi oběma konci spoje

Empirická rovnice, jež byla určena na základě měření ve Stockholmu:

$$L = 42,6 + 26 \log d + 20 \log f$$

L celkový střední útlum šířením [dB]

d vzdálenost [km] mezi anténami $d > 0,02 \text{ km}$

f frekvence [MHz]

Výpočet při zastínění spoje

$$L = FSL(d) + L_{msd} + L_{rts}$$

$FSL(d)$ ztráty volným prostorem [dB] pro vzdálenost d

L_{msd} ztráty [dB] způsobené mnohonásobnou difrakcí vlny
na střeších bloků mezi pevnou a mobilní anténou

L_{rts} ztráty [dB] vzniklé difrakcí na hraně střechy posledního bloku u mobilní antény

Zároveň platí následující vztahy:

V případě platnosti $L_{msd} + L_{rts} < 0$, je $L = FSL(d)$.

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b$$

$$\begin{aligned}
 L_{bsh} &= -18 \log(1 + h_b - h_R) && \text{pro } h_b > h_R \\
 &= 0 && \text{pro } h_b \leq h_R \\
 k_a &= 54 && \text{pro } h_b > h_R \\
 &= 54 - 0,8(h_b - h_R) && \text{pro } h_b \leq h_R \text{ a } d \geq 0,5 \text{ km} \\
 &= 54 - 1,6 d(h_b - h_R) && \text{pro } h_b \leq h_R \text{ a } d < 0,5 \text{ km} \\
 k_d &= 18 && \text{pro } h_b > h_R \\
 &= 18 - 15(h_b - h_R)/h_R && \text{pro } h_b \leq h_R \\
 k_f &= -4 + 0,7\left(\frac{f}{925} - 1\right) && \text{pro předměstí a středně velká města} \\
 &= -4 + 1,5\left(\frac{f}{925} - 1\right) && \text{pro metropolitní centra}
 \end{aligned}$$

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

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

Nejsou-li k dispozici přesné údaje o zástavbě, lze jako orientační vstupní parametry použít následující hodnoty:

$$h_R = (3 \text{ m} \times \text{počet podlaží}) + (3 \text{ m pro sedlové střechy, } 0 \text{ m pro rovné střechy})$$

$$20 \text{ m} < b < 50 \text{ m}$$

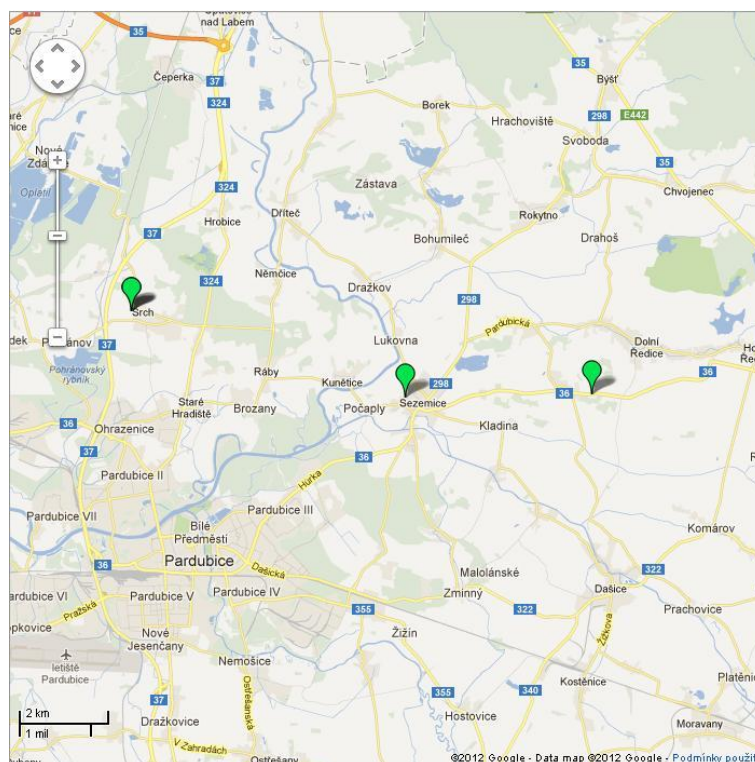
$$w = b/2$$

$$\varphi = 90^\circ$$

6 Výběr a popis konkrétních základnových stanic

Pro získání měřených hodnot přijímaného výkonu byly vždy vybrány základnové stanice umístěné vysoko nad terénem, u kterých je předpoklad velkého dosahu signálu. Na kratších vzdálenostech se měřený výkon jeví jako konstantní, v případě menších buněk v městské zástavbě je výkon buď přítomen ve velmi dobré kvalitě a poté je náhle signál přerušen výraznou překážkou většinou v podobě budov.

Abychom dosáhli co nejpřesnějších výsledků měření, bylo nutné několikanásobné opakování jednotlivých měření. Vzhledem k této skutečnosti byly vybrány základnové stanice v blízkém okolí města Pardubice.



Obrázek 9 - Mapa vybraných BTS (9)

Základem celého měření jsou data o hodnotě vysílaného výkonu jednotlivých základnových stanic. Abychom tyto hodnoty získali, potřebovali jsme informace o konkrétních vysílacích frekvencích zvolené BTS. Jelikož veškeré vybrané základnové stanice patří mobilnímu operátorovi T-mobile (tato skutečnost byla záměrná s ohledem na SIM kartu v měřicím GSM modemu), obrátili jsme se s žádostí o tyto informace na jejich infolinku a následně přímo na středisko podpory. Nebyli jsme bohužel úspěšní, a tak jsme při určení konkrétních vysílacích frekvencí vycházeli z nejvyšších hodnot frekvenčního spektra zobrazeného v těsné blízkosti základnové stanice, vycházejíc z předpokladu, že nejvyšší naměřené frekvence v tomto místě, jsou vysílacími frekvencemi právě konkrétního vysílače.

6.1 Obec Srch

První vybranou základnovou stanicí je BTS v obci Srch, vzdálené od Pardubic přibližně 8 km severním směrem. BTS je umístěna na západním okraji obce mimo zastavěnou oblast.

