

PRINCÍPY BUNKOVÝCH RÁDIOVÝCH SIETÍ

ÚVOD

Klasické verejné mobilné rádiové siete existovali od roku 1946, kedy začala činnosť mobilná telefónna sieť v St. Luis (USA). Neskôr zdokonalenie mobilných telefónnych sietí prinieslo vysoký stupeň automatizácie, ktorá umožňuje mobilným účastníkom viesť hovory rovnako, ako keby používali klasický telefón.

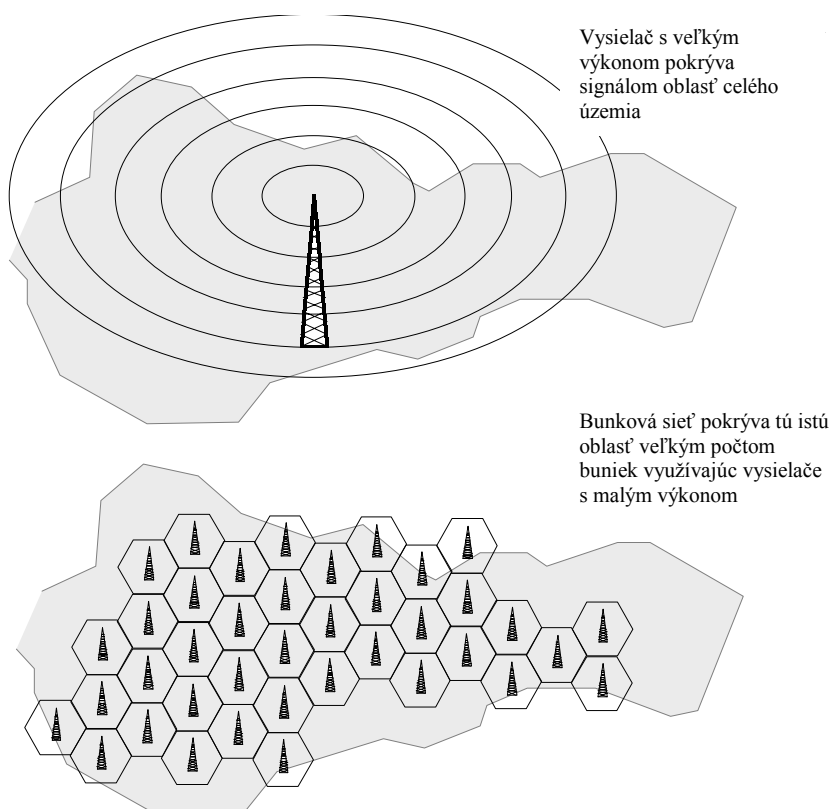
Bunkové siete sú určitým evolučným zdokonalením predtým existujúcich "konvenčných" mobilných telefónnych služieb pracujúcich na frekvenciách 150 a 450 MHz. Z hľadiska účastníka nesmú byť badateľné rozdiely medzi klasickými a bunkovými sieťami. Oba typy ponúkajú mobilným účastníkom rovnakú základnú službu - schopnosť viesť hovor s účastníkom pevnej telefónnej siete, alebo s iným mobilným účastníkom jednoducho voľbou telefónneho čísla.

Architektúra bunkovej siete, ktorá bude podrobnejšie popísaná neskôr, sa podobá sieti, ktorá je tvorená malými oblasťami obsluhovanými klasickým systémom, vzájomne susediacimi a prepojenými tak, aby bol umožnený prenos hovoru z jednej oblasti (bunky) do druhej. Zásadný rozdiel medzi bunkovými a klasickými sieťami spočíva vo väčšej zložitosti spracovania hovoru v bunkovej sieti a s tým súvisiacou väčšou zložitosťou stacionárnych aj mobilných staníc.

Myšlienka rozdelenia obsluhovanej oblasti do menších celkov (tzv. buniek) pochádza už z roku 1947 od pracovníka Bellových laboratórií D. H. Ringa. Je potrebné si uvedomiť, že analógové bunkové siete sa významne neodlišujú od klasických sietí, ktoré im predchádzali. Základom ostáva využitie FM modulácie, no novou myšlienkou je bunkové usporiadanie. Táto myšlienka priniesla možnosť dosiahnuť takmer neobmedzenú kapacitu siete (z hľadiska pokrytia územia) a to bez využitia nejakého zásadného technologického objavu. Bunková štruktúra je teda systémovou koncepciou, ktorá je nezávislá od rádiových technológií.

Tradičné (nebunkové) riešenie predstavuje podobný systém ako je televízne alebo rádiové vysielanie, t. j. výkonný vysielač na najvyššom bode oblasti, vyžarujúci rádiový signál až k rádiovému horizontu (~80 km). Výsledkom bolo dobré pokrytie danej oblasti signálom, no súčasne to znamenalo, že malý počet dostupných rádiových kanálov bol blokovaný na veľkej ploche malým počtom hovorov.

Bunkový prístup rieši problém pokrytia oblasti odlišne. Model "klasického" rádiového vysielania bol opustený a daná oblasť bola rozdelená na menšie časti (bunky) s polomerom jednotiek km, ktoré boli obsluhované vysielačmi s malým výkonom (obr. 3.1).



Obr. 3.1. Porovnanie koncepcie klasickej a bunkovej siete

Základný prínos bunkovej siete spočíva v zmenšení plochy oblastí obsluhovaných určitými rádiovými kanálmi, čo umožňuje opäť využiť tieto kanály po určitej vzdialenosti v ďalších bunkách.

Hexagonálny tvar bunky predstavuje zjednodušený model rádiového pokrytia každého vysielača a bol prijatý z dôvodu jednoduchšej analýzy bunkovej siete.

Skutočné pokrytie je predstavované amorfným obrazcom, ktorý však nie je vhodný na plánovanie a analýzu bunkovej siete. Prirodzenejšou voľbou reprezentácie tvaru bunky by bol kruh, ktorý však neumožňuje realizovať pokrytie určitej oblasti bez medzier a prekrytí, čo by komplikovalo ďalšie výpočty v sieti.

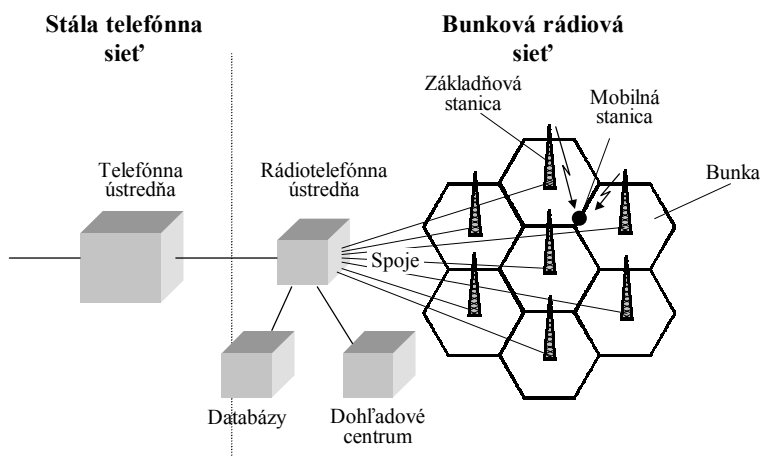
ARCHITEKTÚRA BUNKOVEJ RÁDIOVEJ SIETE

Základom každej bunkovej siete sú tieto časti (obr. 3.2):

- **Mobilná stanica** (ďalej MS) – mobilná telefónna stanica sa skladá z riadiacej časti, vysielača, prijímača, antény a zdroja.
- **Základňová stanica** (ďalej ZS) – zabezpečuje spojenie medzi rádiatelefonnou ústredňou a mobilnými stanicami. Skladá sa z riadiacej jednotky, zo zariadení jednotlivých rádiových kanálov, antén, napájacieho systému a dátových terminálov.
- **Rádiatelefonná ústredňa** (ďalej RTF ústredňa) – je centrálnym koordinačným prvkom celej bunkovej siete (všetkých základňových staníc) a obsahuje bunkový procesor a prepojovaciu časť. Zabezpečuje prepojenie bunkovej siete s pevnou telefónnou sieťou (prostredníctvom miestnej telefónnej ústredne), ovláda obsluhu hovorov, zabezpečuje ich účtovanie ap. Typická RTF ústredňa (označenie MSC –

Mobile Switching Center) obsluhuje 100 000 účastníkov a zabezpečuje realizáciu asi 5 000 hovorov v danom okamihu.

