

Obsah

1 Úvod	4
1.1 Upřesnění zadání projektu:	4
1.2 Etapy řešení projektu:.....	4
1.3 Obecné schéma radiokomunikačního systému	5
2 CDMA (Code Division Multiple Access)	6
2.1 Kódový multiplex CDM	6
2.2 Plošná struktura	8
2.3 Využití kmitočtového pásma	9
2.4 Interference	11
3 Stanovení kapacity CDMA sítě (single cell)	12
3.1 Program pro MATLAB (single cell system)	13
4 Buňková síť CDMA	16
4.1 Rozšíření systému	18
4.2 Regulace výkonu uplink kanálu	18
5 Určení kapacity uplink kanálu pro CDMA síť	19
5.1 Pravděpodobnost chyby	21
6 Grafická simulace rovnic v programu MATLAB	22
6.1 Ovlivňující faktory.....	23
7 Určení kapacity downlink kanálu CDMA síť s přiřazením výkonu	26
7.1 Pravděpodobnost chyby	27
8 Program pro simulaci provozního zatížení systému	28
8.1 Krátký popis programu pro MATLAB.....	29
9 Shrnutí CDMA systémů s ohledem na jejich kapacitu:	29
10 Závěr	30
10.1 Budoucí práce	31

11 Seznam použitých zkratek	31
12 Seznam použité literatury:.....	32

Seznam obrázků

Obr. 1: Blokové schéma systému s kódovým multiplexem	7
Obr. 2: Zjednodušená struktura celulární sítě	9
Obr. 3: Vícenásobné využití kmitočtů přidělených systému.....	10
Obr.4.: Proces CDMA přenosu	11
Obr. 5.: Závislost kapacity na systémovém zisku	13
Obr. 6.: Závislost kapacity na systémovém zisku	14
Obr. 7.: Zjednodušený blokový diagram celulárního systému: uplink a downlink část systému .	16
Obr. 8. Celulární sestavení: geometrie uplink a downlink kanálu	19
Obr. 9.: Kapacita/sektor uplink kanálu.....	22
Obr. 10.: Kapacita/sektor uplink kanálu.....	23
Obr. 11.: Závislost kapacity na α	24
Obr. 12.: Závislost kapacity na α	24
Obr. 13.: Závislost kapacity na E_b/N_0	25

1 Úvod

1.1 Upřesnění zadání projektu:

„Prostudujte principy systémů s rozprostřeným spektrem. Na základě získaných poznatků stanovte kapacitu izolované buňky CDMA sítě s obecným počtem uživatelů. Dosažené výsledky využijte pro stanovení kapacity části celulární CDMA sítě (několik buněk). Sestavte model sítě umožňující simulaci provozního zatížení sítě a stanovte základní faktory, které v dominantní míře kapacitu sítě omezují.“

1.2 Etapy řešení projektu:

V první části projektu budou vysvětleny základní informace a principy mobilních rádiových sítí s násobným přístupem a kódovým dělením CDMA (Code Division Multiple Access). Pro pochopení všech souvislostí, je přiblížen obecný model radiokomunikačního systému. Práce se hlouběji nezabývá některou z uvedených oblastí, nýbrž je jakýmsi „přehledem“ dané problematiky, pro pozdější detailnější zpracování druhé části projektu - BB2E.

Při realizaci druhé části projektu, BB2E, je jeho původní obsah doplněn výpočtovými vztahy pro stanovení kapacity systému, obsahujícím jednu samostatnou buňku, jejich ověření a grafickou prezentací vypočtených závislostí v grafu. Ten poskytuje názorný pohled na systém při zadaných parametrech a daném počtu uživatelů. Celá tato část projektu se zaměřuje na systém s pouze jednou buňkou a bere v potaz jen zjednodušený model systému.

Poslední, třetí část projektu, neboli bakalářská práce, obsahuje model systému s více buňkami. Jsou zde popsány vztahy mezi proměnnými, které v takovémto systému vystupují a je přiložena grafická prezentace jejich vlivu na kapacitu systému. Je určeno několik faktorů, které ve velké míře kapacitu ovlivňují a následné grafické zobrazení jejich vlivu na výkon systému. Pro tuto část projektu je zhotoven program v Matlabu, dle kterého byly všechny závislosti určeny. Nakonec jsou stručně shrnuty výhody použití právě CDMA systému před jiným, jež vyplývají z teoretických simulací rovnic. V závěru je pak přiloženo zhodnocení výsledků celého projektu.

1.3 Obecné schéma radiokomunikačního systému

Schéma obecného radiokomunikačního systému, se skládá z následujících částí:

- vysílač, jehož základními bloky jsou kodér zdroje, kodér kanálu a modulátor
- přijímač, jehož základními bloky jsou demodulátor, dekodér kanálu a dekodér zdroje

Mezi vysílačem a přijímačem musí signál projít tzv. „rádiovým komunikačním kanálem“, což je prakticky volné prostředí, v němž je informace přenášena pomocí rádiových vln. Rádiový komunikační kanál můžeme popsat parametry, které se dělí na **náhodné a nenáhodné**. Mezi náhodné se řadí např. aditivní bílý Gaussovský šum – AWGN, rušení, únik a mezi **nenáhodné** parametry patří například zpoždění signálu a fázový posuv signálu.

V reálném radiokomunikačním systému nastává ovšem situace, kdy množství informace za jednotku času začíná být omezeno. Tady nastává problém stanovení kapacity systému, jelikož v každém reálném systému existuje nechtěný šum, který nedovoluje nekonečně jemné změny přijatého užitečného signálu. Z toho se tedy dá vyložit **přenosová kapacita** C radiokomunikačního systému, jako množství informace vyjádřené v bitech, jež může být přeneseno komunikačním kanálem systému za 1 sekundu. Je dána Shannonovým - Hartleyovým vztahem:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad [\text{bit} / \text{s}] \quad (1)$$

Kde C je maximální dosažitelná rychlost bezchybného přenosu informace při ideálních podmínkách přenosu informace v systému

B - je šířka pásma radiokomunikačního kanálu,

S - je střední hodnota výkonu signálu na výstupu kanálu

N - je střední hodnota výkonu šumu na výstupu kanálu

Reálná hodnota přenosové kapacity C z tohoto vztahu je samozřejmě vždy jiná, jelikož nikdy nejsme schopni zajistit ideální podmínky pro přenos informace v systému (šum) a proto je více či méně přesná v závislosti na optimálnosti použitých technik. Pokud se rozhodneme optimalizovat systém pro co nejpřesnější výpočty, jeho složitost výrazně vzroste i spolu s cenou takovéhoho systému.

Jak tato práce později ukáže, lze různými kombinacemi proměnných v rovnici dosáhnout stejných výsledků. Například, pokud budeme chtít kapacitu velkých hodnot, můžeme použít velkou šířku pásma a pak už může být poměr signál/šum menší, nebo můžeme šířku pásma zmenšit, ale zase navýšit poměr signál/šum. Každá varianta má své klady a zápory a pro rozhodnutí, zda-li použít tu či onu variantu, je nutno znát chování systému při určitých podmínkách, což je úkolem této práce.

2 CDMA (Code Division Multiple Access)

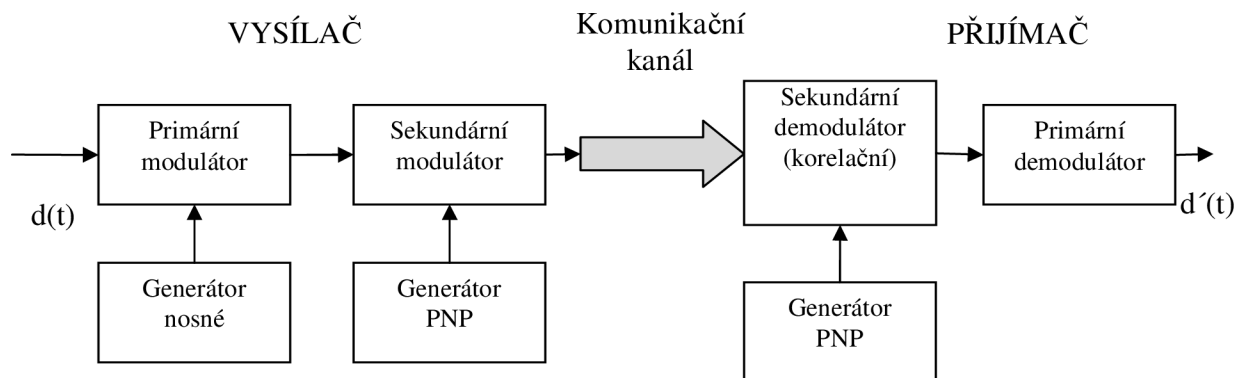
Pro přenos informace v systému s mnohonásobným přístupem CDMA, je použit individuální pseudonáhodný kód, pro každého účastníka, jenž ve vysílači slouží k rozprostření vysílaného signálu do širokopásmové podoby. Takovéto kmitočtové pásmo, je sdíleno nejen ostatními účastníky systému, ale třeba i rozdílnými systémy, které pracují na úplně odlišných principech. Samozřejmě že v reálném systému se na vstup přijímače dostane mnoho různých signálů, ne jen požadovaný užitečný signál. Ten musí být tedy pomocí stejného pseudonáhodného kódu oddělen od zbylých, aby byla získána požadovaná informace. Systém s přístupem CDMA vyžaduje složitou synchronizaci a kapacita systému je určena především mírou interferencí v místě příjmu. Několik uživatelů využívá tedy tentýž radiový kanál, mohou komunikovat současně, ale právě díky kódu, který se u jednotlivých účastníků liší, jsou od sebe rozlišeni.