Operátor: T-mobile

CID: 20374, 20375, 20376

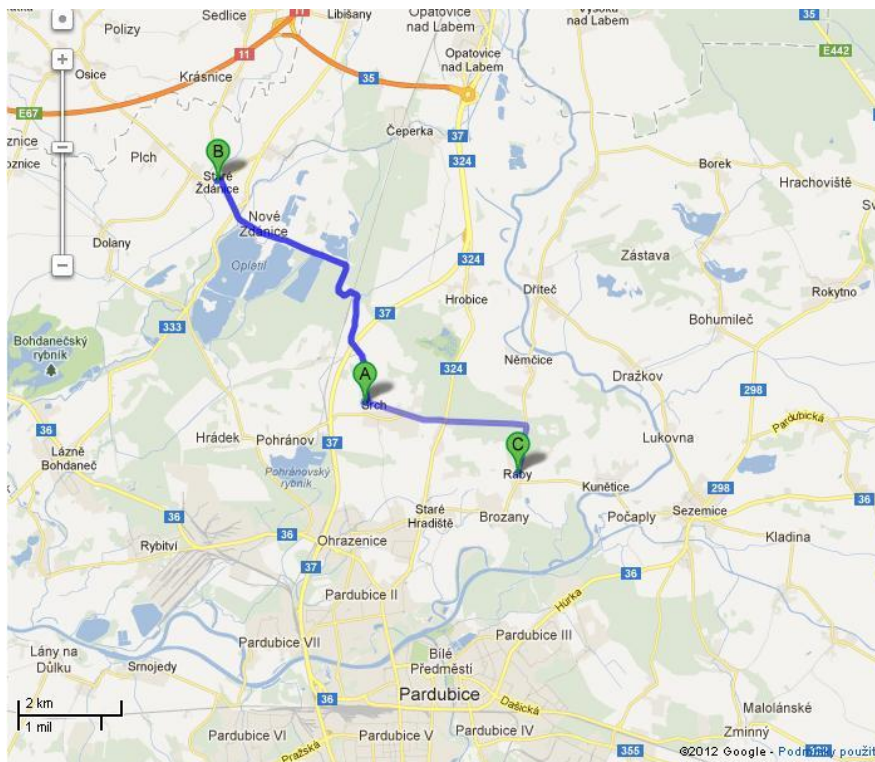
Vysílací frekvence: 938,8 MHz 935,4 MHz 957,2 MHz



Obrázek 10 - Příhradový stožár na okraji obce Srch (10)

6.1.1 Trasy měření BTS Srch

Při měření jsme se od této stanice postupně vzdalovali dvěma směry po místních komunikacích. Severozápadním směrem jsme zamířili do obce Staré Ždánice. Jihovýchodně ležící obec Ráby byla cílem dalšího měření této BTS.



Obrázek 11 - Měřené trasy pro BTS v obci Srch (9)

Srch – Staré Ždánice: 6500 m

Srch – Ráby: 4450 m

6.2 Obec Sezemice

Další měřenou základnovou stanicí je BTS na severozápadním okraji obce Sezemice, která leží přibližně 7 km severozápadně od Pardubic.

Operátor: T-mobile

CID: 20367, 20368, 20369

Vysílací frekvence: 938,6 MHz

956 MHz

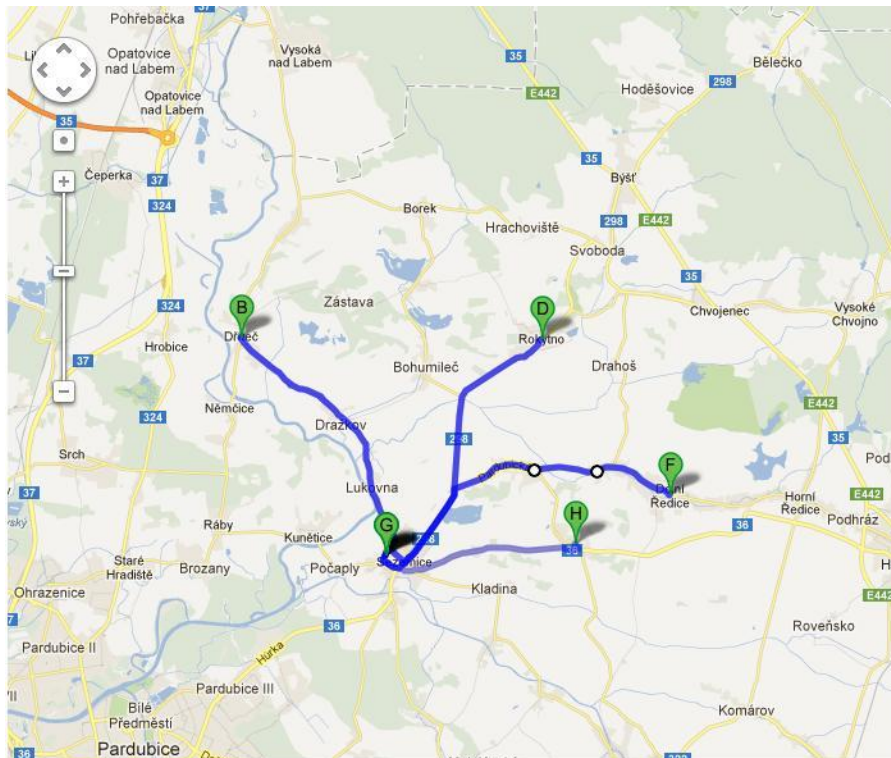
941,6 MHz



Obrázek 12 - Příhradový stožár SZ od obce Sezemice (10)

6.2.1 Trasy měření BTS Sezemice

Tato základnová stanice má pro naše účely optimální pozici. Je snadno dostupná po místních komunikacích hned z několika směrů. Pro měření jsme zvolili tyto trasy:



Obrázek 13 - Měřené trasy pro BTS v obci Sezemice (9)

Sezemice – Dříteč: 5500 m

Sezemice – Rokytno: 6000 m

Sezemice – Dolní Ředice: 6800 m

Sezemice – Časy: 4300 m

6.3 Obec Časy

Poslední základnovou stanicí zvolenou pro měření byla vybrána BTS u silnice I/36 poblíž obce Časy. Tato stanice leží přibližně 11 km severozápadním směrem od Pardubic, zcela mimo zastavěnou oblast.