- **Databázy** – slúžia na evidenciu mobilných staníc, registráciu predplatených služieb a prevádzkových oblastí a predstavujú základný informačný prvok pri lokalizácii účastníka.
- **Dohľadové centrum** – realizuje technický a organizačný dozor nad sieťou.
- **Spoje bunkovej siete** – rádiové a vysokorychlostné dátové spoje prepojujú vyššie uvedené zložky bunkovej siete.



Obr. 3.2. Architektúra bunkovej rádiovéj siete

PRINCÍP ČINNOSTI BUNKOVEJ RÁDIOVEJ SIETE

Komunikácia medzi ZS a MS je definovaná spoločným rádiovým rozhraním CAI (Common Air Interface), ktorý definuje 4 rôzne kanály. Kanály využívané na rečovú komunikáciu od ZS k MS sa nazývajú **dopredné (forward)**, alebo **zostupné (downlink) rečové kanály** a podobne kanály využívané na prenos reči od MS k ZS sú označené ako **spätné (reverse)**, alebo **vzostupné (uplink) rečové kanály**. Tieto kanály sú plne duplexné, čo znamená, že každý hovor využíva dve rôzne frekvencie alebo časové úseky.

Okrem rečových kanálov sa používajú **riadiace kanály** – dopredné a spätné, ktoré sú určené na vytvorenie spoja. Tieto kanály prenášajú informáciu o začatí hovoru, požiadavky na rôzne služby a sú monitorované každou MS. Dopredné riadiace kanály sú využívané aj na nepretržité vysielania prevádzkových požiadaviek pre všetky MS v sieti.

Realizácia hovoru

Každá ZS vysiela nepretržite signál na zostupnom riadiacom kanáli. MS po zapnutí zdroja prehľadáva zoznam zostupných riadiacich kanálov a hľadá signál s najväčším výkonom. Tento kanál potom monitoruje aj v ďalšej prevádzke a akonáhle výkon signálu riadiaceho kanálu poklesne pod stanovenú úroveň, začne opäť prehľadávať zoznam riadiacich kanálov.

Príjem hovoru mobilnou stanicou

Pri volaní mobilného účastníka RTF ústredňa vysiela cez zostupné riadiace kanály základňových staníc v sieti vyhľadávaciú informáciu, ktorá obsahuje **identifikačné číslo mobilnej stanice – MIN** (Mobile Identification Number) slúžiace ako telefónne číslo mobilného účastníka. Mobilná stanica prijme MIN cez riadiaci kanál, ktorý monitoruje a identifikuje sa cez vzostupný riadiaci kanál. ZS odovzdá identifikáciu RTF ústredni, ktorá oznámi ZS rečový kanál, na ktorom bude prebiehať hovor (typicky je v ZS pridelených 10 –

60 rečových kanálov a 1 riadiaci kanál). ZS potom signalizuje MS aby nastavila frekvencie duplexného páru rečového kanála. Následne cez zostupný rečový kanál vysiela ZS dátovú správu, ktorá spustí vyzváňanie v MS.

Akonáhle začne prebiehať hovor, RTF ústredňa adaptívne mení vysielač výkon mobilnej stanice a kanály tak, aby kvalita hovoru neklesla pod stanovenú úroveň.

Začatie hovoru mobilnou stanicou

Na vzostupnom riadiacom kanáli vyšle MS požiadavku na realizáciu volania. Súčasne s touto požiadavkou je vyslané vlastné telefónne číslo MS (MIN), *elektronické sériové číslo – ESN* (Electronic Serial Number), telefónne číslo volaného účastníka a *označenie výkonovej triedy mobilnej stanice – SCM* (Station Class Mark), ktorá udáva maximálny vysielač výkon danej MS.

ZS prijme tieto údaje a odošle ich RTF ústredni, ktorá overí autentickosť požadovaných služieb (zaznamenané v registroch), realizuje spojenie do pevnej telefónnej siete a súčasne oznámi ZS a MS duplexný pár rečového kanála, na ktorom bude prebiehať hovor.

Roaming

Táto služba umožňuje účastníkom mobilných sietí viesť hovory aj v iných oblastiach ako v tých, v ktorých si predplatili služby mobilnej siete.

Keď účastník vstúpi do oblasti mobilnej siete, v ktorej nemá predplatené služby, je zaregistrovaný ako roamer (cestovateľ). RTF ústredňa pravidelne po určitom čase (niekoľko minút) vysiela globálny povel cez všetky dostupné riadiace kanály v sieti, v ktorom žiada všetky MS, ktoré ešte nie sú registrované, aby vyslali svoje identifikačné čísla MIN a ESN cez vzostupný riadiaci kanál.

RTF ústredňa potom pomocou oboch čísiel pre neregistrované MS vyžiada informáciu o predplatených službách z *databázy domácich účastníkov – HLR* (Home Location Register). Ak má daný účastník oprávnenie roamingu, je zaregistrovaný ako platiaci účastník a účtovanie služieb je automaticky smerované do jeho domácej siete.

Registrácia a lokalizácia mobilnej stanice

MS sa po nájdení najsilnejšieho dostupného riadiaceho kanála prihlási do siete (viď vyššie). Tento proces nazvaný *registrácia mobilnej stanice* už bol popísaný vyššie a preto sa sústredíme na ďalšiu funkciu bunkovej siete – lokalizáciu mobilnej stanice.

V bunkovej sieti je až 80 % hovorov realizovaných z mobilnej stanice a len 20 % hovorov sa začína z pevnej telefónnej siete. Táto skutočnosť sa využíva na proces *autolokalizácie stanice*.

Mobilná stanica, ktorá začína hovor, určuje sieti oblasť (bunku), v ktorej sa nachádza. V prípade, že sa mobilná stanica pohybuje dlhšiu dobu v sieti bez toho, že by viedla nejaký hovor, je informácia o lokalizácii stanice neaktualizovaná. V prípade smerovania hovoru k tejto mobilnej stanici sieť musí prehľadávať všetky bunky, kým daného účastníka nenájde.

Je známych niekoľko spôsobov ako vyhľadať určitú mobilnú stanicu v sieti a smerovať k nej hovor:

1. **Záplavové smerovanie.** Výzva k mobilnej stanici je vysielať cez všetky riadiace kanály buniek, patriacich určitej RTF ústredni. Ak sa v tejto oblasti mobilná stanica nenájde, sieť začne prehľadávať oblasť patriacu inej RTF ústredni. Základnou výhodou tohto spôsobu je jeho jednoduchosť, no nevýhodou je veľké zaťaženie riadiacich kanálov v bunkách, v ktorých sa mobilná stanica vôbec nevyskytuje.
2. **Smerovanie určené prevádzkovou oblasťou.** Databáza RTF ústredne obsahuje informáciu, v ktorej prevádzkovej oblasti sa nachádza daná mobilná stanica. Výzva je potom vysielať len cez riadiace kanály buniek danej prevádzkovej oblasti.

3. **Smerovanie určené bunkou.** Používa sa pre bunky s polomerom desiatky kilometrov. Podľa údajov v databáze sa výzva vysielala iba v danej bunke.
4. **Smerovanie určené lokalizačnou oblasťou.** Spôsob smerovania aplikovaný v digitálnych bunkových sieťach, kde lokalizačnú oblasť tvorí niekoľko susedných buniek (napr. sedem). Určenie veľkosti lokalizačnej oblasti je optimalizačná úloha pre konkrétne rozmiestnenie základňových staníc v sieti.