Komunikační sítě, vytvářené terminály a řídicími zařízeními systému, mají různou topologii a používají buď centrální, nebo distribuované zařízení. Pokud je použito systému s jednorozměrnou topologií místo společného přenosového média pro všechny uživatele, tzn. např. spojení bod-bod, nebo spojení bod-více bodů, vystačí k provozu takového systému určité vhodné metody multiplexování.

2.1 Kódový multiplex CDM

U systémů s rozprostřeným spektrem SS je velmi náročná synchronizace a časování, takže bývají funkčně i obvodově složité. Na obr.1. je nakresleno jednoduché blokové schéma systému, který pro modulaci signálu používá přímou posloupnost (direct sequence).

Modulační signál (zatím ještě v digitální podobě), který nese užitečnou informaci, se v primárním modulátoru moduluje na nosnou vlnu, např. pomocí FSK, PSK aj. Tímto procesem vznikne signál o určité šířce pásma, která bude závislá právě na druhu použité modulace. Modulace bude řádově shodná s šířkou pásma modulačního signálu. Následuje sekundární modulátor, ve kterém se signál dále moduluje pomocným binárním signálem, který je generován generátorem pseudonáhodné posloupnosti PNP. Zde lze definovat pojem **chipová rychlost** (chip rate), což není vlastně nic jiného, než bitová rychlost pseudonáhodného signálu PNP. Chip-rate je tedy volena úmyslně o několik řádu výše, než bitová rychlost signálu modulačního. Z toho logicky vyplývá, že výsledná šířka pásma, dosažená po modulaci je rozhodně větší, než šířka pásma původního signálu.



Obr. 1: Blokové schéma systému s kódovým multiplexem s přímou modulací kódovou posloupností

Signál musí projít komunikačním kanálem, kde se na něj superponují další rušivé signály. Souhrn všech těchto signálů se objeví na přijímací straně, kde se signál přivede do sekundárního demodulátoru PSK, na jehož druhý vstup se opět připojí binární signál z generátoru pseudonáhodné posloupnosti PNP. Ten svou činností řídí přesně v souladu s algoritmem a synchronizací generátoru na vysílací straně. Z tohoto stupně se signál dostává už jako úzkopásmový a je třeba jej už jen demodulovat v primárním demodulátoru.

Pseudonáhodná posloupnost PNP je pseudonáhodný binární signál o délce 10^7 až 10^{33} taktů (chipů). Abychom předešli nežádoucí synchronizaci přijímače v krátkém časovém intervalu, délka takovéto posloupnosti musí být dostatečně velká. Současně se taky požaduje aby generace posloupnosti nebyla nijak složitá.

V podstatě jde přirovnat generátory PNP k posuvným registrům, majícím lineární, nebo nelineární zpětnou vazbu s pamětí. Takovéto generátory jsou potom realizovány mikroprocesorem s vlastní pamětí, ve které je uložen program. Ideální PNP musí mít impulzní autokorelační funkci $R_x(\tau)$ a nulovou vzájemnou korelační funkci $R_{xy}(\tau)$. Tento fakt zajistí, že každá vygenerovaná posloupnost půjde lehce rozlišit od ostatních posloupností v systému.

Pokud shrneme tyto požadavky, zjistíme, že jim nejlépe vyhovují Barkerovy kódy, Huffmanovy posloupnosti, Goldovy kódy a Walshovy kódy. Dalším faktorem je ještě kmitočet pseudonáhodného signálu, který musí být vysoký, abychom dostali dostatečně rozšířené kmitočtové spektrum, tzn. aby se snížila spektrální hustota signálu.

Podle způsobu rozšíření spektra u systémů s kódovým multiplexem, rozlišujeme systémy:

- s přímou modulací kódovou posloupností DS (direct sequence), kde nosná je přímo modulovaná digitálním signálem, který má bitovou rychlost mnohem vyšší, než má informační signál
- s kmitočtovým skákáním nosné FH (Frequency hopping), kde kmitočet nosné se mění skokem podle PNP (používají se rychle přeladitelné kmitočtové syntezátory řízené PNP)
- hybridní DS-FH

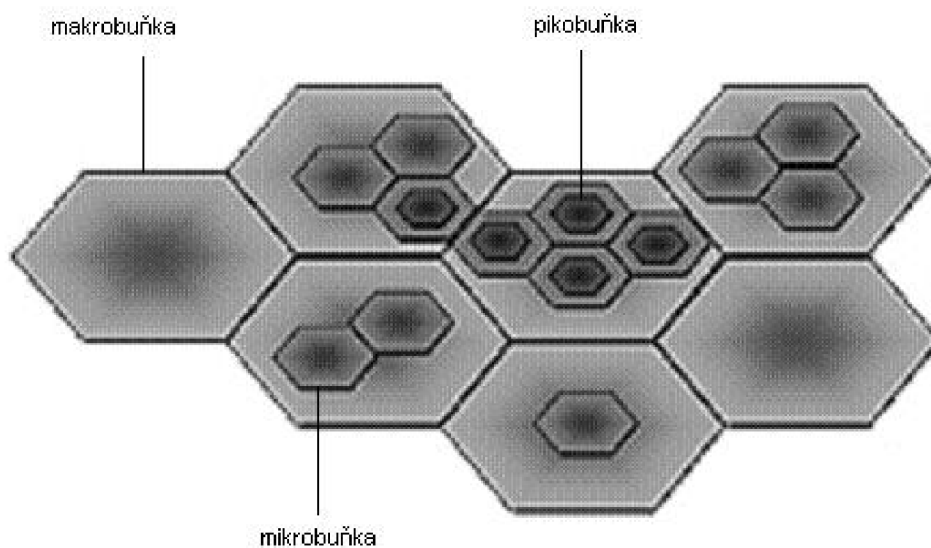
2.2 Plošná struktura

Existuje několik základních druhů struktury sítě, mezi něž patří např. Point to point, nebo Point to multipoint. Nejperspektivnější variantou plošné struktury rádiové sítě používané u mobilních systémů, je ale **struktura buňková** neboli **celulární**, jejíž základní zjednodušená koncepce je nakreslena na obr. 3 na příkladu radiotelefonní sítě.

Koncepce takovéto struktury je založena na rozdělení určitého území do menších částí, tzv. buněk. Každá buňka by měla mít svou vlastní řídicí jednotku, která se umísťuje obvykle doprostřed oblasti ohraničené buňkou a v našem případě to je základnová rádiová stanice BTS (Base transceiver station). Tato stanice plní v systému funkci spojení mezi uživateli systému a systémem samotným.

Reálné území, které má systém pokrývat samozřejmě není všude stejné, neboť se zde vyskytují pohoří atd., proto také buňky budou rozdílné, a to co do velikosti, tak do jejich výkonu.

Buňky se oficiálně dělí na **pikobuňky**, jejichž poloměr je menší, než 50 metrů. Ty jsou navrženy pro použití na území s velkou hustotou uživatelů, jako jsou kanceláře nádraží, letiště, náměstí a jiná hustě osídlená místa. O něco větší buňky se označují jako **mikrobuňky**, jejichž poloměr nepřesahuje 1 km. Jelikož jsou větší, nemohou už obsáhnout tolik uživatelů na malém prostoru jako pikobuňky, a proto se používají například v centru měst. Nakonec existují velké **makrobuňky**, které se využívají pro pokrytí rozsáhlého území s nízkou uživatelskou aktivitou. Ty mají průměr i několik desítek kilometrů.



Obr. 2: Zjednodušená struktura celulární sítě

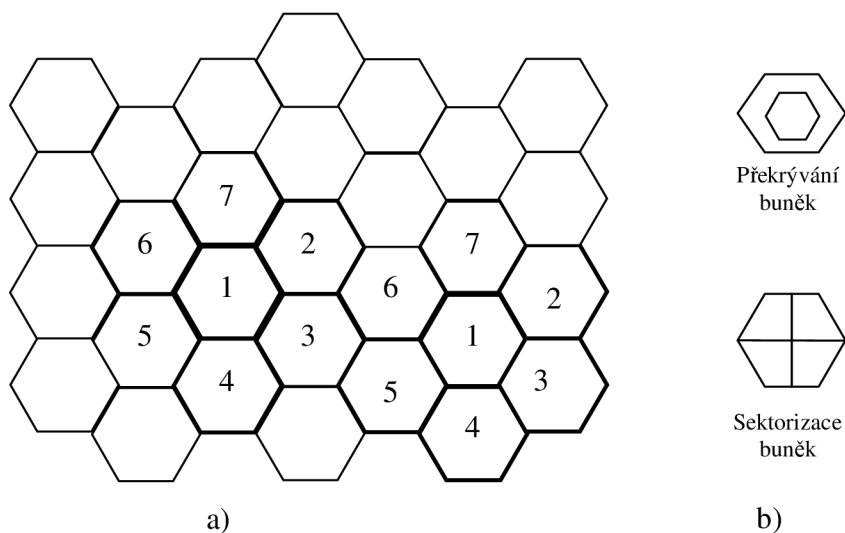
2.3 Využití kmitočtového pásma

Pokud vezmeme v potaz systém s celulární strukturou, zjistíme, že v takovémto systému je typické efektivní hospodaření s kmitočtovým spektrem, které však není nekonečné. Je to důsledek mnohonásobného opakování jednoho a téhož kmitočtu na pokrytém území. Z tohoto předpokladu potom vyplývá, že s omezeným kmitočtovým pásmem jsme schopni pokrýt teoreticky nekonečně velké území. Tento způsob realizace ukazuje obrázek 2.

Pokryté území, jenž nás zajímá je rozděleno do 14 buněk, které vytvářejí 2 svazky po 7 buňkách. Samozřejmě uprostřed každé buňky musí být základnová stanice pro přijímání a vysílání signálu v oblasti buňky, která pracuje s určitou skupinou kanálů. Pokud se uvnitř buňky nachází uživatel, komunikuje s okolním světem pouze prostřednictvím této základnové stanice. V ostatních buňkách jednoho svazku jsou využity jiné skupiny rádiových kanálů.