Operátor: T-mobile

CID: 28281, 28282, 28283

Vysílací frekvence: 939,4 MHz

954,6 MHz

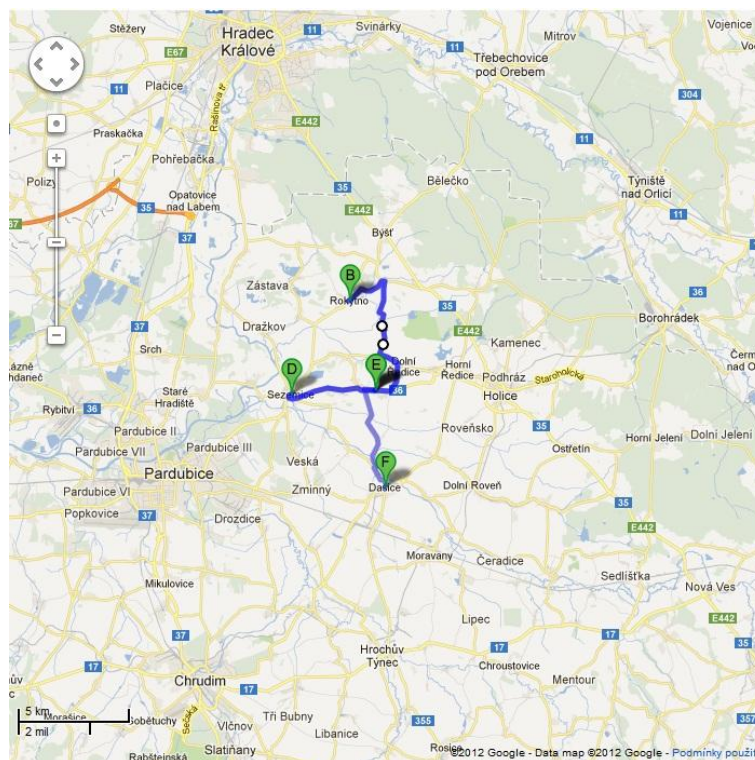
946 MHz



Obrázek 14 - Příhradový stožár u silnice I/36 poblíž obce Časy (10)

6.3.1 Trasy měření BTS Časy

U této základnové stanice jsme provedli měření celkem třemi směry. Ponejprv jsme se vzdálili severním směrem do obce Rokytno, poté západním směrem do obce Sezemice a nakonec jižním směrem do obce Dašice.



Obrázek 15 - Měřené trasy pro BTS poblíž obce Časy (9)

Časy – Rokytno: 8900 m

Časy – Sezemice: 4400 m

Časy – Dašice: 5600 m

7 Měření výkonu signálu v závislosti na vzdálenosti od základnové stanice

Měření probíhalo za využití těchto hardwarových a softwarových prostředků:

Mini-Notebook Sony Vaio VGN-P21Z

GPS Modul Navilock NL-402U

GSM Modem Siemens TC35i

7.1 Přístroje použité k měření

Měření probíhalo na osobním notebooku značky Sony Vaio, ke kterému byla pomocí USB (Universal Serial Bus) rozhraní připojena zařízení popsaná v následujících podkapitolách.

7.1.1 Navilock NL-402U USB GPS / Galileo Receiver

GPS přijímač s velmi citlivou vestavěnou anténou jsme použili k získání GPS pozic, díky kterým je možno následně vykreslit nejen měřenou trasu, ale také nashromáždit informace o délkách měřených úseků či polohách jednotlivých BTS. Získání potřebných údajů - GPS pozic probíhalo pomocí programu GSM Net Monitor 1.0.15.



Obrázek 16 - GPS Modul Navilock NL-402U (11)

7.1.2 Modem Siemens TC35i

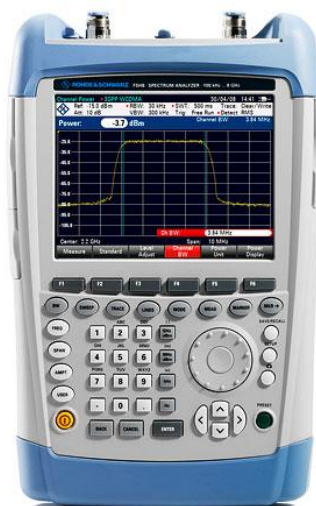
Modem vybavený externím napájením a anténou byl s notebookem propojen skrze převodní kabel USB / sériový port RS-232 značky Gembird. V modemu byla použita SIM karta společnosti T-mobile.



Obrázek 17 - GPS Modem Siemens TC35i (12)

7.1.3 Spektrální analyzátor Rohde&Schwarz FSH8

Data získaná pomocí analyzátoru byla zaznamenávána ručně a spárována s příslušnými výstupními daty z programu GSM Net Monitor 1.0.15.



Obrázek 18 - Spektrální Analyzátor R&S® FSH8 (13)

7.2 Záznam naměřených dat

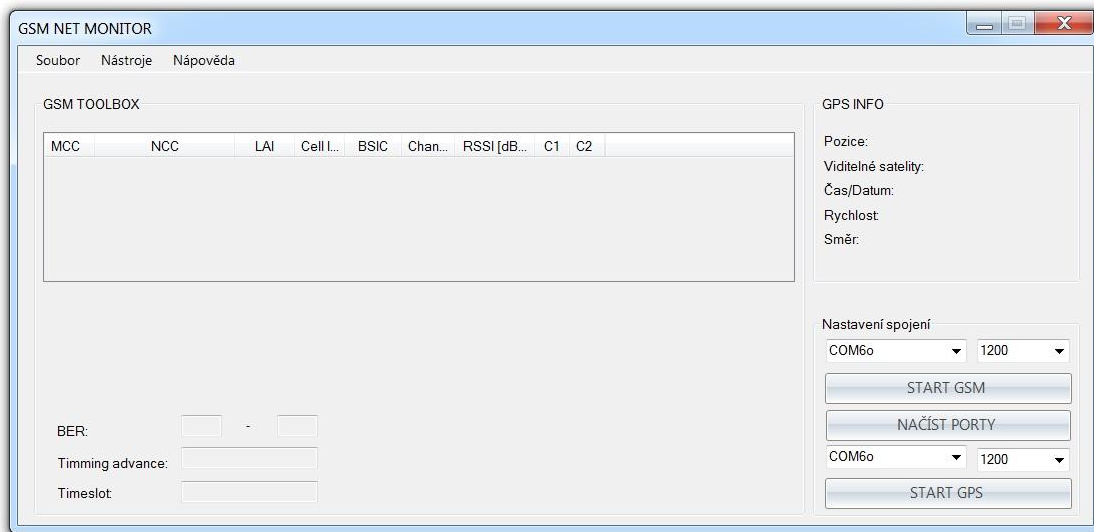
Záznam samotných výsledků měření probíhal především automaticky prostřednictvím programu GSM Net Monitor 1.0.15 a z části ručně do tabulkového procesoru MS Excel®.

7.2.1 GSM Net Monitor 1.0.15

Tento program vytvořil pro účely Univerzity Pardubice v rámci své bakalářské práce s názvem Monitor sítě GSM student Ondřej Karas v roce 2008.