ZÁKLADNÉ PRINCÍPY BUNKOVEJ ARCHITEKTÚRY

Bunková architektúra je založená na štyroch základných princípoch:

5. Vysielače s malým výkonom.
6. Opakované využitie rádiových kanálov.
7. Delenie buniek a sektorizácia buniek za účelom zväčšenia kapacity siete.
8. Prepnutie hovoru počas prechodu hranicou bunky (handover).

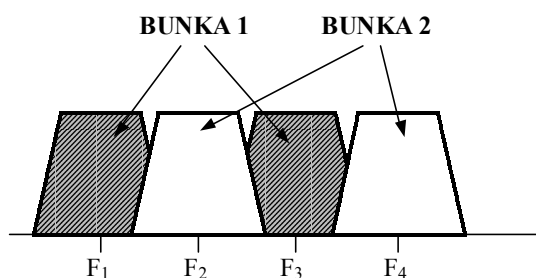
Vysielače s malým výkonom a opakované využitie rádiových kanálov

Vedci z Bellových laboratórií si uvedomili, že ak budú použité vysielače s relatívne nízkym výkonom, čiže, ak sa rádiové signály budú šíriť len na krátke vzdialenosti, je možné opakovane použiť rovnaké frekvenčné kanály pri minimálnom rušení v blízkych oblastiach. Tento jav je kľúčovým rysom bunkových sietí – rozdelenie oblasti do veľkého počtu malých buniek, z ktorých každá je obsluhovaná vysielačom s nízkym výkonom, pričom rádiové kanály sú opakovane využívané. To umožňuje obsluhovať veľký počet účastníkov súčasne.

Architektúra klasických sietí viedla k tomu, že tieto siete boli obmedzené šumom (t. j. väčší výkon vysielača znamenal lepší pomer signál/šum v prijímači mobilnej stanice). Na rozdiel od týchto sietí predstavujú bunkové siete tzv. *siete obmedzené rušením*. Každý prijímač siete je vystavený nielen šumovým vplyvom okolia ale hlavne rušiacim signálom prichádzajúcim z buniek, ktoré využívajú rovnaké rádiové kanály. Vplyvy tohto rušenia sú podstatne väčšie ako vplyvy šumu.

V bunkových rádiových sieťach existuje niekoľko druhov rušenia. **Rušenie zo susedného kanála** nastane vtedy, keď informácia vysielaná v jednom rádiovom kanáli sa súčasne objaví aj v kanáli susednom, kde spôsobí rušenie "užitočného" signálu. Zníženie vplyvu tohto rušenia sa rieši tromi spôsobmi:

- filtrovaním signálu na vysielačej strane – obmedzenie šírky frekvenčného spektra vysielaného signálu,
- filtrovaním signálu na prijímacej strane – odfiltrovanie nežiaduceho (rušiaceho) signálu,
- organizačným usporiadaním kanálov (obr. 3.3).



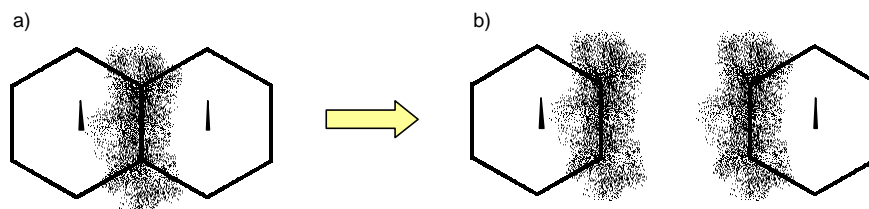
Obr.3.3. Organizačné usporiadanie rádiových kanálov

Dominantnou formou rušenia v bunkových RTF sieťach je však **rušenie zo zhodného kanála**. Pretože toto sa vyskytuje v rovnakom frekvenčnom pásme ako užitočný signál, nemôže byť odstránené filtrovaním. Tento druh rušenia sa stal najdôležitejším obmedzujúcim činiteľom, ktorý ovplyvňuje tzv. model opakovania rádiových kanálov.

Pomer signál/rušenie, označovaný S/I (Signal/Interference), je základným činiteľom na aplikovanie modelu opakovania rádiových kanálov. Na vysvetlenie si predstavme situáciu znázornenú na obr.

3.4.

Na mobilnú stanicu pohybujúcu sa v blízkosti hraníc oboch buniek by vplývalo silné rušenie. Toto je dôvod, prečo nemôžu byť použité rovnaké rádiové kanály v susedných bunkách. Zóna rušenia je veľmi široká, pretože podmienky šírenia signálu sa neustále menia. Hranice bunky musia byť určené tak, aby sa nenachádzali v rušenej zóne (obr. 3.4b).



Obr. 3.4. Definícia hraníc buniek pri použití rovnakých komunikačných kanálov v susedných bunkách (a) a pri oddialení buniek (b)

Táto podmienka sa realizuje geografickým oddelením buniek so zhodnými rádiovými kanálmi. Minimálna vzdialenosť medzi dvomi bunkami so zhodnými skupinami rádiových kanálov závisí od mnohých činiteľov, napr. od počtu buniek so zhodnými skupinami rádiových kanálov v blízkosti centrálnej bunky, profilu terénu, výšky antény, vysielačieho výkonu každej základňovej stanice.

Na objasnenie koncepcie opakovaného využitia kanálov uvažujme bunkovú sieť, ktorá má celkove S duplexných kanálov. Ak S kanálov rozdelíme medzi K buniek tak, že sa neopakujú a každej bunke pridáme skupinu k kanálov, potom celkový počet kanálov môžeme vyjadriť ako

$$S = k \cdot K \quad (3.1)$$

Počet buniek K , ktoré spoločne používajú kompletnú sadu všetkých pridelených kanálov sa nazýva **zväzok kanálov (cluster)** (obr. 3.5).

Ak je tento zväzok opäť použitý M -krát v celej sieti, celkový počet duplexných kanálov C predstavuje **kapacitu siete**

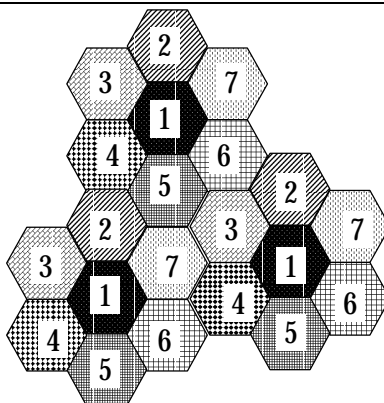
$$C = M \cdot S = M \cdot k \cdot K \quad (3.2)$$

Činiteľ K sa nazýva aj **veľkosť zväzku** a typicky nadobúda hodnoty 4, 7, alebo 12.

Ak redukuje činiteľ K pri zachovaní rozmeru buniek, potom na pokrytie danej oblasti potrebujeme viac zväzkov kanálov, čoho dôsledkom je zväčšenie kapacity siete C .

Malá hodnota K značí, že bunky s rovnakými kanálmi sú bližšie pri sebe ako pri veľkej hodnote K . Hodnota K je funkciou veľkosti rušenia, ktoré dokáže tolerovať mobilná, alebo základňová stanica pri zachovaní požadovanej kvality komunikácie. Z hľadiska návrhu je žiaduce navrhnúť sieť s najmenšou možnou hodnotou K , čím sa maximalizuje kapacita v danej oblasti.

Koeficient opakovania kanálov bunkovej siete je $1/K$, pretože každá bunka v skupine má pridelených $1/K$ celkového počtu kanálov v sieti.



Obr. 3.5. Model opakovania kanálov v bunkovej sieti

Podľa geometrického usporiadania zväzku kanálov (obr. 3.5) je zrejmé, že prakticky existujú len určité veľkosti zväzkov kanálov, ktoré je možné vyjadriť rovnicou

$$K = i^2 + ij + j^2, \quad (3.3)$$

kde i a j sú kladné celé čísla.