Pro jednoduchou představu můžeme říct, že v první buňce prvního svazku se využívají kanály 1-10, v druhé buňce téhož svazku to jsou kanály 11-20 a takto se pokračuje přes všechny buňky téhož svazku, čímž se pokryje celé spektrum kanálů. Svazek tedy bude obsahovat např. 70 kanálů, jakožto kompletní spektrum kanálů, které máme k dispozici. Jiný svazek ovšem může obsahovat opět stejné kanály jako svazek první. Jsou-li totiž dvě buňky různých svazků využívající stejné kanály rozmístěny podle obr. 3., je jejich vzdálenost rovna asi pětinasobku ekvivalentního poloměru buňky, takže je splněna podmínka platná pro interferenční zónu a rádiový provoz v těchto buňkách se vzájemně neruší.

Pokud tímto stylem začneme rozmísťovať na daném území buňkovou síť, se svazky a buňkami přesně dle této konfigurace kanálů, je možno s daným omezeným kmitočtovým pásmem pokrýt libovolně velké území, teoreticky až nekonečně velké. Popsaný způsob rozdělení kanálů do jednotlivých buněk svazku se nazývá **pevné přidělování kanálů** a označuje se zkratkou **FCA** (*Fixed Channel Allocation*).



Obr. 3: a) Vícenásobné využití kmitočtů přidělených systému
b) Sektorizace a překrývání buněk

Další metodou pro zvýšení kapacity systému je tzv. sektorizace buněk, popřípadě jejich překrývání. Sektorizace buněk pracuje na jednoduchém principu rozdělení dané buňky do několika dílčích kruhových výsečí, tzv. sektorů, ve kterých uživatel komunikuje s mobilní stanicí pomocí příslušné dvojice vysílač - přijímač a směrových antén.

Např. pokud anténa základnové stanice sestává z tří dílčích antén a každá z nich vysílá v efektivním úhlu 120° , rozdělí se buňka takovéto stanice na 3 sektory, což znamená ztrojnásobení počtu kanálů a jednotlivé kanály se mohou na požadovaném území opakovat ještě častěji. Logicky z toho vyplývá, že buňky mají potom menší rozměry, což se projeví vystačením s menšími výkony na straně základnového vysílače.

Co se týká překrývání buněk, pokud je určitá buňka přetížená, je do ní přidána další základnová stanice využívající kanály sousedních buněk. Výkon vysílače této základnové stanice se omezí, tak, aby pokrýval jen určitou část původní buňky a nedocházelo k interferencím se signály okolních buněk.

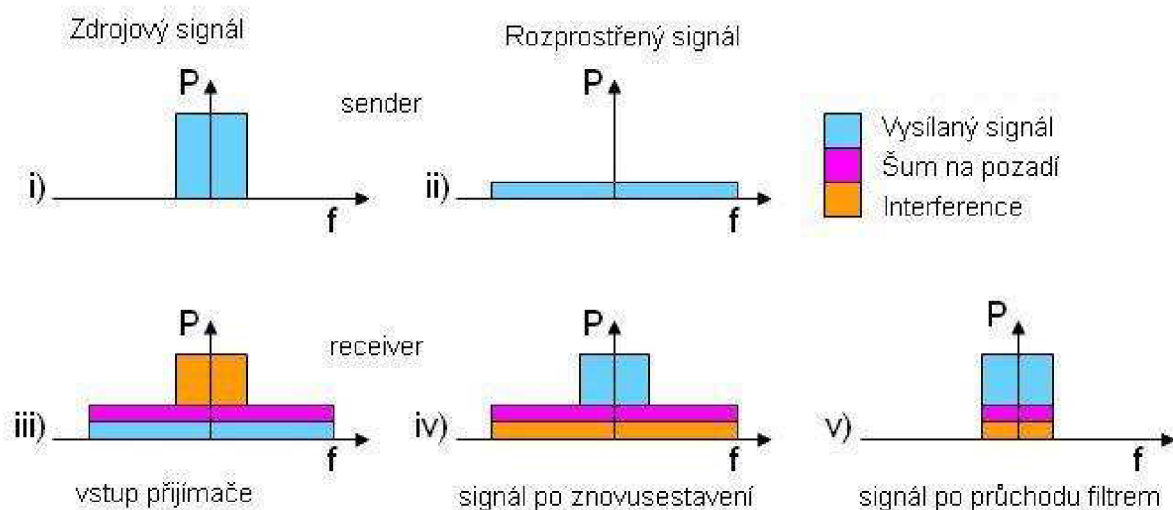
2.4 Interference

U ideálního rádiového kanálu by signál přijatý přijímačem obsahoval pouze perfektně rekonstruovaný odeslaný signál. Nicméně v reálném systému je tento signál modifikován během putování z místa odeslání do místa příjmu. Přijmutý signál tedy obsahuje zeslabené a odražené repliky signálu vyslaného. Signál se totiž šíří všemi směry a odráží se od věcí, které mu stojí v cestě, což v praxi znamená, že na přijímač tento stejný signál dorazí několikrát v závislosti na dráze, kterou překonal. Delší dráha samozřejmě logicky znamená větší zpoždění. K signálu se může připojit rušivý šum a také se může měnit frekvence v závislosti na pohybu vysílače, nebo přijímače (Dopplerův efekt).

Tímto nastává problém při znovusestavování signálu, jelikož k správné demodulaci musí být přijatý signál a původní pseudonáhodný kód **ortogonální**. To znamená, že jejich korelační funkce je nulová. Největší interference působí ostatní účastníci sítě, jež se pohybují na stejném kmitočtovém pásmu. Z toho vyplývá, že kapacita takového systému je značně omezena právě úrovní této interference. Prakticky čím větší interference, tím obtížnější je rekonstrukce signálu.

Když tyto interference přesáhnou určitou výkonovou hladinu, kdy už není možno bezpečně rekonstruovat požadovaný signál, je třeba zvýšit výkonové hladiny účastníků sítě. To ovšem nelze do nekonečna, z čehož vyplývá kapacitní omezení sítě.

Obrázek 4. znázorňuje proces CDMA přenosu. Zdrojový signál je nejdříve modulován pomocí PNP kódu. To má za následek roztažení spektra, jak ukazuje obrázek ii). Část iii) zobrazuje přijmutý signál, který obsahuje spolu s užitečným signálem také interference. Poté se signál už jen demoduluje, jak ukazují následující obrázky a přečte se jeho potřebná část.



Obr.4.: Proces CDMA přenosu

3 Stanovení kapacity CDMA sítě (single cell)

Pro potřeby této části projektu začnu pouze s jednoduchým modelem sítě s jen jednou buňkou a počtem daných uživatelů n . V síti není použit žádný způsob kódování informací a jelikož jde pouze o jednu buňku, tak se zde neprojevuje ovlivňování okolními buňkami, jako je to v reálné síti. Což bude více rozvedeno v poslední části projektu. Nyní je snaha vysvětlit spíše základní principy a vztahy.

Pokud $(E_b/N_0)_R$ je požadovaná hodnota E_b/N_0 jednoho uživatele, potřebná k provedení SNR (signal-to-noise ratio), jmenovitě $(E_b/N_0)_n$ rovno $(E_b/N_0)_l$, potom můžeme zapsat vztah:

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_n &= \frac{(E_b/N_0)_R}{1 + G^{-1}(E_b/N_0)_R \left(\sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i\right)} \\ &= \left\{ (E_b/N_0)_R^{-1} + G^{-1} \left(\sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i\right) \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

kde G je tzv. *systémový zisk* (system processing gain). V momentě, kdy $(E_b/N_0)_n = (E_b/N_0)_l$, vzorec (2) dává:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_R = \frac{(E_b/N_0)_l}{1 - G^{-1}(E_b/N_0)_l \left(\sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i\right)} \quad (3)$$

a degradační faktor DF může být prezentován jako:

$$DF = \frac{(E_b/N_0)_R}{(E_b/N_0)_l} = \frac{1}{1 - G^{-1}(E_b/N_0)_l \left(\sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i\right)} \quad (4)$$

Nyní vezmeme v potaz systém s n výkonově rovnocennými uživateli bez kódování. α_i je v tomto případě rovno 1 pro všechna i a vzorec (4) se запиše:

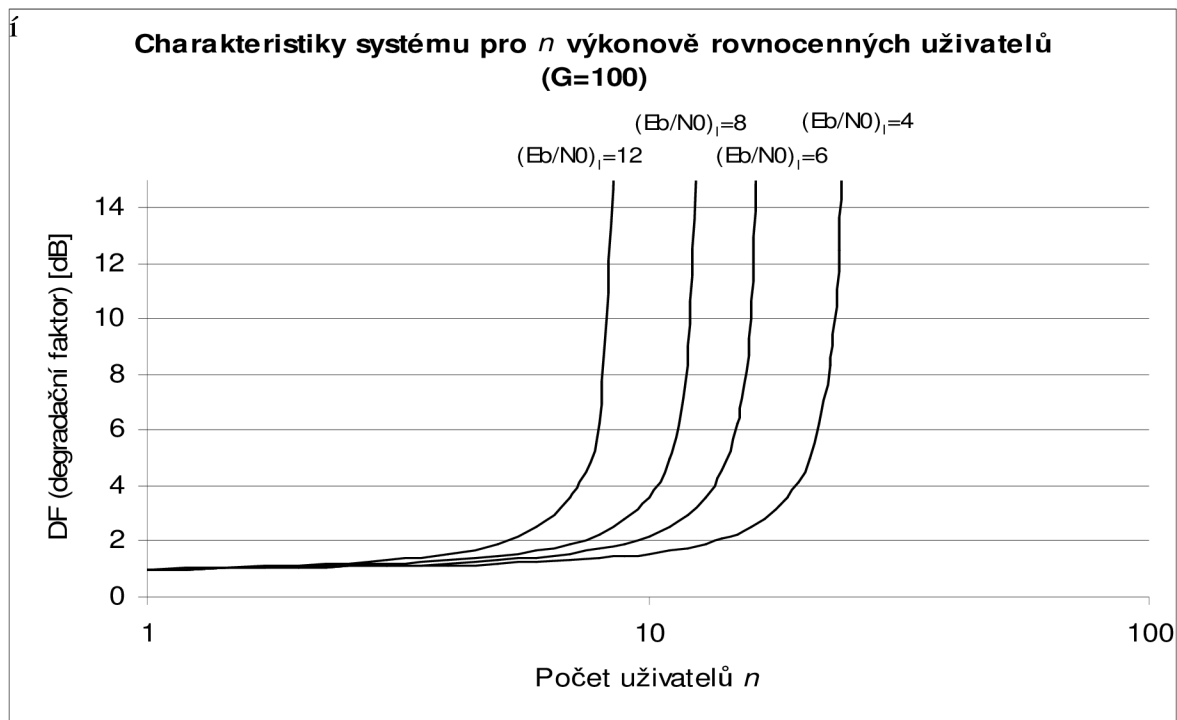
$$DF = \frac{1}{1 - (n-1)G^{-1}(E_b/N_0)_l} \quad (5)$$

3.1 Program pro MATLAB (single cell system)

```
G=1000; % určení proměnné G ve vzorci
EbN0=12; % určení poměru (Eb/N0)l ve vzorci

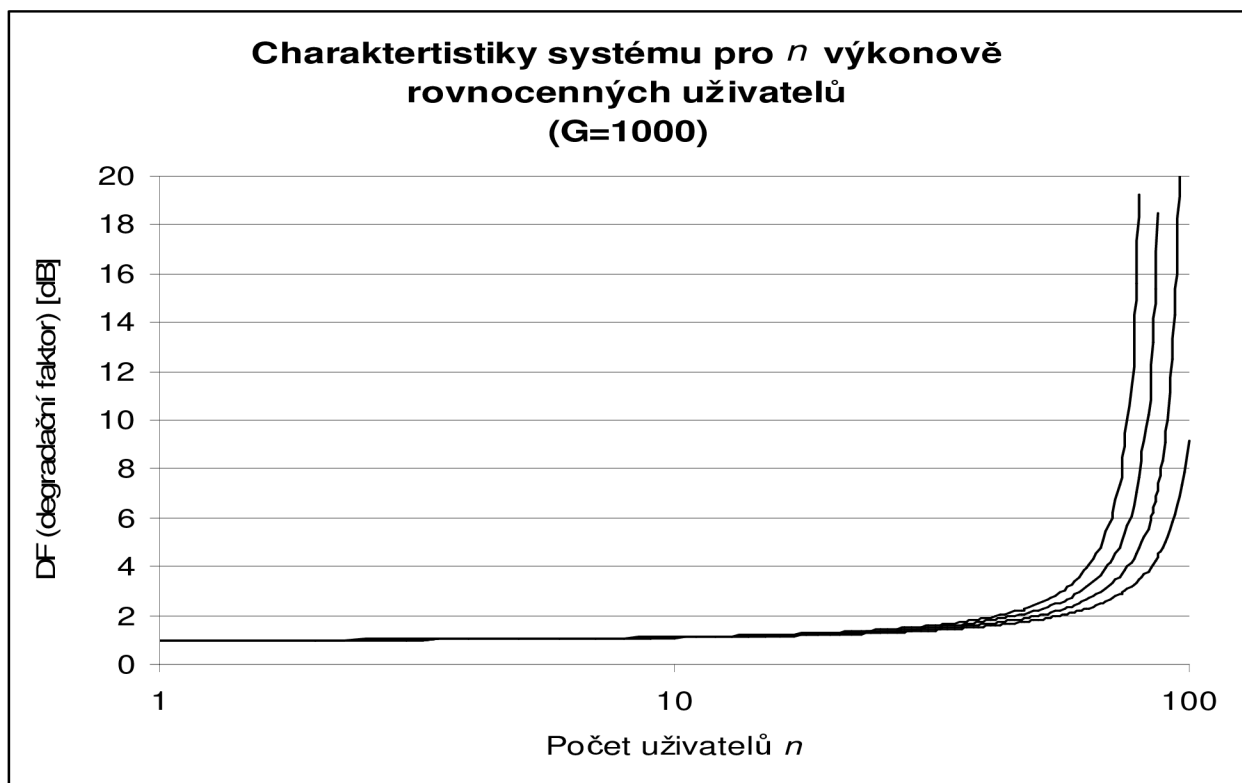
n=1:1:100; % nastavení rozsahu proměnné n (počet
uživatelů)
df = 1./((1-(n-1)*(G^-1)*EbN0)); % vlastní rovnice
figure(); plot(df); % vykreslení grafu
```

V této fázi můžeme přejít k přehlednému grafickému zobrazení charakteristik. Systém je definován pro zjednodušení pouze *systémovým ziskem* (G), počtem uživatelů n a požadovanou hodnotou $(E_b/N_0)_l$. Všechny tyto hodnoty se dosazují do rovnice (5) a následně vypočtené hodnoty udávají počet možných uživatelů v systému.



Obr. 5.: Závislost kapacity na systémovém zisku

Tento graf je stanoven pro $G=100$. Je vidět, že čím vyšší hodnotu $(E_b/N_0)_I$ požadujeme, tím menší počet uživatelů může být zahrnut do systému s konečnou hodnotou DF. Jako relativně reálné hodnoty $(E_b/N_0)_I$ se jeví 12, 8 a 6dB. S menšími čísly kapacita systému samozřejmě roste, nicméně v praxi by to už znamenalo ztracenou informaci, jelikož by se nedokázala odlišit od šumu, nebo od signálu jiných uživatelů. Pro případ systému s $G=100$ tedy vychází počet uživatelů přibližně kolem 10.



Obr. 6.: Závislost kapacity na systémovém zisku

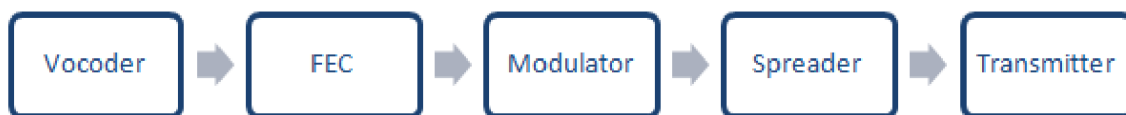
Křivky jsou vypočteny zleva postupně pro hodnoty $(E_b/N_0)_I=12, 11, 10$ a 9 dB. Pro $G=1000$ se tyto hodnoty rovněž jeví jako relativně reálné. Stejně jako v předchozím případě, vyšší hodnoty $(E_b/N_0)_I$ znamenají menší počet uživatelů v systému. V tomto případě se kapacita pohybuje okolo hodnoty 100 uživatelů.

Z takto stanovených charakteristik, je patrná závislost počtu uživatelů n na systémovém zisku G . Pro $G=100$ bylo uživatelů přibližně 10 a pro $G=1000$ bylo uživatelů 100. Můžeme tedy říci, že počet uživatelů systému C se rovná přibližně 10% systémového zisku G , ($C \approx 0,1G$).

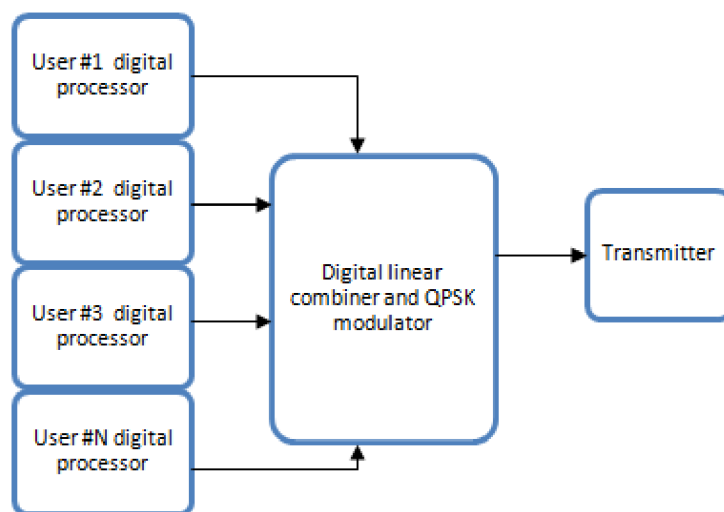
Tato závislost platí pochopitelně pouze pro náš případ systému. Kapacita se bude měnit s dalšími parametry, které budeme zahrnovat pro výpočet. Můžeme například uvažovat kódování signálu, které kapacitu systému zvýší podle toho, jakým způsobem je prováděno. Později můžeme počítat s uživateli, jejichž výkonové úrovně se výrazně liší, ne jako v tomto případě, kdy jsou si všichni uživatelé výkonově rovni. Do systému přidáme rušení, které způsobuje okolí nebo např. ostatní účastníci provozu tzv. near-far efektem.