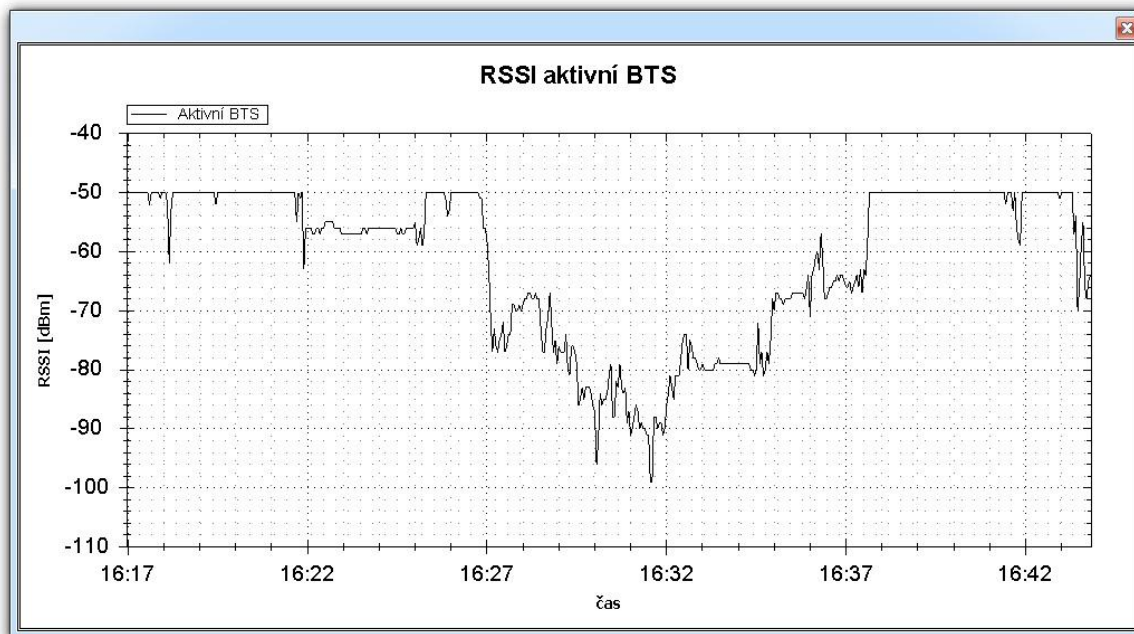
Program je určen k diagnostice sítě GSM, a to především v oblasti zjišťování údajů o dostupných základnových stanicích předem určeného operátora ve sledované oblasti. Jedná se o údaje, které je možné získat bez jakékoliv součinnosti s mobilním operátorem pouze na základě broadcastových zpráv vysílaných základnovými stanicemi. (14)

Uživatelské rozhraní tohoto programu je jednoduché, přehledné a jeho obsluha je velice snadná.

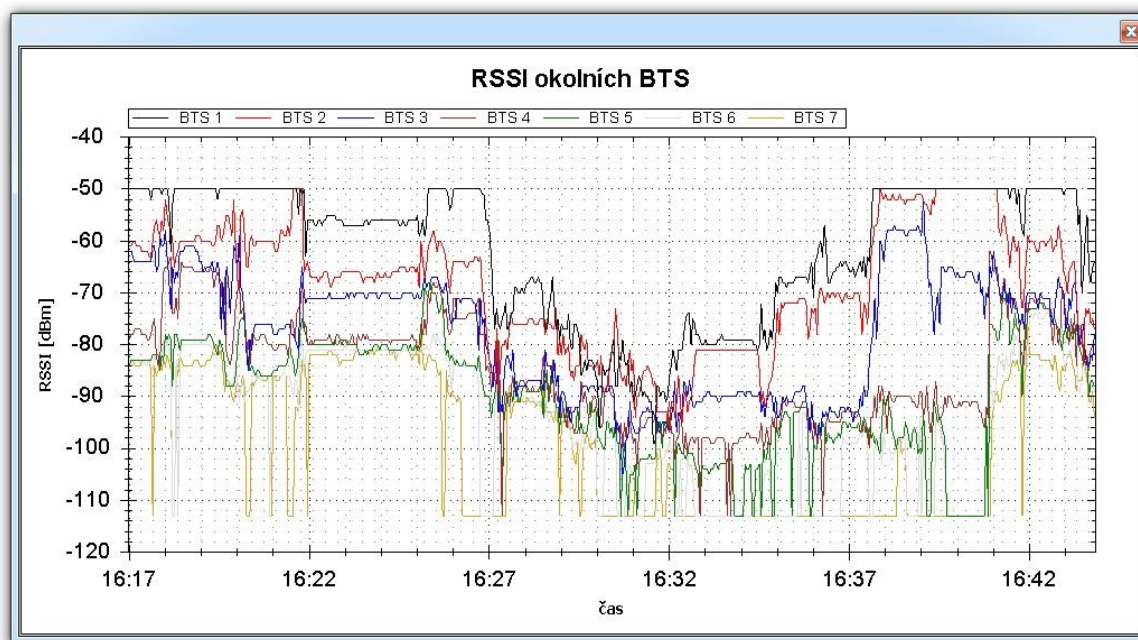


Obrázek 19 - GUI programu GSM Net Monitor

Program nabízí možnost automatického vykreslování grafů RSSI (Received Signal Strength Indication) aktivní buňky v závislosti na čase (obr. 20) a RSSI okolních BTS (obr. 21) též v závislosti na čase.



Obrázek 20 - RSSI aktivní buňky dle GSM Net Monitoru



Obrázek 21 - RSSI okolních BTS dle GSM Net Monitoru

7.3 Zpracování výsledků

Zpracování naměřených dat bylo provedeno za využití programů Matlab[®] a Microsoft[®] Office Excel[®] 2007.

7.3.1 Postup zpracování získaných dat

Data získaná pomocí aplikace GSM Net Monitor 1.0.15 bylo třeba upravit do požadované podoby. Zaznamenané GPS souřadnice byly pomocí jednoduchého skriptu konvertovány do formátu, ze kterého byly následně určovány vzdálenosti mezi jednotlivými měřeními a následně měřené vzdálenosti od příslušné BTS.

Identifikátory jednotlivých BTS stanic, resp. buněk (CID – Cell ID) jsou ve výstupních datech uváděny v hexadecimálním tvaru (HEX), abychom mohli výkony jednotlivých vysílačů přiřadit ke konkrétním BTS stanicím, resp. buňkám, musel jejich zpracování též předcházet převod z dekadické do hexadecimální soustavy.

Dalším krokem byla příprava dat na zpracování v programu Excel[®]. Jelikož GSM Net Monitor zaznamenává výkon s přiřazeným HEX identifikátorem buňky vždy sedmi nejsilnějších vysílačů, dochází vlivem handoveru k přepojování jednotlivých pozic, a tedy i ke smísení CID a odpovídajících výkonů. Pomocí dalšího skriptu došlo k jejich rozřazení, rozdělení naměřených výkonů do jednotlivých sloupců a přiřazení konkrétních GPS souřadnic v upraveném tvaru.