Na nájdenie najbližšej bunky s rovnakou skupinou kanálov je potrebné :

9. posunúť sa o i buniek pozdĺž ľubovoľného radu buniek, potom
10. zmeniť smer o 60° proti smeru hodinových ručičiek a posunúť sa o j buniek.

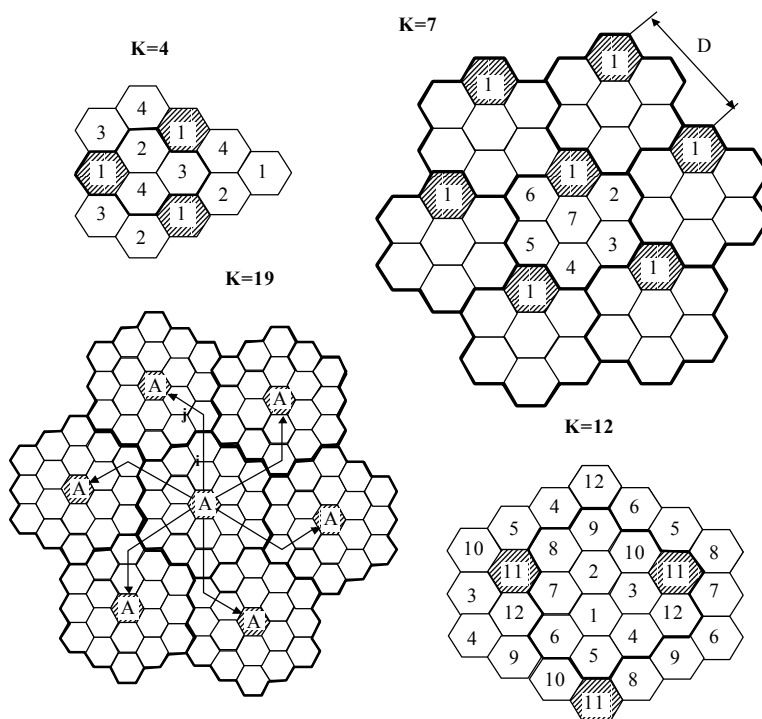
V tab.3.1. sú uvedené hodnoty i , j a im zodpovedajúce hodnoty činiteľa K .

Tab.3.1.

Stanovenie modelov opakovania rádiových kanálov

i	j	K	D
1	0	1	1,73
1	1	3	3,00
2	0	4	3,46
2	1	7	4,58
3	0	9	5,20
2	2	12	6,00
3	1	13	6,24
4	0	16	6,93
3	2	19	7,55
4	1	21	7,94
4	2	28	9,17

Na obr. 3.6. sú znázornené niektoré prakticky používané modely opakovania kanálov v bunkových sieťach.

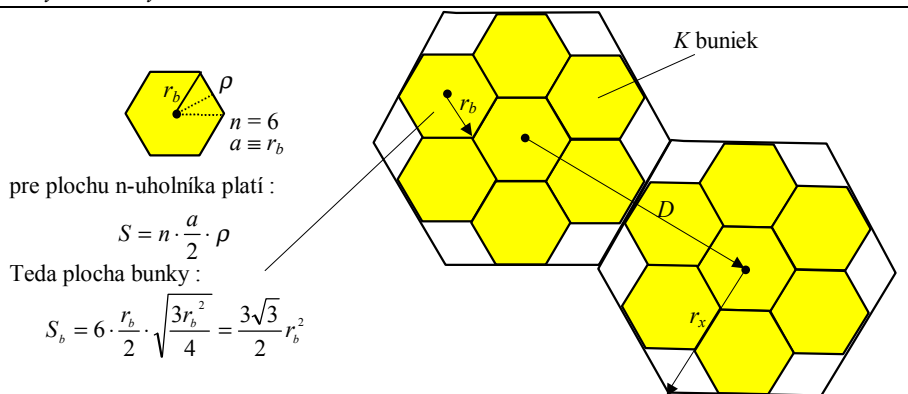


Obr. 3.6. Modely opakovania rádiových kanálov

Na určenie minimálnej vzdialenosti pre opakovanie kanálov D definujeme ekvivalentnú oblasť, ktorej plocha je totožná s plochou zväzku K buniek v modeli opakovania kanálov (obr. 3.7).

Je zrejmé, že čím väčšia je hodnota D , tým menšia je možnosť výskytu rušenia z rovnakého kanála. Teoreticky by to znamenalo vybrať model s najväčším počtom buniek, čiže s najväčšou hodnotou K . V skutočnosti je však hodnota K ohraničená zhora maximálnym počtom rádiových kanálov pridelených danej bunkovej sieti.

Všetky dostupné rádiové kanály sa totiž rozdelia medzi K bunkami modelu, čo znamená, že ak hodnota K bude príliš veľká, potom počet rádiových kanálov pridelených každej z K buniek modelu je malý (napr. ak je pre bunkovú sieť vyčlenených 1 000 rádiových kanálov, potom v modeli $K=4$ je každej zo 4 buniek pridelených 250 rádiových kanálov. Ak však použijeme model $K=19$, poklesne počet rádiových kanálov určených každej z 19-tich buniek na 53).



Vzdialenosť stredov veľkých oblastí $D = 1,73r_x = \sqrt{3} \cdot r_x$, čiže

$$r_x = \frac{D}{\sqrt{3}}$$

Pre plochu ekvivalentnej oblasti (K buniek) platí:

$$S_x = \frac{3\sqrt{3}}{2} r_x^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot \left(\frac{D}{\sqrt{3}}\right)^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot D^2$$

alebo ak vyjadríme plochu pomocou plochy buniek :

$$S_x = K \cdot S_b = K \frac{3\sqrt{3}}{2} r_b^2$$

Porovnaním S_x oboch vzťahov :

$$\boxed{\frac{D}{r_b} = \sqrt{3K}}$$

Obr. 3.7. Určenie vzdialenosti D

Úlohou je teda zistiť minimálnu hodnotu K , pri ktorej bunková sieť ešte vyhovuje požiadavkám na kvalitu hovoru. Na zabezpečenie kvality hovoru, ktorá bola určená na základe subjektívnych testov, bola zistená minimálna hodnota $S/I = 18$ dB (pre analógové siete používajúce FM moduláciu), resp. 9-13 dB (pre digitálne siete).

Teraz určíme, v ktorom z uvedených modelov opakovania rádiových kanálov sa hodnota S/I najviac približuje 18 dB. Pomer S/I v prijímači sledovanej mobilnej stanice je daný

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{k=1}^{N_I} (I_k)} \quad (3.4)$$

kde N_I je počet rušiacich buniek.

Hodnotu S/I určujeme v *najnevýhodnejšej polohe MS* z hľadiska rušenia, t. j. na hranici bunky. V tomto bode môžeme hodnotu výkonu užitočného signálu vyjadriť ako $S = r_b^{-\alpha}$.

V hexagonálne tvarovanej bunkovej sieti existuje vždy 6 rušiacich buniek s rovnakými kanálmi v 1. rušiackej oblasti (obr. 3.6). Ak zanedbáme tepelný šum, je pomer S/I daný

$$\frac{S}{I} = \frac{r_b^{-\alpha}}{\sum_{k=1}^6 D_k^{-\alpha}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^6 \left(\frac{D_k}{r_b}\right)^{-\alpha}} \quad (3.5)$$

Ak pre jednoduchosť predpokladáme, že D_k je rovnaké pre všetkých šesť rušiacich buniek ($D = D_k$), potom sa vzťah (3.5) zmení

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{6 \cdot (\sqrt{3K})^\alpha} = \frac{(\sqrt{3K})^\alpha}{6} \quad (3.6)$$

Vzťah (3.6) udáva závislosť pomeru S/I od hodnoty veľkosti skupiny kanálov K .