4 Buňková síť CDMA

V této části projektu rozšířím svou analýzu na celou síť skládající se z více buněk. V takové síti komunikují uživatelé prostřednictvím určitého „centrálního bodu“, základnové stanice „BS“, umístěná obvykle uprostřed buňky. Pro připomenutí, v takovémto systému rozlišujeme komunikaci probíhající z mobilního telefonu do BS jako „uplink“ a komunikaci probíhající z BS směrem k mobilu jako „downlink“. Tyto dvě linky mohou být rozděleny podle frekvence, což nazýváme FDD (frequency division duplexing), nebo rozděleny v čase, což nazýváme TDD (time division duplexing).



a)



b)

Obr. 7.: Zjednodušený blokový diagram celulárního systému: a) uplink část systému
b) downlink kanál od zpracování k vysílači

Pro začátek budeme jako dříve uvažovat pouze jednobuňkovou síť a existenci:

1. Pilotního signálu v downlink kanálu (přímý směr)
2. Počáteční regulace výkonu mobilem, založenou na hladině detekovaného pilotního signálu. Mobil upravuje svůj výstupní výkon nepřímo úměrně k celkovému výkonu, který obdrží.

Tato skutečnost nás opravňuje k předpokladu, že v BS mají všechny obdržené signály stejný výkon S . Pokud bereme toto v úvahu, poté SNR a poměr (E_b/N_0) v síti s N uživateli může být vyjádřen jako:

$$SNR = \frac{S}{(N-1)S} = \frac{1}{N-1} \quad , \quad (6)$$

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right) = \frac{S/R}{(N-1)S/W} = \frac{W/R}{N-1} \cong \frac{G}{N} \quad . \quad (7)$$

Pokud vezmeme v úvahu také existenci tepelného šumu, dostaneme vztah:

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right) = \frac{W/R}{(N-1) + (\eta/S)} \quad . \quad (8)$$

Pro daný poměr (E_b/N_0) , požadovaný pro určitou hodnotu BER (bit error rate), je vztah pro počet uživatelů v systému:

$$N = 1 + \frac{W/R}{E_b/N_0} - \frac{\eta}{S} \cong \frac{G}{E_b/N_0} \quad . \quad (9)$$

Kde R je bitová rychlost, W je šířka pásma úměrná chipové rychlosti, G je systémový zisk $G = W/R$ a η je výkonová hustota Gaussovského šumu (tepelného).

Tento velmi jednoduchý vztah ukazuje, že systémová kapacita, měřená v počtu uživatelů je nepřímo úměrná poměru E_b/N_0 , požadovanému pro určitou kvalitu přenosu. Toto je vysvětlení, proč by zařízení pracující v CDMA systémech mělo využívat všechno, co je dostupné v moderní technologii, aby se dosáhlo co nejnižší této požadované úrovně. Řeč je hlavně o sofistikovaném kódování, využití antén různých druhů a vlastností a pokročilém zpracování signálu, zahrnujícím nejnovější, i když drahé technologie.

4.1 Rozšíření systému

Abychom rozšířili předchozí analýzu na síť složenou z několika buněk, uveďme tyto předpoklady systému:

- Pro uplink je použit nekoherentní příjem a dvojitá diverzita antén.
- Požadovaná velikost poměru E_b / N_0 je 7 dB.
- Na přímé lince, downlink, je použita koherentní demodulace pilotní nosnou. Několik vysílaných signálů je synchronně kombinováno. Výkonnost v systému s pouze jednou buňkou bude mnohem vyšší, než uplink kanálu. Nicméně v komplexním systému, složeném z několika buněk, ovlivňování okolními buňkami způsobuje vyrovnávání výkonnosti v těchto dvou směrech.
- Je předpokládáno použití směrových antén, jak pro vysílání, tak pro příjem signálů. S třemi anténami na prostor buňky, každá mající 120° efektivní šířku svazku, je každou z nich zaznamenána přibližně pouze 1/3 celkového rušení, které by působilo na všesměrovou anténu. Pokud tedy počítáme s třemi sektory, počet uživatelů na jednu buňku je $N = 3 N_S$. Pokud je monitorována aktivita hlasu a signál je vysílán pouze tehdy, kdy by skutečně měl být vysílán, tzn. že je signál na vstupu mikrofónu, velikost rušení bude samozřejmě zmenšena a vztah (8) se mění na:

$$\left(\frac{\bar{E}_b}{N_0} \right) = \frac{W / R}{(N_S - 1)\alpha + (\eta / S)} \quad , \quad (10)$$

kde „voice activity factor“ je $\alpha = 3/8$.

4.2 Regulace výkonu uplink kanálu

Před jakýmkoliv vysíláním každý účastník monitoruje celkový výkon signálu, který zachytí. Podle hodnoty výkonu, který detekuje, vysílá na základní hladině, která je tolik pod (nad) nominální hladinou v decibelech, jako je přijatý výkon pilotního signálu nad (pod) jeho nominální úrovní. Podle zkušeností z různých studií a z praxe je zřejmé, že k tomuto může být třeba dynamický rozsah ovládání na hranici 80 dB.

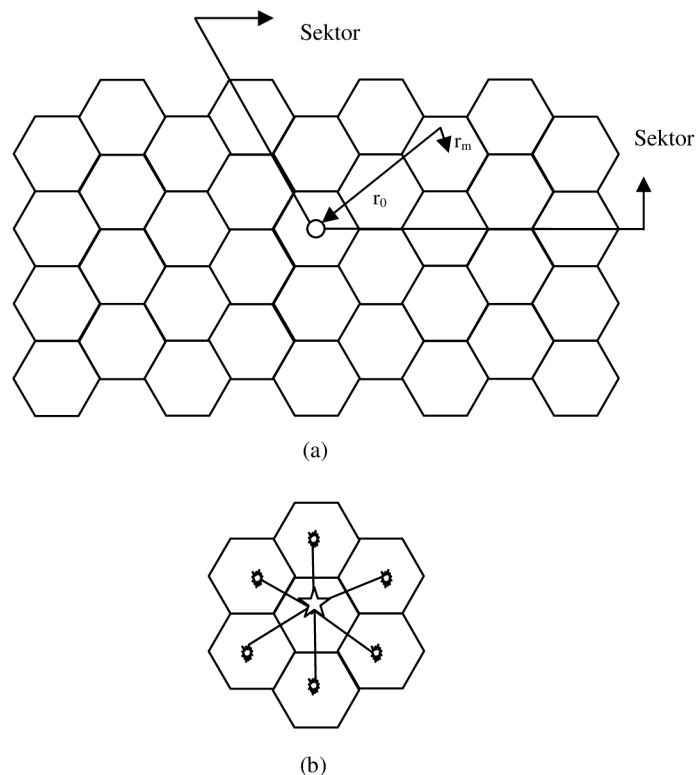
Další úprava výkonové hladiny u každého účastníka může být kontrolována podle umístění v síti, což závisí na výkonu, který je přijmut od účastníka. V CDMA systémech, které sestávají z více buněk se hladina interferencí z okolních buněk mění nejen podle útlumu cesty do sektoru účastníka, ale také nepřímo k útlumu cesty signálu rušícího účastníka do jeho vlastního sektoru. Toto může zvýšit, nebo naopak snížit interference působící na požadovanou síť buněk pomocí regulování výkonu dané sítě.

5 Určení kapacity uplink kanálu pro CDMA síť

V tomto projektu budeme počítat s modelem systému, který má následující parametry:

- Ztráty na trase mezi uživatelem a sítí buňky jsou úměrné $10^{(\xi/10)} r^{-4}$
- r je vzdálenost od účastníka do sítě buňky
- ξ je Gaussovská náhodná proměnná se směrodatnou odchylkou $\sigma = 8$ a s nulovou střední hodnotou
- Uvnitř jedné buňky se šíření pochopitelně liší v závislosti na umístění účastníka vzhledem k anténě. Je jiný případ, když je účastník velmi blízko antény, kdy se jedná o inverzní kvadratickou funkci a jiný případ, když je účastník velmi daleko antény, ve velmi hustě obydleném prostředí, jako je např. Praha.

Rozložení buněk je ukázáno na obr.8.



Obr. 8. Celulární sestavení: a) geometrie uplink kanálu
b) geometrie downlink kanálu

Aby účastník m dosáhl své vlastní BS s výkonovou úrovní S , musí přenést výkon P_m . Toto může být vyjádřeno jako:

$$S = P_m \left(\frac{10^{\xi_m/10}}{r_m^4} \right) \quad . \quad (11)$$

Tento signál bude současně představovat interference pro danou síť buňky, což může být znázorněno vztahem:

$$I(r_0, r_m) = P_m \left(\frac{10^{\xi_0/10}}{r_m^4} \right) \quad . \quad (12)$$

Dosazením P_m ze vztahu(11) do (12) dostaneme:

$$\begin{aligned} \frac{I(r_0, r_m)}{S} &= \left(\frac{10^{\xi_0/10}}{r_m^4} \right) \left(\frac{r_m^4}{10^{(\xi_m/10)}} \right) \\ &= \left(\frac{r_m}{r_0} \right)^4 10^{(\xi_0 - \xi_m)/10} \leq 1 \end{aligned} \quad . \quad (13)$$

ξ_0 a ξ_m jsou nezávislé, takže jejich rozdíl má nulovou střední hodnotu a odchylku $2\sigma^2$.

Poměr signálu a šumu

E_b / N_0 , které dostaneme ze vztahu 8 se nyní mění na:

$$E_b / N_0 = \frac{W / R}{\sum_{i=1}^{N_s-1} \chi_i + (I / S) + (\eta / S)} \quad . \quad (14)$$

Kde první člen ve jmenovateli reprezentuje vnitrobuňkové interference s

$$\chi_i = \begin{cases} 1, & \text{s pravděpodobností } \alpha \\ 0, & \text{s pravděpodobností } 1 - \alpha \end{cases}$$

Parametr I reprezentuje interference působené ostatními uživateli v okolních buňkách zaokrouhleny jako Gaussovská náhodná proměnná s $E(I/S) \leq 0.247N_S$ a $\text{var}(I/S) \leq 0.078N_S$. Parametry W/R a S/η jsou konstanty.