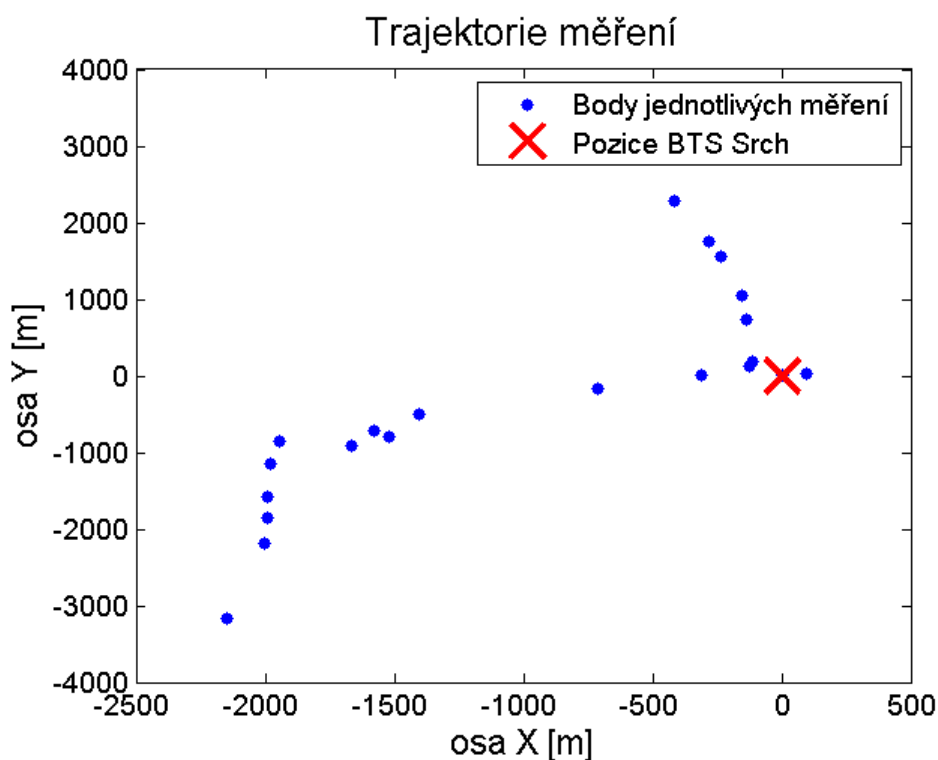
Za pomoci Matlabu[®] a Excelu[®] došlo ke grafickému zpracování naměřených, a následně do požadovaného tvaru upravených, hodnot, které je uvedeno v následující kapitole.

8 Analýza měřených dat

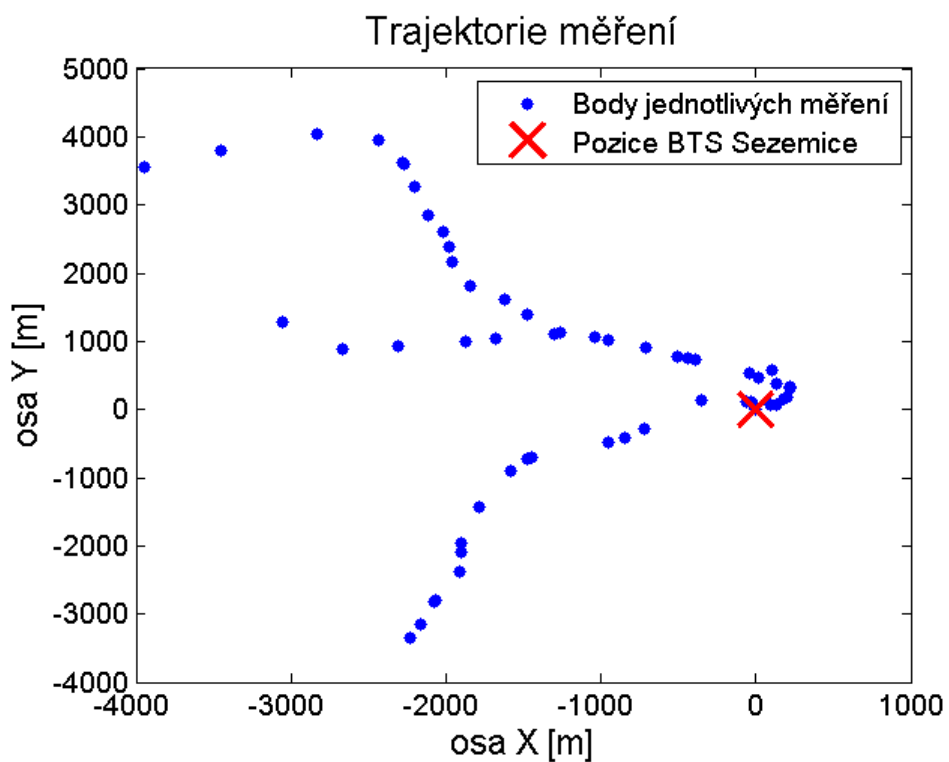
Analýza výsledků byla prováděna za pomoci skriptovacího programovacího jazyka Matlab[®] v kombinaci s tabulkovým procesorem Excel[®]. Výsledkem jsou grafická znázornění závislosti vysílacího výkonu BTS na vzdálenosti a trajektorie, která byla při měření absolvována. Pro přesnější představu o porovnání získaných dat s vybranými modely poslouží grafické zpracování z MS Excel[®].