Ďalej určíme hodnotu K , ktorá umožní dosiahnuť požadovanú hodnotu pomeru $S/I = 18$ dB (pre $\alpha = 4$):

a) $K = 4$

$$\frac{S}{I} = \frac{(\sqrt{3 \cdot 4})^4}{6} = 24 \quad \text{t.j. } 13,8 \text{ dB} \quad (3.7)$$

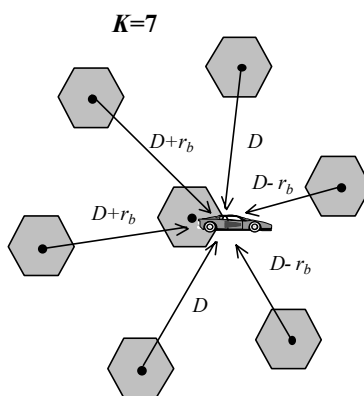
b) $K = 7$

$$\frac{S}{I} = \frac{(\sqrt{3 \cdot 7})^4}{6} = 73,5 \quad \text{t.j. } 18,7 \text{ dB} \quad (3.8)$$

Z výpočtov vyplýva, že na zabezpečenie požadovanej hodnoty $S/I = 18$ dB je potrebné použiť 7 – bunkový model.

Predošlý predpoklad, že vzdialenosť všetkých rušiacich ZS je od MS rovnaká, má v mnohých prípadoch optimistický výsledok.

Uvažujme teraz reálnejšiu sieť s MS, nachádzajúcou sa na hranici vlastnej bunky, pričom vzdialenosť k rušiacim ZS nie je rovnaká (obr. 3.8).



Obr. 3.8. Medzibunkové rušenie v najnevýhodnejšej polohe mobilnej stanice

Pomer S/I môže byť vyjadrený ako

$$\frac{S}{I} = \frac{r_b^{-\alpha}}{2 \cdot (D-r_b)^\alpha + 2 \cdot D^{-\alpha} + 2 \cdot (D+r_b)^\alpha} \quad (3.9)$$

Ak $\alpha = 4$ a $q = D/r_b$, môžeme vzťah (3.9) prepísať

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{2 \cdot (q-1)^4 + 2 \cdot q^{-4} + 2 \cdot (q+1)^4} \quad (3.10)$$

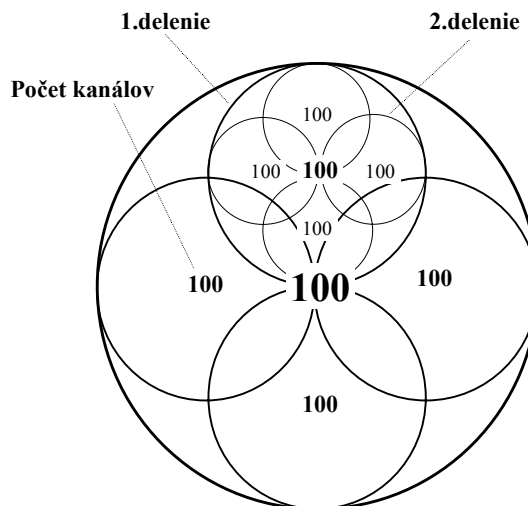
Dosadením za $q = 4,6$ dostaneme $S/I = 54,3$ (17,3 dB). Teda pre 7 – bunkový model je hodnota pomeru S/I menšia ako 18 dB pre najnevýhodnejšiu polohu MS.

V reálnej situácii, vzhľadom na konfiguráciu terénu, je pomer S/I často menší ako 17,3 dB (14 dB, alebo menší). Ak uvažujeme najhorší prípad rušenia pre sedembunkový model, je zrejmé, že hodnota $q = 4,6$ nie je dostatočná pre bunkovú sieť so všesmerovými anténami. Za takýchto okolností je potrebné voliť sieť s hodnotou $q = 6,0$ ($K = 12$). Tento model zabezpečí dosiahnutie hodnoty $S/I = 22,5$ dB.

Delenie buniek a sektorizácia buniek

V predchádzajúcej časti sme ukázali ako súvisí polomer bunky s minimálnou vzdialenosťou potrebnou na rozmiestnenie buniek s rovnakými rádiovými kanálmi. Ak dokážeme zmenšiť polomer bunky, znamená to, že bunky s rovnakou skupinou komunikačných kanálov sa budú nachádzať v menšej absolútnej vzdialenosti a teda na danom území vzrastie kapacita siete.

Každé zmenšenie polomeru bunky o 50 % vedie k štvornásobnému zväčšeniu prenosovej kapacity v danej oblasti (obr. 3.9).



Obr.3.9. Nárast kapacity pri delení bunky

Ak platí:

$$r_{b \text{ po delení}} = \frac{r_{b \text{ pred delením}}}{2} \quad (3.11)$$

Potom platí:

$$Plocha_{\text{nová bunka}} = \frac{Plocha_{\text{pôvodná bunka}}}{4} \quad (3.12)$$

$$C_n = C_p \cdot 4^n \quad (3.13)$$

kde C_n je nová kapacita bunky, C_p je pôvodná kapacita bunky a n je počet delení bunky. Potom pre príklad na obr. 3.9 je $n = 2$ a nová kapacita je $100 \times 4^2 = 1\,600$ komunikačných kanálov.

Je zrejme, že vybudovať bunkovú sieť s tisícami malých buniek by bolo veľmi nákladné. Preto sa hľadal iný spôsob, ktorý by umožnil dynamicky vytvárať menšie bunky v oblastiach, kde to bude nevyhnutne potrebné, zatiaľ čo v ostatných oblastiach sa môžu ponechať bunky pôvodnej veľkosti. Koncepcia, ktorá to umožňuje sa nazýva **delenie buniek** (Cell Splitting). Na začiatku pracuje bunková sieť s bunkami s pôvodným polomerom. Akonáhle hustota prevádzky dosiahne bod, v ktorom existujúci počet rádiových kanálov pridelených bunke už nemôže zabezpečiť požadovanú úroveň služby (napr. pravdepodobnosť blokovania hovoru max. 0,02), potom je táto bunka rozdelená na určitý počet menších buniek. Pretože veľkosť buniek je určená aj výkonom vysielačov (okrem ostatných spomínaných činiteľov), je potrebné regulovať ich výkon v novovytvorených základňových staniciah.

Predpokladajme napríklad, že polomer novej bunky je po delení polovičný, t. j. $r_b/2$. Potom výkon prijímaný na hranici pôvodnej bunky je

$$P_R = k \cdot P_p \cdot r_b^{-\alpha} \quad (3.14)$$

kde k je konštanta, r_b je polomer bunky a P_p je vysielačový výkon pôvodnej bunky. Podobne výkon prijímaný na hranici novej bunky je

$$P_R = k \cdot P_n \cdot \left(\frac{r_b}{2}\right)^{-\alpha} \quad (3.15)$$

kde P_n je vysielačiaci výkon novej bunky. Pretože prijímané výkony v oboch modeloch musia byť rovnaké ($P_R = P_R$), platí

$$P_n = P_p \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{-\alpha} \quad (3.16)$$

Pri hodnote $\alpha = 4$ je $P_n = P_p/16$, t. j. základňová stanica v novej bunke musí zmenšiť vysielačiaci výkon 16krát, t. j. o 12 dB.

Model opakovania rádiových kanálov, ktorý bol použitý v pôvodnom usporiadaní je opätovne použitý v novej, menšej oblasti a celková prevádzková kapacita je toľkokrát väčšia ako pôvodná, koľko bolo vytvorených nových buniek. Každá menšia bunka má ten istý počet rádiových kanálov ako mala pôvodná bunka.