5.1 Pravděpodobnost chyby

Pokud definujeme

$$P = \Pr(\text{BER} < 10^{-3}) = \Pr(E_b / N_0 \geq 5) \quad , \quad (15)$$

potom pravděpodobnost vzniku chyby při komunikaci je definována:

$$1 - P = \Pr(\text{BER} < 10^{-3}) = \Pr\left(\sum_{i=1}^{N_S} \chi_i + I/S > \delta\right) \quad . \quad (16)$$

Kde

$$\delta = \frac{W/R}{E_b / N_0} - \frac{\eta}{S}, \quad E_b / N_0 = 5 \quad . \quad (17)$$

Protože náhodná proměnná χ_i má binomické rozložení a I/S je Gaussovská proměnná, průměrování nám dá vztah:

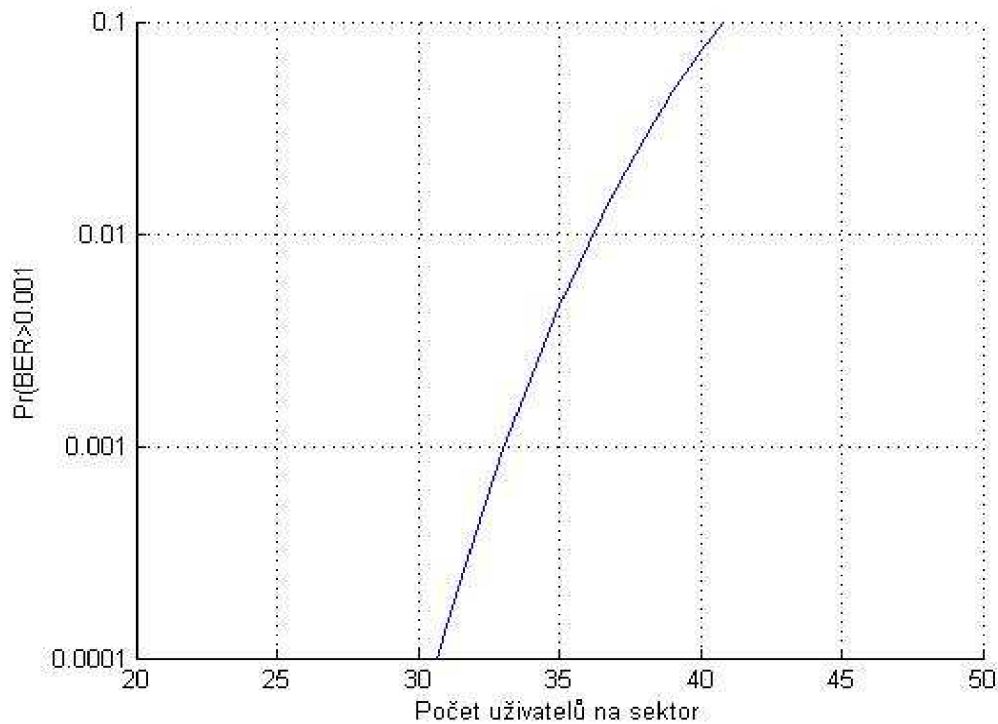
$$\begin{aligned} 1 - P &= \sum_{k=0}^{N_S-1} \Pr(I/S > \delta - k \mid \sum x_i = k) \Pr(\sum x_i = k) \\ &= \sum_{k=0}^{N_S-1} \binom{N_S-1}{k} \alpha^k (1-\alpha)^{N_S-1-k} Q\left(\frac{\delta - k - 0.274N_S}{\sqrt{0.078N_S}}\right) \quad . \end{aligned} \quad (18)$$

6 Grafická simulace rovnic v programu MATLAB

Tento vztah (18) je graficky znázorněn v následujícím grafu Obr. 9. pro systémové parametry ze standardu IS-95.

Parametry:

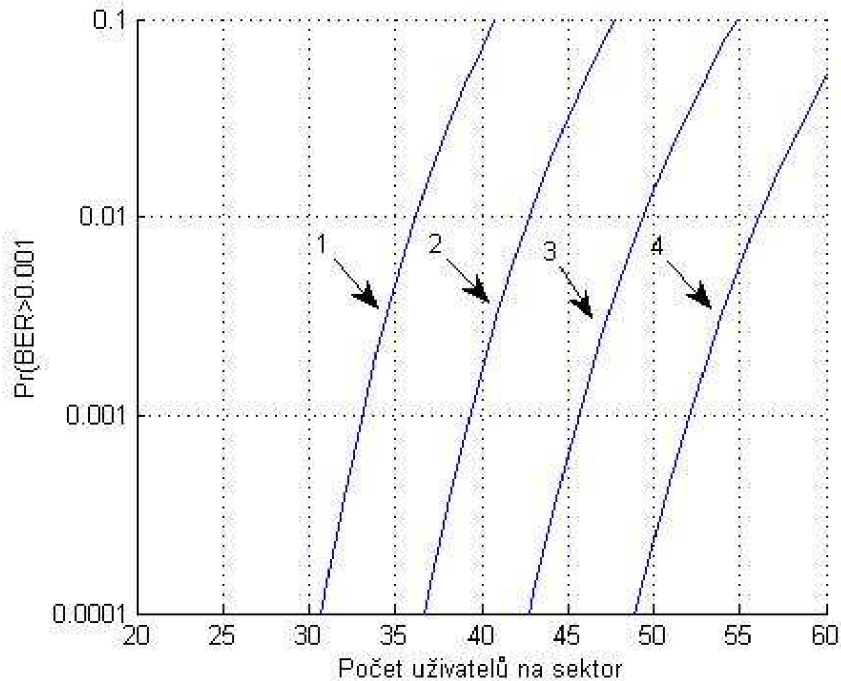
- šířka pásma W je zvolena 1,25 MHz
- Bit-rate je zvolen 8 kbps
- Voice activity factor α má hodnotu $3/8$
- BER o hodnotě 10^{-3} více, než 99% času



Obr. 9.: Kapacita/sektor uplink kanálu

Pokud budeme počítat s 1% pravděpodobností chyby při komunikaci, systémová kapacita pro systém, ve kterém jsou okolní buňky na plné kapacitě je 37 uživatelů na sektor, což reprezentuje $37/(W/R) \cong 20\%$ systémového zisku. (0,2G) – závislost č.1. Ostatní závislosti (2, 3, 4) udávají systémové parametry pro okolní buňky při poloviční kapacitě, při čtvrtinové a pro případ, že okolní buňky jsou prázdné. Z grafu je možno

vyčíst hodnoty také pro ostatní zobrazené závislosti, a to 43 uživatelů pro (2), 51 uživatelů pro (3) a 56 uživatelů pro (4).



Obr. 10.: Kapacita/sektor uplink kanálu

Jednotlivě zobrazené grafické závislosti jsou pro různé δ . Podle simulací v Matlabu a srovnání výsledných závislostí s odbornou literaturou je určeno δ o hodnotě 32 pro závislost č.1, nebo-li stav systému při okolních buňkách o plné kapacitě. Dále 37 pro (2), 42 pro (3) a 47 pro (4).

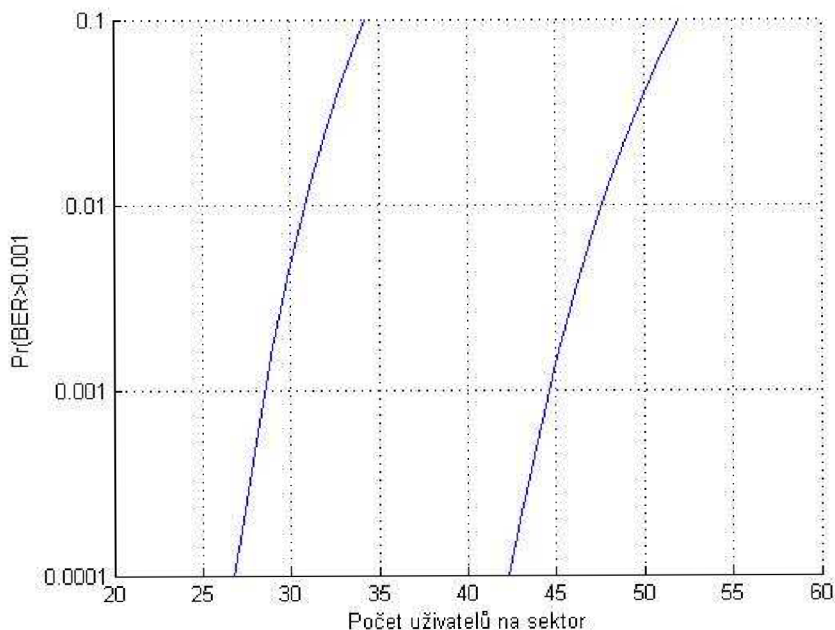
Pro univerzální mobilní telekomunikační systém (UMTS) bude toto číslo modifikováno dvěma faktory. Ze vztahu (9), bude kapacita v UMTS třikrát větší (G_w) kvůli třikrát větší chipové rychlosti. Toto ovšem není velký zisk, protože s třemi IS-95 systémy ve stejné šířce komunikačního pásma bude kapacita systému rovněž zvětšena třikrát.

Hlavní zlepšení přichází z faktu, že pokud se používá třikrát větší chipová rychlost, tzv. „multipath resolution“ bude lepší a RAKE přijímač (se ziskem G_{RAKE}) bude efektivnější, jinými slovy bude zapotřebí nižší hodnoty E_b/N_0 pro správné zpracování signálu.