8.1 Grafické zobrazení trajektorií měření jednotlivých BTS

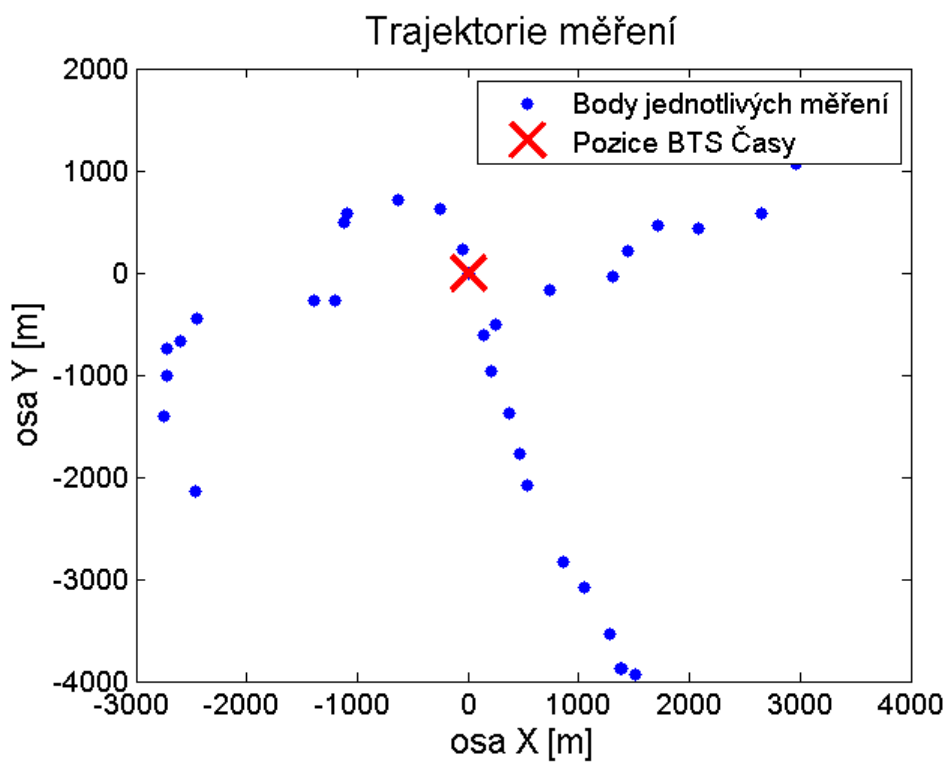
Grafické zobrazení trajektorií měření je výsledkem GPS pozic jednotlivých záznamových bodů a mělo by přibližně odpovídat absolvované trase zobrazené na obrázku měřené trasy konkrétní BTS v 6. kapitole věnované konkrétnímu výběru BTS stanic.



Obrázek 22 - Trajektorie měření v okolí BTS Srch



Obrázek 23 - Trajektorie měření v okolí BTS Sezemice



Obrázek 24 - Trajektorie měření v okolí BTS Časy

8.2 Grafické znázornění závislosti výkonu signálu základnové stanice na vzdálenosti

Následující grafy znázorňují závislost naměřených výkonů signálů jednotlivých vysílačů základnové stanice v monitorovaném pásmu 935 – 960 MHz. Přímo v grafu dochází k porovnání se základním empirickým modelem, pro jehož výpočet byly zvoleny následující parametry:

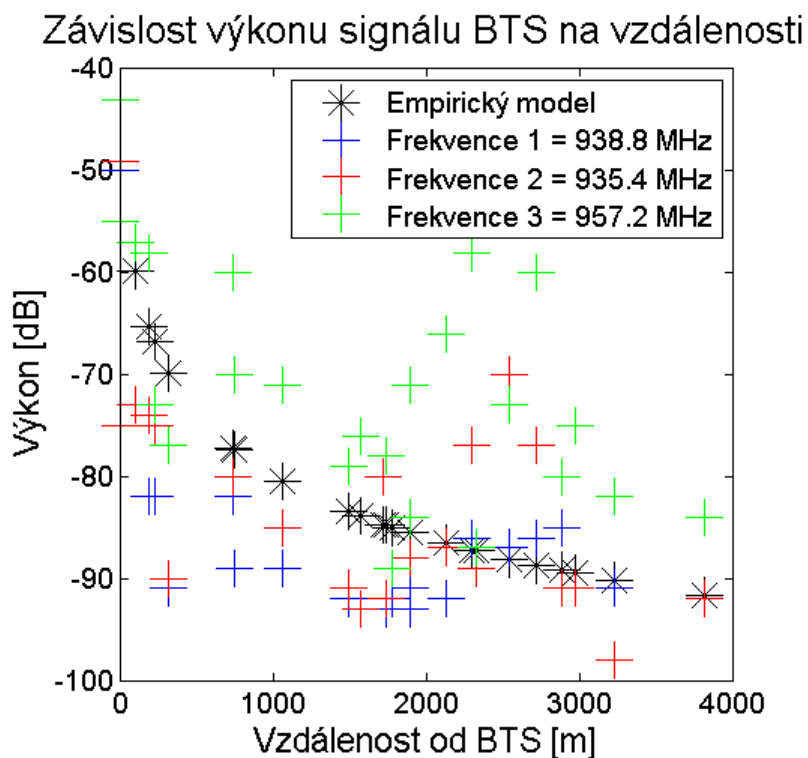
$d_1 = 1$ referenční vzdálenost [m] zvolena dle doporučení (2)

$L_1 = 20$ referenční útlum [dB] empiricky vycházející z naměřených hodnot

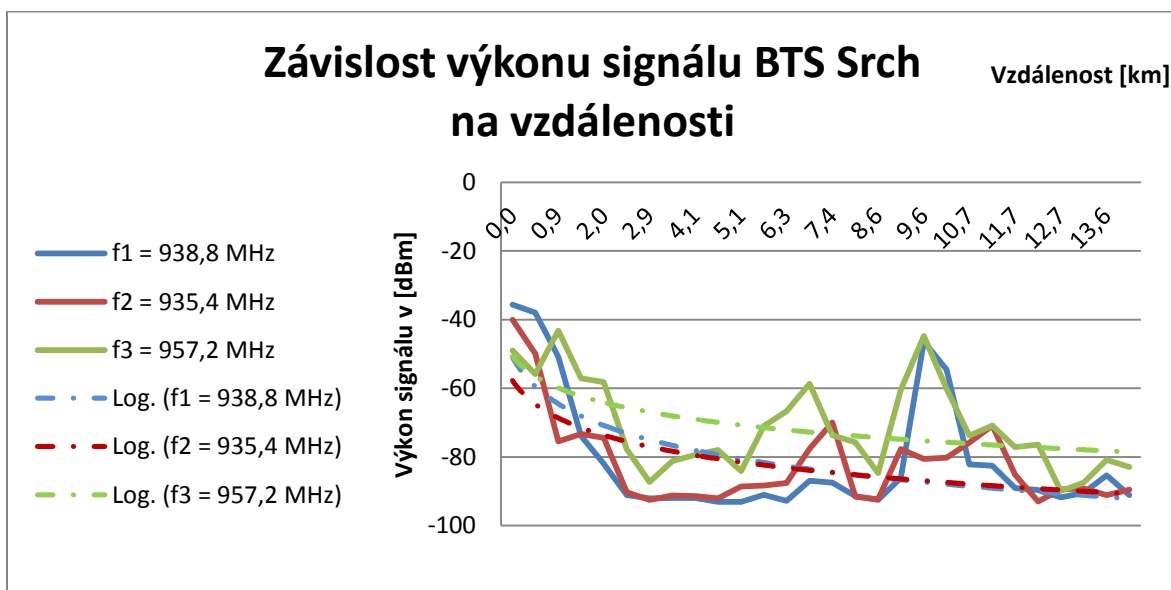
$n = 2$ spádový koeficient pro volná prostranství

Jak je z následujících grafů patrné, výkon má na jednotlivých frekvencích poměrně velký rozkmit, avšak logaritmická spojnice trendu naměřených výkonů se vzdáleností pomalu klesá a kopíruje empirický model. Výkony jednotlivých frekvencí jsou si dosti podobné – klesají s dosti podobným trendem.