Proces delenia buniek môže pokračovať rovnakým spôsobom podľa potrieb ďalej. Architekti bunkových sietí predpokladali minimálne tri etapy delenia buniek (obr. 3.10), pričom pri každej etape je nevyhnutné:

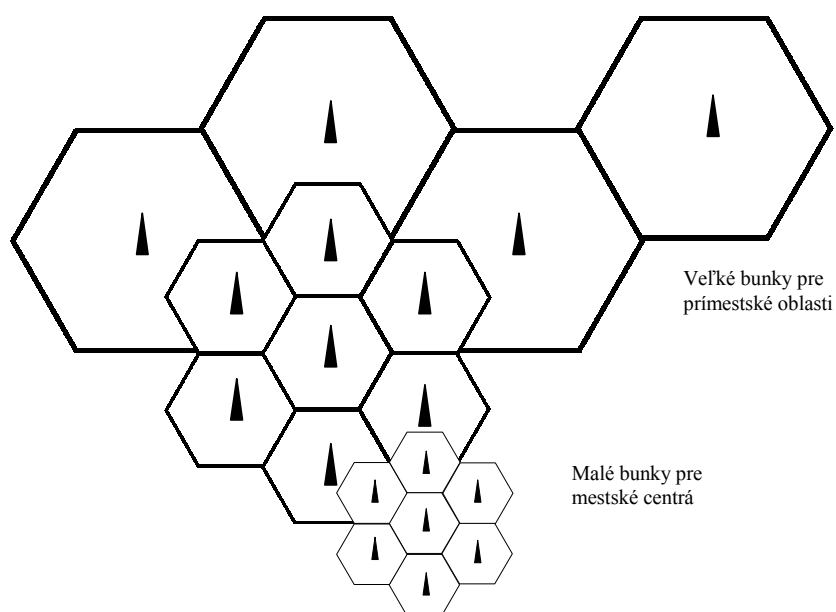
11. redukovať výkon vysielačov nových základňových staníc (minimalizácia rušenia zo zhodného kanála),
12. vybudovať nové základňové stanice (aktivovať ich), pričom základná nevýhoda - vysoké náklady, môže byť vyvážená zvýšením príjmov od ďalších účastníkov.

Z toho, čo bolo doteraz konštatované vyplýva, že poznáme dva základné princípy delenia buniek:

13. statické delenie,
14. dynamické delenie.

Pri **statickom delení** sú rozmery buniek vopred prispôsobené požiadavkám prevádzky v danej oblasti (obr. 3.10). Hlavnou nevýhodou **dynamického delenia** je jeho realizácia v reálnom čase, pretože je potrebné udržať v spojení veľké množstvo prebiehajúcich hovorov a po aktivovaní nových základňových staníc tieto hovory na ne prepojiť. Tento problém je o to zložitejší, že delenie buniek prebieha práve v okamihu preťaženia siete.

Delenie buniek umožňuje podstatne zväčšiť kapacitu siete. Tým, že zmenšíme polomer bunky r_b a nezmeníme hodnotu pomeru D/r_b , delenie buniek zväčší počet kanálov na jednotku plochy.

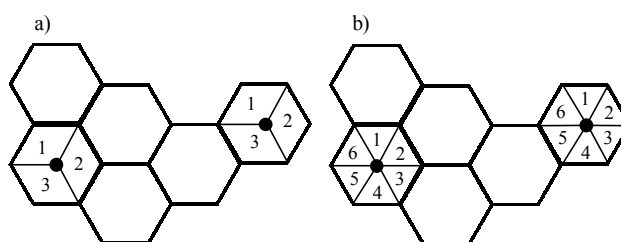


Obr. 3.10. Statické delenie buniek

Ďalší spôsob ako zväčšiť kapacitu siete je nezmeniť polomer bunky, ale hľadať metódy na zmenšenie pomeru D/r_b . V tomto prípade je nárast kapacity dosiahnutý redukciou počtu buniek v skupine a tým následným zväčšením počtu kanálov v danej oblasti. Na dosiahnutie tohto cieľa je však potrebné redukovať vzájomné rušenie bez zmenšenia hodnoty vysielaného výkonu.

Rušenie zo zhodného kanála môže byť redukované nahradením všesmerových antén v ZS niekoľkými smerovými anténami, z ktorých každá vyžaruje v určenom sektore bunky. V tomto usporiadaní je bunka rozdelená na tri alebo na šesť sektorov (**sektorizácia buniek**) pomocou troch alebo šiestich smerových antén so šírkou vyžarovacieho laloka 120° , resp. 60° (obr. 3.11).

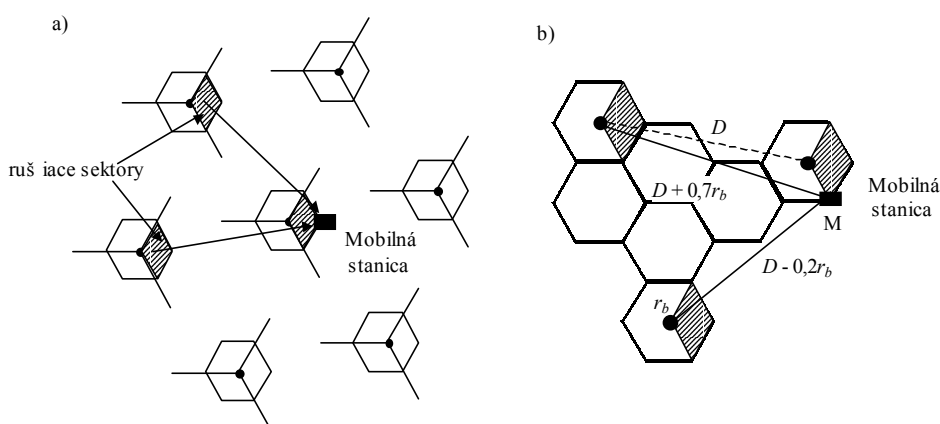
Následkom tohto usporiadania je, že ZS prijíma rušenie len od časti buniek so zhodnými kanálmi a podobne vysielá signál len k časti týchto buniek. Kanály danej bunky sú rozdelené do sektorov a sú použité len v príslušných zhodne orientovaných sektorochoch.



Obr. 3.11. Sektorizácia buniek pomocou smerových antén 120° (a) a 60° (b)

Sektorizácia po 120°

Na určenie hodnoty S/I v sektorovom usporiadaní po 120° uvažujeme opäť najnevýhodnejšiu pozíciu mobilnej stanice (obr. 3.12).



Obr. 3.12. Rušenie zo zhodného kanála pre 120° sektory (a) a geometria rušenia pre najnevýhodnejšiu polohu mobilnej stanice (b)

Použitím smerových antén so šírkou laloka 120° sa počet rušiacich základňových staníc zredukoval na dve (obr. 3.12a). V najnevýhodnejšej pozícii mobilnej stanice (bod M na obr. 3.12b) je táto vzdialená od dvoch rušiacich základňových staníc $D+0,7r_b$ a $D-0,2r_b$. Pomer S/I pri prijíme v mobilnej stanici bude

$$\frac{S}{I} = \frac{r_b^{-4}}{(D+0,7r_b)^4 + (D-0,2r_b)^4} \quad (3.17)$$

alebo

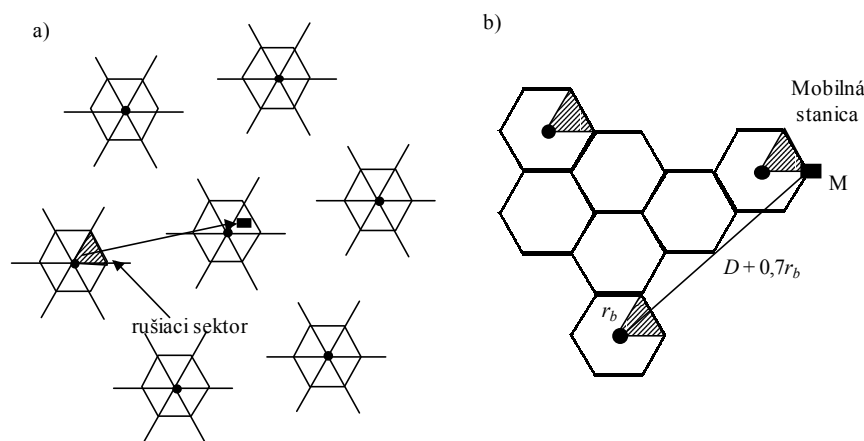
$$\frac{S}{I} = \frac{1}{(q+0,7)^4 + (q-0,2)^4} \quad (3.18)$$

Po dosadení za $q = 4,6$ dostaneme $S/I = 247$ (23,9 dB). Z výsledku je zrejmé, že použitie sektorizácie so sektormi 120° znižuje hodnotu rušenia zo zhodného kanála. V reálnej situácii, pri vysokej prevádzkovej

hustote, je hodnota pomeru S/I menšia asi o 6 dB. Dosažitá konečná hodnota $S/I = 17,9$ dB je ešte prijateľná z hľadiska rušenia.