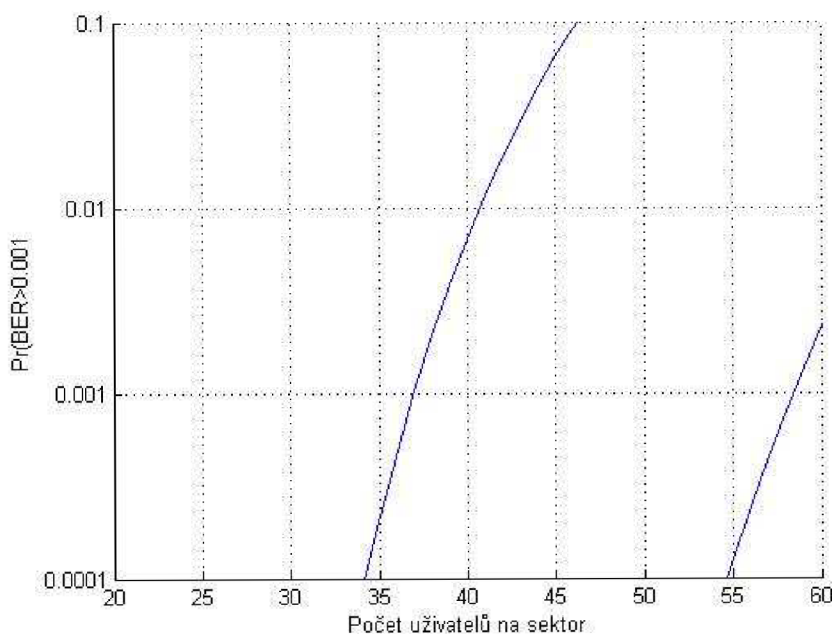
6.1 Ovlivňující faktory

Faktorem, který zjevně ovlivňuje kapacitu takového systému, je například **voice activity factor** (α). Ten udává, jaká část lidského hovoru obsahuje užitečnou informaci, kterou je nutno přenášet. Resp. určuje poměr slov a tichých míst v řeči. Logicky tiché místa není nutné přenášet a výkon systému se může během toho soustředit na jiné

uživatelé. Měřením bylo určeno α na hodnotu 0,375, což znamená, že užitečná informace je jen v 37,5% lidského hovoru. Pokud by toto číslo bylo menší, dojde logicky k navýšení počtu uživatelů v systému, jelikož jednotliví účastníci budou představovat pro systém menší zátěž. Analogicky k tomuto, pokud α vzroste, počet uživatelů musí klesnout, aby byly dodrženy systémové požadavky.



Obr. 11.: Závislost kapacity na α



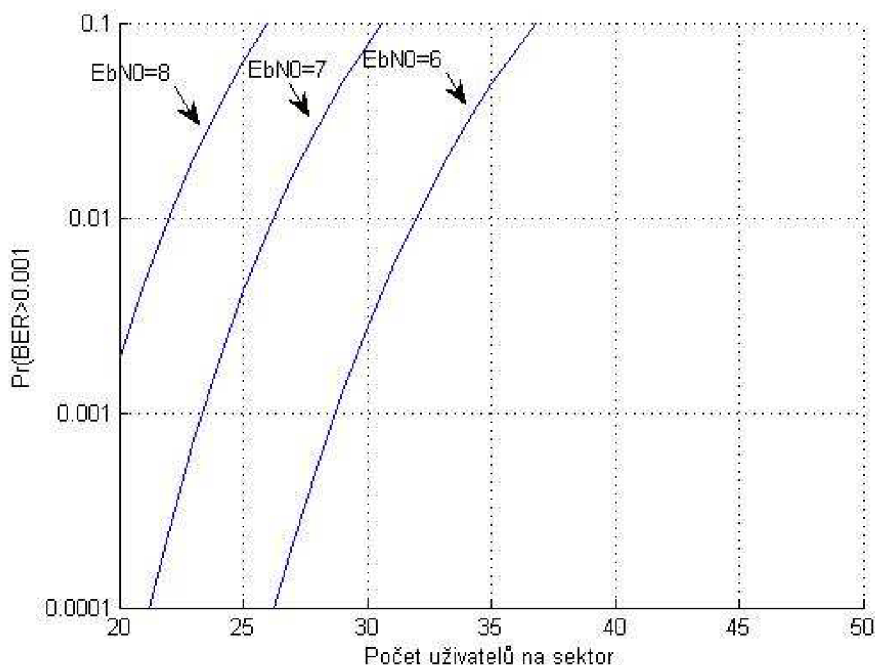
Obr. 12.: Závislost kapacity na α

Z těchto dvou grafů je možné vyčíst závislost počtu uživatelů v systému na hodnotě α , která je použita pro výpočet. Pokud nastavíme $\alpha=0,5$, počet uživatelů klesne na 32 pro sektor, jehož okolní buňky jsou na plné kapacitě a 47 uživatelů pro sektor, jehož okolní buňky jsou prázdné. Pro případ $\alpha=0,3$ kapacita vzrostla na 42 uživatelů, resp. 62 uživatelů.

Z tohoto je patrné, že pokud navrhujeme systém pro určité parametry a chceme mít dostatečnou rezervu ve výkonu, můžeme pro dané výpočty mírně zvednout hodnotu α nad 0,375, čímž zajistíme onu rezervu v konečném výsledku.

Dalším faktorem, který silně ovlivňuje charakteristiku systému je **poměr E_b/N_0** . Jak už bylo výše napsáno, prozatímni výpočty se vztahují na případ, kdy je E_b/N_0 rovno 5. Pokud se rozhodneme na systém klást vyšší nároky, co se týká kvality přenášených signálů a celkové komunikace v systému, můžeme hodnotu poměru E_b/N_0 navýšit. To má ovšem velmi negativní dopad na možný počet uživatelů v systému.

Obrázek 13. reprezentuje charakteristické hodnoty počtu uživatelů na sektor v závislosti na E_b/N_0 . Je zřejmé, že při vyšším poměru E_b/N_0 počet uživatelů takového systému klesne a naopak. Ovšem nízké hodnoty E_b/N_0 už nemusí být přijatelné (z výpočtů $E_b/N_0 \geq 5$) z hlediska možnosti zpracování informace. Graf ukazuje, že při $E_b/N_0 = 6$ počet uživatelů klesne na 32, pro $E_b/N_0 = 7$ klesne na 27 a pro $E_b/N_0 = 8$ je počet uživatelů pouhých 23.



Obr. 13.: Závislost kapacity na E_b/N_0

V této části můžeme trochu přiblížit srovnání kapacity CDMA a TDMA systémů (jako např. globální systém mobilní komunikace GSM), pro porovnání vlastností CDMA také s jiným systémem.

GSM používá 200 kHz šířku pásma pro 8 uživatelů. V pásmu 1.2 MHz (6x 200 kHz), je možné obsloužit $6 \times 8 = 48 \approx 50$ uživatelů. Ovšem musíme brát na zřetel, že faktor vícenásobného využití frekvence (frequency reuse factor) je 7 oproti 1 v CDMA síti, což zjednodušeně znamená že normalizovaný ekvivalent kapacity GSM při šířce pásma 1,2 MHz $50/7 \approx 7$ oproti CDMA, kde je získaný počet uživatelů 37.

Pro správné srovnání musíme počítat s tím, že GSM kodek využívá 13kbit, oproti 8 kbit v CDMA, což redukuje 37 faktorem 8/13. Záměr tohoto srovnání nespočívá v tom, udat výsledná čísla jako rozhodnutí, který systém je lepší a který horší. Jde pouze o uvedení základních parametrů obou systémů, do kterých zasahují ještě další veličiny, kterými se v tomto projektu nezabýváme. Jedná se především o použití sofistikovaných algoritmů pro zpracování signálů, což zvýší kapacitu systému, ale rovněž další zdroje šumu, které kapacitu naopak sníží.

7 Určení kapacity downlink kanálu pro komplexní CDMA síť s přiřazením výkonu

Předpokládáme, že jsou k dispozici mobilem měřené jeho vlastní hodnoty SNR, definované jako poměr mezi výkonem z vysílače jeho vlastní buňky a celkovým přijatým výkonem.

Měření mohou být přenášena k vybrané buňce (s největším výkonem), jakmile mobilní telefon začne vysílat. Na základě těchto dvou měření má vztahná buňka přiměřeně přesné odhady o S_{T1} a $\sum_{i=1}^K S_{T_i}$, kde

$$S_{T_1} > S_{T_2} > \dots > S_{T_K} > 0$$

jsou výkony přijaté mobilním telefonem ze vtažného sektoru buňky, na který je nasměrován. S_{T1} je celkový vyslaný výkon z dané buňky. Zbytek výkonu S_{T1} , stejně jako výkony z ostatních sektorů buněk jsou přijaty jako šum. Takže hodnota poměru E_b / N_0 může být zdola ohraničena takto:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_i \geq \frac{B\phi_i S_{T_1} / R}{\left[\left(\sum_{j=1}^K S_{T_j}\right) + \eta\right] / W} \quad . \quad (19)$$

Je zde ovšem nepřesnost, protože interference obsahují také užitečný signál. β je část celkového výkonu buňky věnovaná účastníkům, ϕ_i je část věnovaná přímo účastníkovi i . Ze vztahu (19) dostaneme:

$$\phi_i \leq \frac{(E_b / N_0)_i}{\beta W / R} \left[1 + \left(\frac{\sum_{j=2}^K S_{T_j}}{S_{T_1}} \right) + \frac{\eta}{(S_{T_1})_i} \right] \quad , \quad (20)$$

kde

$$\sum_{i=1}^{N_s} \phi_i \leq 1 \quad . \quad (21)$$

7.1 Pravděpodobnost chyby

Relativní obdržené výkony z buňky podle měření jsou definovány jako:

$$f_i \cong \left(1 + \sum_{j=2}^K S_{T_j} / S_{T_1} \right)_i, \quad i = 1, \dots, N_s \quad . \quad (22)$$

A z rovnice (21) dostaneme

$$\sum_{i=1}^{N_s} f_i \leq \frac{\beta W / R}{E_b / N_0} - \sum_{i=1}^{N_s} \frac{\eta}{S_{T_1}} \cong \delta' \quad . \quad (23)$$

Pokud určíme hodnotu $\beta = 0,8$ abychom poskytli 20% přeneseného výkonu v sektoru pilotnímu signálu a použijeme požadovaný poměr $E_b/N_0 = 5$ dB k zajištění $BER < 10^{-3}$, potom pravděpodobnost výpadku může být reprezentována jako:

$$1 - P = \Pr(BER > 10^{-3}) = \Pr\left(\sum_{i=1}^{N_s} f_i > \delta'\right) \quad . \quad (24)$$

Kde δ' je definováno rovnicí (23) a oproti uplink kanálu, rovnici (24) nelze spočítat analyticky. Proto k této situaci existují simulace (Monte-Carlo), dle kterých se výkon takového systému určuje.