8.2.1 Porovnání vzdálenostně závislých výkonových grafů pro základnovou stanici v obci Srch

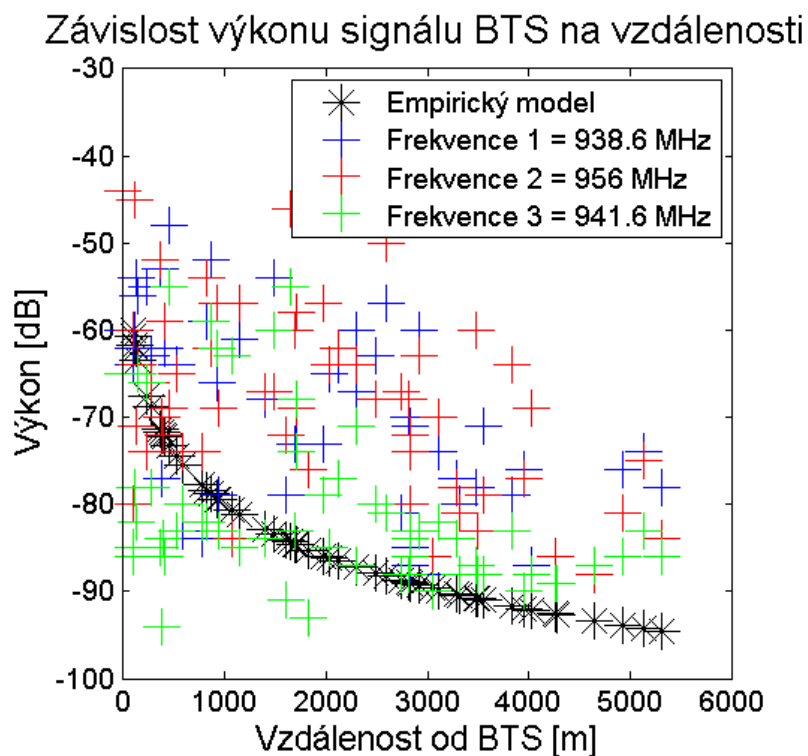


Obrázek 25 - Závislost výkonu signálu BTS Srch na vzdálenosti

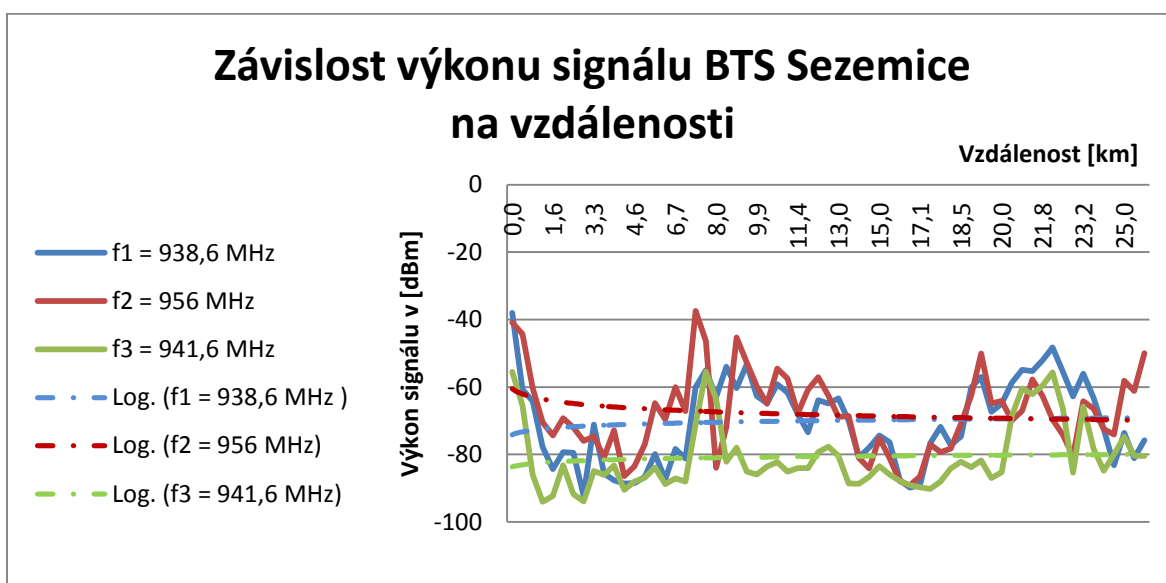


Obrázek 26 - BTS Srch: Znázornění logaritmické spojnice trendu

8.2.2 Porovnání vzdálenostně závislých výkonových grafů pro základnovou stanici v obci Sezemice



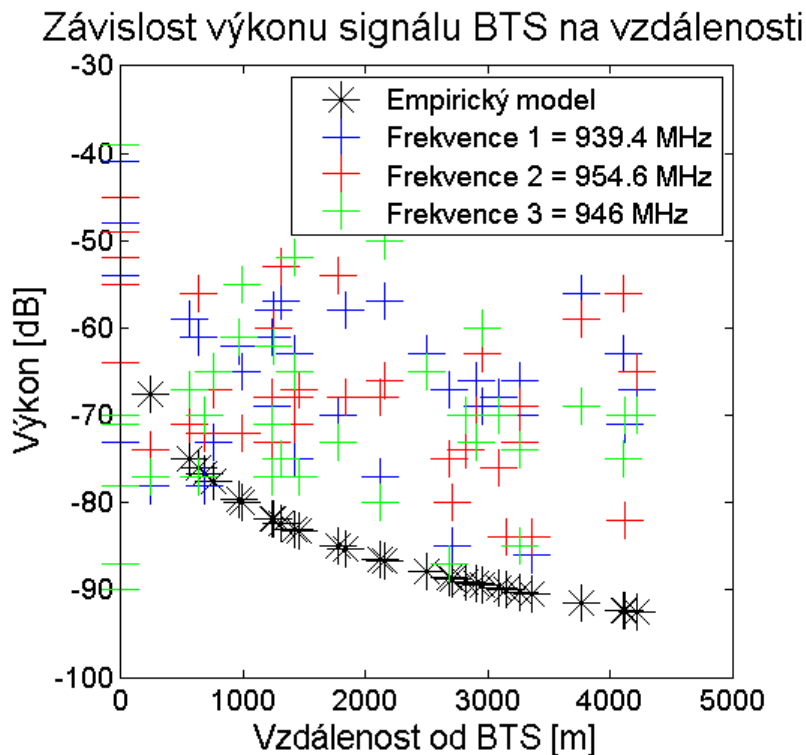
Obrázek 27 - Závislost výkonu signálu BTS Sezemice na vzdálenosti