Sektorizácia po 60°

V tomto prípade je bunka rozdelená na 6 sektorov pomocou smerových antén so šírkou laloka vyžarovacieho diagramu 60° (obr. 3.13).



Obr. 3.13. Rušenie zo zhodného kanála pre 60° sektory (a) a geometria rušenia pre najnevýhodnejšiu pozíciu mobilnej stanice (b)

V tomto usporiadaní prichádza rušenie len z jednej základňovej stanice (obr. 3.13a). Hodnotu pomeru S/I určíme takto

$$\frac{S}{I} = \frac{r_b^{-4}}{(D + 0,7r_b)^4} = (q + 0,7)^4 \quad (3.19)$$

Pre $q = 4,6$ dostaneme $S/I = 789$ (29 dB). To znamená, že použitie sektorových antén 60° prináša ďalšiu redukciu rušenia zo zhodného kanála. Po odpočítaní 6 dB (reálna prevádzka) ostávajúca hodnota $S/I = 23$ dB o 6 dB prekračuje minimálnu hodnotu.

Ďalšie zlepšenie pomeru S/I sa dosahuje **sklonom vyžarovacieho diagramu** antény ZS, pričom v smere k najbližším bunkám so zhodnými kanálmi je vo vyžarovačom laloku vytvorený zárez.

Nevýhodou sektorizácie je zväčšený počet antén ZS a pokles zväzkovej účinnosti. Pretože sektorizácia redukuje oblasť pokrytia signálom určitou skupinou kanálov, rastie aj počet prepnutí hovoru. Riešenie tohto problému spočíva v umožnení realizácie sektorového prepnutia hovoru samotnou ZS, bez intervencie RTF ústredne.

Prepnutie hovoru pri prechode hranicou bunky (handover)

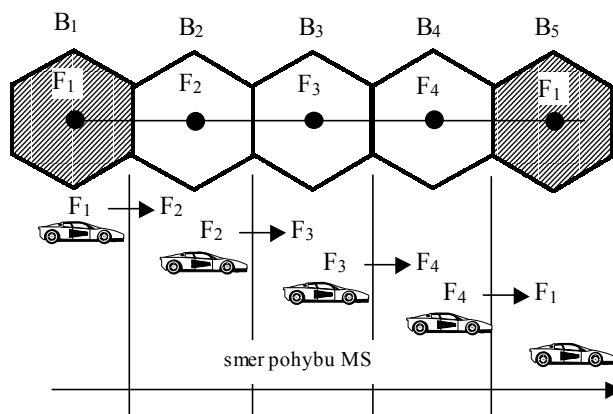
Jedným z problémov využívania malých buniek je to, že nie všetky mobilné stanice dokončia hovor v hraniciach jednej bunky. Vozidlo pohybujúce sa v husto zastavanej mestskej štvrti môže prejsť cez hranicu mnohých buniek skôr ako účastník dokončí hovor. Pretože v susedných bunkách sa využívajú odlišné skupiny rádiových kanálov, musí byť hovor "presúvaný" medzi rôznymi rádiovými kanálmi. Celý tento proces sa nazýva **prepnutie (handover, alebo handoff)**.

Konvenčná mobilná rádiová sieť je obvykle založená na výbere jedného, prípadne viacerých kanálov z určitej skupiny pridelených na použitie v danej oblasti. Účastník, ktorý začína hovor v jednej oblasti, musí opätovne začať hovor pri presune do druhej oblasti, inak bude hovor prerušený.

Prepnutie hovoru je proces automatickej zmeny rádiových kanálov v prípade, že sa mobilná stanica pohybuje smerom k inej oblasti (s inými rádiovými kanálmi) tak, aby hovor mohol pokračovať v novom rádiovom kanáli bez nutnosti jeho opätovného začatia.

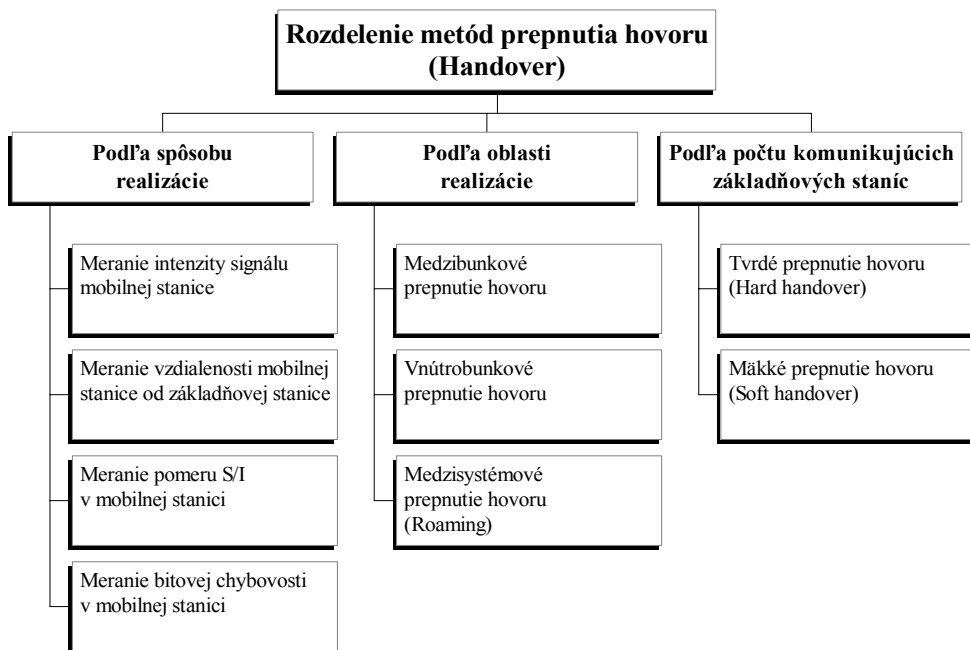
Podstatu prepnutia hovoru si ukážeme na jednoduchom príklade podľa obr. 3.14.

Predpokladajme, že mobilná stanica začína hovor v bunke B_1 a pohybuje sa smerom k bunke B_2 . V určitom okamihu musí byť hovor v rádiovom kanáli F_1 prerušený a opätovne začatý v rádiovom kanáli F_2 bunky B_2 . Celý tento proces sa musí realizovať rýchlo a automaticky.



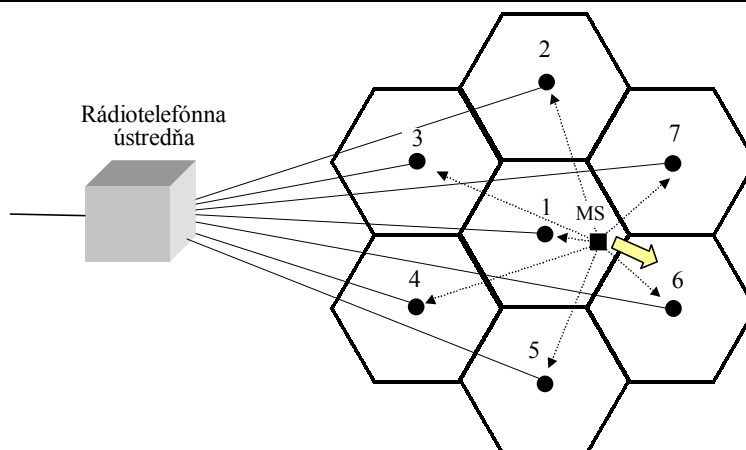
Obr. 3.14. Mechanizmus prepnutia hovoru

Celkove môžeme metódy prepnutia hovoru rozdeliť na niekoľko skupín (obr. 3.15).