8 Program pro simulaci provozního zatížení systému

%Název: Stanovení počtu uživatelů v CDMA systému

%Autor: Jan Pasečný

%Datum: 28.5.2008

%Program pro MATLAB k bakalářské práci FEKT VUT Brno

clear all;

N=60; % počet uživatelů

alfa=0.375; % voice activity factor

delta=32;

%W=1.25*10^6; % šířka pásma

%R=8*10^3; % bitrate

%ebn0=5; % E_b/N_0

%delta=(W/R)/ebn0; % δ

hold off;

axis([20 60 -4 -1]);

hold on;

grid on;

xlabel('Počet uživatelů na sektor'), ylabel('Pr(BER>0.001)');

set(gca,'YTick',-4:1:-1);

set(gca,'YTickLabel',{'0.0001','0.001','0.01','0.1'});

for delta=32 %:15:47 %pokud chceme zobrazit současně více závislostí

%for delta %část pro komplexnější zadání vstupních veličin

for NS=20:1:N

s=0;

for k=0:1:NS-1,

s=s+nchoosek(NS,k)*(alfa^k)*((1-alfa)^(NS-1-k))*0.5*erfc((delta-k-0.274*NS)/sqrt(0.156*NS));

end;

P(NS)=s;

end;

plot(20:1:60,log10(P(20:1:N)));

end;

8.1 Krátký popis programu pro MATLAB

Program dovoluje měnit požadované δ v rovnici a následně vykreslí graf pro zadanou hodnotu. Umožňuje také zobrazit více simulací do jednoho grafu, pokud odstraníme komentář u prvního cyklu „for“ a nastavíme hodnoty od-do a krok po jakém se má výpočet pohybovat. Výpočty jsou pro standard IS-95.

Pokud je nutno změnit většinu vstupních parametrů, jako je šířka pásma (bandwidth), bitrate, popřípadě poměr E_b/N_0 , můžeme tak učinit odstraněním komentářů v horní části programu, kde jsou tyto veličiny definovány a nahrazením prvního řádku cyklu „for“ řádkem druhým, který je v komentáři.

9 Shrnutí CDMA systémů s ohledem na jejich kapacitu:

Hlavní aspekty systémů CDMA

1. **Voice activity detection (VAD).** Lidský cyklus aktivity hlasu je cca 37%. Pokud uživatelé, kteří jsou přiřazeni buňce nemluví, VAD dovolí ostatním uživatelům, aby těžili z této snížené signálové interference. Takže celková interference je tedy snížena faktorem 63%. CDMA je jediná technologie, která z tohoto faktu těží a je dokázáno, že díky VAD je kapacita takového systému zvýšena skoro třikrát.
2. **Soft Capacity.** Kapacita CDMA systémů je limitována hladinou interferencí, zatímco např. TDMA a FDMA jsou limitovány šířkou pásma. Kapacita CDMA má tzv. soft limit, což znamená, že do systému můžeme přidat uživatele nad stanovenou kapacitu, pokud jsme ochotni tolerovat lehkou degradaci signálu. Naproti tomu TDMA a FDMA mají kapacitu pevně stanovenou a další uživatele systém nezvládne. Další závěr, který můžeme vyvodit je, že každá redukce interference v systému se konvertuje přímo a lineárně do zvýšení kapacity.
3. **Sektorizace.** Buňky CDMA systému lze s potřebným vybavením jednoduše rozdělit na několik sektorů, čímž poklesne množství interferencí v každém z nich. V podstatě jakákoliv izolace určitého území (sektoru) použitím patřičných antén vede k navýšení kapacity takového systému.
4. **Frequency reuse** (Faktor vícenásobného využití kmitočtu). Předchozí úvahy o kapacitě primárně souvisí s jednobuňkovými systémy. V případě územního buňkového rozložení je největší výhodou CDMA systému možnost znovu-využití celého spektra kanálů nad požadovaným územím. Tato skutečnost zvyšuje kapacitu CDMA systémů velkou měrou oproti jiným systémům.
5. **Řízení výkonu.** Z problémů souvisejících s použitím přístupu CDMA patří k těm největším optimální řízení výkonu mobilních terminálů různě vzdálených od

základnové stanice BS. Bez patřičného algoritmu by nejbližší účastníci vzhledem k základnové stanici představovali vážné interference pro vzdálenější účastníky (Near-far effect), což by mělo za důsledek velký pokles kapacity.

10 Závěr

V tomto projektu byly provedeny výpočty kapacity pro systém s jednou buňkou a s více buňkami vyjádřené v počtu uživatelů, které systém dokáže obsloužit při dodržení určitých podmínek.

V první část projektu byly zkoumány pouze informace o dané problematice a shromážděné teoretické poznatky byly použity v dalších částech této práce.

Druhá část projektu se už zabývala systémem, který obsahoval jednu buňku. Po zavedení několika základních veličin, které systém charakterizují byly provedeny výpočty a následné grafické zobrazení vypočtených závislostí. Dá se říci, že pro zkoumaný systém s jedinou buňkou se kapacita rovnala cca 0,1G, tzn. desetina systémového zisku. Prakticky to představuje 10 uživatelů v systému při systémovém zisku 100 a 100 uživatelů při systémovém zisku 1000.

V poslední části tohoto projektu je analyzován systém s více buňkami, což způsobuje jeho větší komplexnost a náchylnost k rušícím vlivům signálu. Do systému se dostávají interference způsobené okolními buňkami a nároky na řízení tohoto systému jsou rovněž větší. Při systémových parametrech standardu IS-95 byla určena kapacita v uplink kanálu jako 36 uživatelů/sektor, resp. 108 uživatelů/buňku, při okolních buňkách na plné kapacitě. Pokud se vytížení okolních buněk dostalo na polovinu, byla stanovena kapacita 44 uživatelů/sektor, resp. 132 uživatelů/buňku. Z přiložených grafů je patrná závislost na faktorech figurujících ve výpočtu kapacity, jako je například požadovaný poměr E_b/N_0 , voice activity factor α a tyto závislosti jsou u jednotlivých grafů náležitě popsány. Některé vztahy a skutečnosti zmíněné v tomto projektu při výpočtu kapacity, by mohly být hlouběji rozvinuty v budoucích navazujících částech projektu.

Cílem tohoto projektu nebylo popsat veškeré podrobnosti a informace, ale naopak vyzdvihnout nejdůležitější fakta dané problematiky, což je stanovení kapacity v CDMA systémech.

10.1 Budoucí práce

Projekt je možno profilovat tak, aby v budoucnu podrobně rozvinul jedno z uvedených témat. Popřípadě je možné provést simulaci na zařízení, které by toto umožňovalo a srovnat takto teoreticky vypočtené výsledky s naměřenými.

11 Seznam použitých zkratk

3G	Third generation
AWGN	Additive white Gaussian noise
BER	Bit error rate
BTS	Base transceiver station
CDMA	Code division multiple acces
DF	Degradation factor
DS	Direct sequence
FCA	Fixed channel allocation
FDMA	Frequency divison multiple access
FH	Frequency hopping
G	System processing gain
PNP	Pseudonáhodná posloupnost
SS	Spread spectrum
SNR	Signal-to-noise ratio
TDMA	Time division multiple Access
VAD	Voice aktivity detection

12 Seznam použité literatury:

- [1] GLISIC, G., S. Advanced Wireless Communications - 4G Technologies. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005, 857 s. ISBN 0-470-86776-0.
- [2] GLISIC, G., S. Adaptive WCDMA - Theory and Practice. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003, 614 s. ISBN 0-470-84825-1.
- [3] KIM, K., KOO, I. CDMA Systems Capacity Engineering. New Jersey: Artech House, Inc. 2005, 201 s. ISBN 1-58053-812-6.
- [4] HANUS, S. *Rádiové a mobilní komunikace*. 1 vyd. Brno: FEKT VUT v Brně, 2002.
- [5] A. J. Viterbi, A. M. Viterbi, "Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.11 No. 6, August 1993 pp. 892-900
- [6] Kingsbury, N. Approximation Formulae For The Gaussian Error Integral, Creative Commons Attribution License, Version 2.4
- [7] S.V. Hanly, "Capacity and power control in spread spectrum macrodiversity radio networks," IEEE Trans. On Communications, Vol. 44, No. 2, pp247-256, 1996.
- [8] F. Berggren and S. B. Slimane, "Power allocation for a simple successive interference cancellation scheme in a multi-rate DS-CDMA system," in Proc. IEEE ICC, vol. 1, pp. 351-355, 2002.
- [9] L. Ding and J. S. Lehnert, "An uplink power control based truncated channel inversion for data tra_c in a cellular CDMA system," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 50, no. 3, pp. 854-866, 2001.
- [10] S. Kandukuri and S. Boyd, "Optimal power control in interference-limited fading wireless channels with outage-probability specifications," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no. 1, pp. 46-55, 2002.