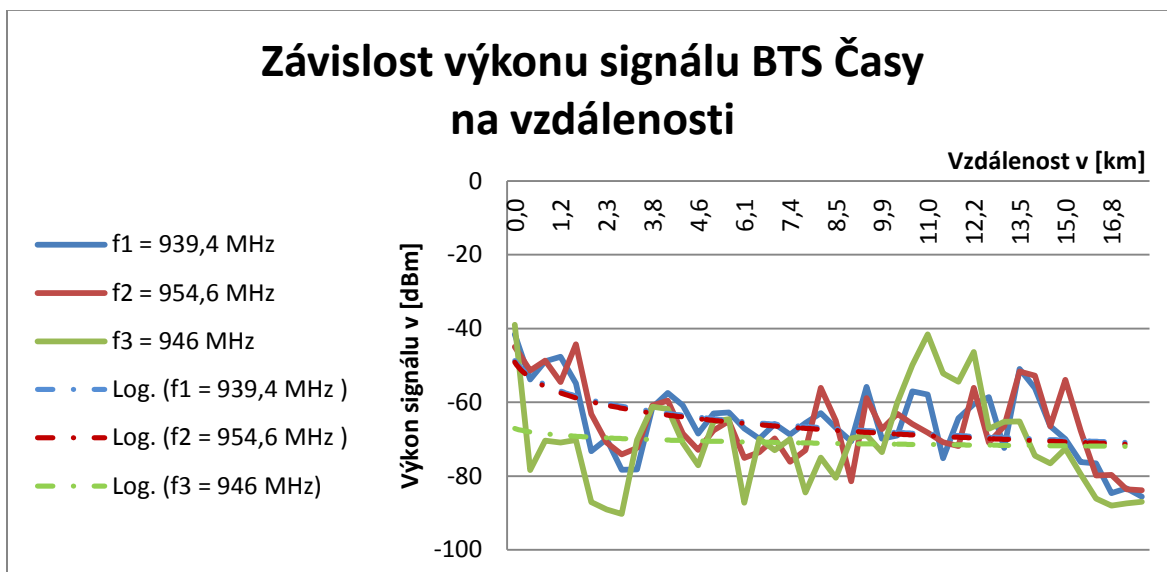
Obrázek 28 - BTS Sezemice: Znázornění logaritmické spojnice trendu

8.2.3 Porovnání vzdálenostně závislých výkonových grafů pro základnovou stanici poblíž obce Časy

r



Obrázek 29 - Závislost výkonu signálu BTS Časy na vzdálenosti



Obrázek 30 - BTS Časy: Znázornění logaritmické spojnice trendu

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo porovnání reálného měření s vybranými modely šíření elektromagnetických vln. Prvním krokem k naplnění vytyčeného cíle bylo zpracování úvodu této práce, který byl z části věnován šíření elektromagnetických vln, v dalších kapitolách došlo k rozboru GSM standardu a poslední výraznou součástí teoretické roviny této práce je část věnovaná vybraným modelům šíření vln.

Dalším logickým krokem ke zpracování zadané úlohy byl návrh měření, díky kterému bychom získali podklady k naplnění cíle této práce. Proto považuji volbu základnových stanic, ze kterých v praktické části čerpáme potřebná data, za stěžejní. Po dlouhé úvaze a několika zkušebních měřeních jsem se rozhodla pro volbu základnových stanic s vysílači společnosti T-mobile umístěných v blízkosti Pardubic a z hlediska okolního terénu umístěných mimo zástavbu. Pardubický kraj je sám o sobě z geomorfologického hlediska příhodný pro naše účely, zvolené vysílače jsou navíc umístěny na příhradových stožárech ve výšce přibližně 15 – 20 m, aby bylo umožněno šíření vln do volného prostoru na velké vzdálenosti.

Původní záměr provést potřebná měření pouze s využitím GPS modulu v kombinaci s GSM Modemem za využití programu GSM Net Monitor 1.0.15 byl narušen skutečností, která je patrná z obrázků č. 20 a 21. Veškeré záznamy výkonu vysílaného signálu prováděné za pomoci této měřicí metody byly omezeny maximální možnou hodnotou -50 dBm. Abychom dosáhli co nejvěrnějších výsledků měření, rozšířili jsme seznam využitých měřicí techniky o přenosný spektrální analyzátor, díky kterému byl tento problém odstraněn.

Naměřená data byla v osmé kapitole porovnána se základním empirickým modelem. Navzdory skutečnosti, že volba základnových stanic nespĺňuje původní zadání bakalářské práce s plánovaným rozбором všech tří typů buněk celulární struktury sítě GSM, se odvažuji domnívat, že je pro účely naplnění cíle této práce dostačující.

Literatura

1. **Vokáč, Luděk.** GSM nemá budoucnost. *Mobil.cz*. [Online] 14. Srpen 2012. mobil.idnes.cz/budoucnost-gsm-019-/mobilni-operatori.aspx?c=A120807_205728_mobilni-operatori_vok.
2. **Pechač, Pavel.** *Modely šíření vln v zástavbě*. Praha : BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7003-186-1.
3. **Pechač, Pavel a Zvánovec, Stanislav.** *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. Praha : BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7.
4. **Richtr, Tomáš.** Technologie pro mobilní komunikaci: Tomáš Richtr. *Web Tomáš Richtr*. [Online] <http://tomas.richtr.cz/mobil/index.htm>.
5. **Žalud, Václav.** *Moderní radioelektronika*. Praha : BEN - technická literatura, 2000. ISBN 80-86056-47-3.
6. Český telekomunikační úřad. *Web Českého telekomunikačního úřadu*. [Online] Zář 2011. http://www.ctu.cz/cs/download/statisticke_udaje/rok_2011/zprava_vyvoj_trhu_ek_2010.pdf.
7. GSM Phase Implementation. *Web GSM Phase Implementation*. [Online] 2006. <http://cellular.co.za/gsm-phase.htm#GSM Phase 1 features>.
8. **Hanus, Stanislav.** *Bezdrátové a mobilní komunikace*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-1833-8.
9. Mapy Google. *Google*. [Online] 2012. <https://maps.google.cz>.
10. **Hornýák, Jan, Straka, Jan a Bulena, Petr.** GSMweb. [Online] <http://gsmweb.cz>.
11. Navilock. [Online] navilock.com.
12. Reliance. [Online] www.reliance.cz.
13. Rohde&Schwarz . [Online] <http://www2.rohde-schwarz.com/>.
14. **Karas, Ondřej.** Digitální knihovna Univerzity Pardubice. [Online] 2008. <http://hdl.handle.net/10195/30176>.