Obr. 3.15. Rozdelenie metód prepnutia hovoru

V rozdelení **podľa spôsobu realizácie** sa prvé dve metódy prepnutia hovoru používajú v analógových bunkových sieťach. Klasická **metóda merania intenzity signálu mobilnej stanice** pracuje podľa schémy na obr. 3.16.



Obr. 3.16. Metóda merania intenzity signálu mobilnej stanice

Princíp prepnutia hovoru vysvetlíme podľa schémy na obr. 3.16. Keď sa mobilná stanica približuje ku hranici bunky, výkon prijímaného signálu vo "vlastnej" základňovej stanici (ZS1) klesá. Základňová stanica, ktorá realizovala spojenie neustále monitoruje výkon signálu mobilnej stanice počas hovoru. Okrem tohto monitorovania prebiehajúceho hovoru základňové stanice pomocou tzv. lokalizačného prijímača určujú aj výkon signálu mobilných staníc, ktoré sa nachádzajú v susedných bunkách. Lokalizačné prijímače vo všetkých ZS sú riadené RTF ústredňou, ktorá pomocou nameraných hodnôt z lokalizačných prijímačov určí cieľovú ZS, ktorá preberie prebiehajúci hovor.

Podľa príkladu na obr. 3.16 lokalizačný prijímač v ZS6 zaznamenáva zväčšujúcu sa hodnotu výkonu signálu MS, zatiaľ čo prijímače v ZS7 a 5 zaznamenávajú takmer konštantnú hodnotu výkonu.

Predpokladajme, že RTF ústredňa zvolí cieľovú bunku, vyberie vhodný voľný rádiový kanál a určí správny okamih na začatie procesu prepnutia hovoru. Potom vyšle povel pre mobilnú stanicu, ktorý obsahuje informáciu o novopridelenom rádiovom kanáli. Táto signalizácia prebieha počas hovoru účastníkov tak, že prebiehajúci hovor je na veľmi krátky čas prerušený a v tomto intervale sú odoslané príslušné dáta. Mobilná stanica sa preladí na nový rádiový kanál a začne vysielat' kontrolnú informáciu novej základňovej stanici. V tomto čase RTF ústredňa prepája linky medzi základňovými stanicami.

Prerušenie hovoru trvá približne 400 ms a z hľadiska prenosu reči je zanedbateľné. V prípade prenosu dát sa však stratená informácia musí obnoviť, napr. metódou ARQ (Automatic Repeat Request - požiadavka na automatické opakovanie).

Pri **metóde merania vzdialenosti medzi mobilnou a základňovou stanicou** sleduje mobilná stanica riadiaci kanál „vlastnej“ základňovej stanice a okolitých základňových staníc. Meraním fázových rozdielov zistí, ktorá základňová stanica je najbližšie a k tej sa prihlási. Základnou nevýhodou tohto spôsobu je požiadavka na presnú synchronizáciu vysielania informácie v riadiacich kanáloch. Tento spôsob prepnutia hovoru používa analógová sieť C – 450 (Nemecko).

V digitálnych bunkových sieťach sa používajú **metódy merania pomeru S/I v mobilnej stanici, alebo meranie bitovej chybovosti v mobilnej stanici**. Ich spoločnou základnou výhodou je to, že mobilná stanica rozhoduje o tom, s ktorou základňovou stanicou bude komunikovať a kedy.

Každá MS meria výkon prijímaného signálu z okolitých ZS a neustále hlási tieto hodnoty obsluhujúcej ZS. Prepnutie hovoru je realizované, akonáhle výkon prijímaného signálu z niektorej okolitej ZS prekročí výkon signálu prijímaného z obsluhujúcej ZS o určitú hodnotu počas stanoveného časového úseku.

Tieto metódy umožňujú podstatne rýchlejšie prepnutie hovoru (typicky trvá celý proces 1 – 2 sek.) ako v analógových sieťach (asi 10 sekúnd).

Podľa oblasti realizácie prepnutia hovoru rozoznávame tri základné druhy prepnutia. Vzhľadom na to, že **medzibunkové prepnutie hovoru** bolo už vysvetlené, nebudeme sa ním viacej zaoberať.

Vnútrobunkové prepnutie hovoru je možné realizovať buď medzi jednotlivými kanálmi, alebo medzi sektormi bunky. Spúšťačím mechanizmom je opäť niektorý z parametrov popísaný v rozdelení prepnutia

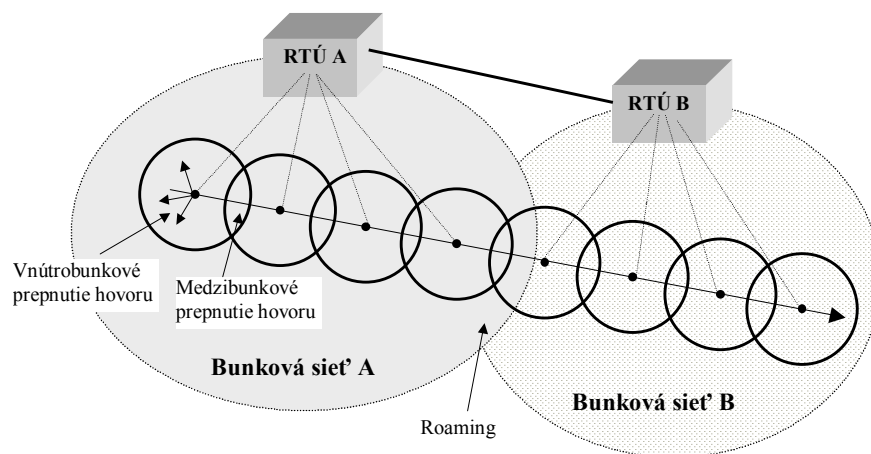
podľa spôsobu realizácie. Tento spôsob prepnutia hovoru je aktuálny hlavne v oblastiach s vysokou prevádzkovou hustotou a s malým pohybom mobilných staníc (napr. bezšnúrové telefóny).

Medzisieťové prepnutie hovoru (roaming) znamená, že mobilná stanica, ktorá začala hovor v jednej sieti (prevádzkovej jedným prevádzkovateľom a obsluhovanej jednou RTF ústredňou), môže pokračovať v tomto hovore aj v sieti inej. V súčasnej dobe sa pod pojmom roaming chápe skôr možnosť začínať hovory z iných sietí a prijímať v nich hovory.

Popísané typy prepnutia hovoru znázorňuje obr. 3.17.

V rozdelení prepnutí hovoru **podľa počtu komunikujúcich základňových staníc** rozoznávame dva základné typy. V prípade **tvrdého prepnutia hovoru (Hard handover)** je komunikácia so základňovou stanicou prerušená skôr ako je obsluha mobilnej stanice prevzatá inou základňovou stanicou. Tento spôsob prepnutia hovoru bol charakteristický pre analógové bunkové siete.

Pri **mäkkom prepnutí hovoru (Soft handover)** komunikuje mobilná stanica súčasne s viacerými základňovými stanicami a preto vlastné prepnutie hovoru sa realizuje bez straty informácie. Pretože realizácia tohto spôsobu vyžaduje spracovanie viaccestného signálu, ktorého jednotlivé kópie sú koherentne sčítané v prijímači, využíva sa táto metóda hlavne v systémoch CDMA.



Obr. 3.17. Rozdelenie prepnutí hovoru podľa oblasti realizácie