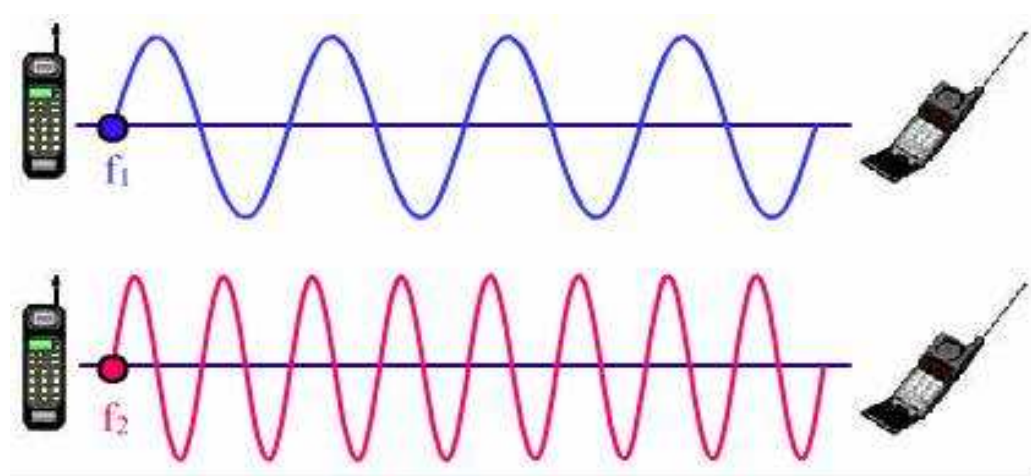


Technologie pro mobilní komunikaci

Máme-li pro daný radiokomunikační systém k dispozici určité frekvenční pásmo, které sdílí více uživatelů, můžeme použít jednu ze základních přístupových metod. Metoda tedy určuje, jak přenosové médium rozdělit na jednotlivé kanály, které účastníci dočasně používají ke komunikaci. Základní metody jsou následující :

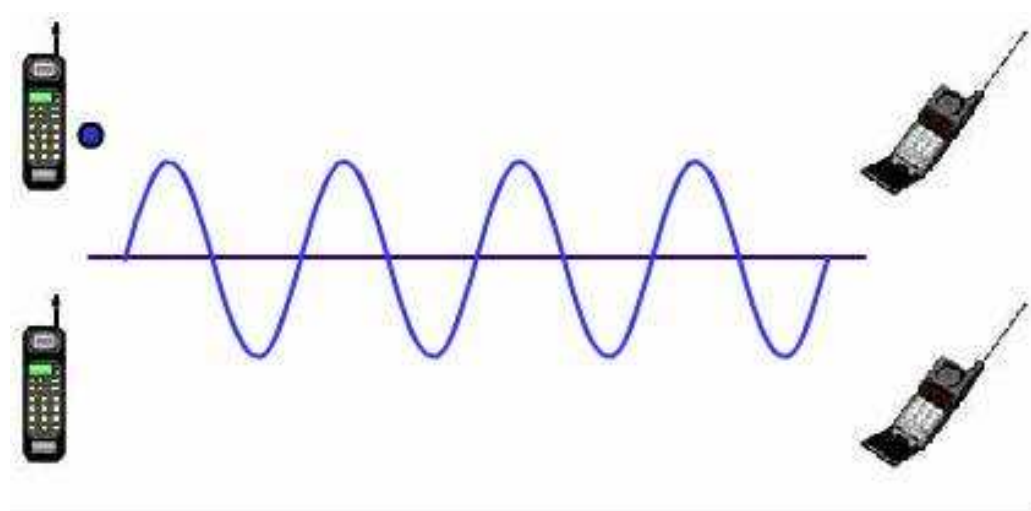
Vícenásobný přístup s kmitočtovým dělením, FDMA (Frequency Division Multiple Access)

Tato metoda spočívá v tom, že dané pásmo rozdělíme na subpásma, kterým jsou dále přiřazeny jednotlivé kanály. Jednotliví účastníci tak komunikují na různých kmitočtech. Tento princip je využíván například u analogových celulárních systémů pro mobilní komunikaci.



Vícenásobný přístup s časovým dělením, TDMA (Time Division Multiple Access)

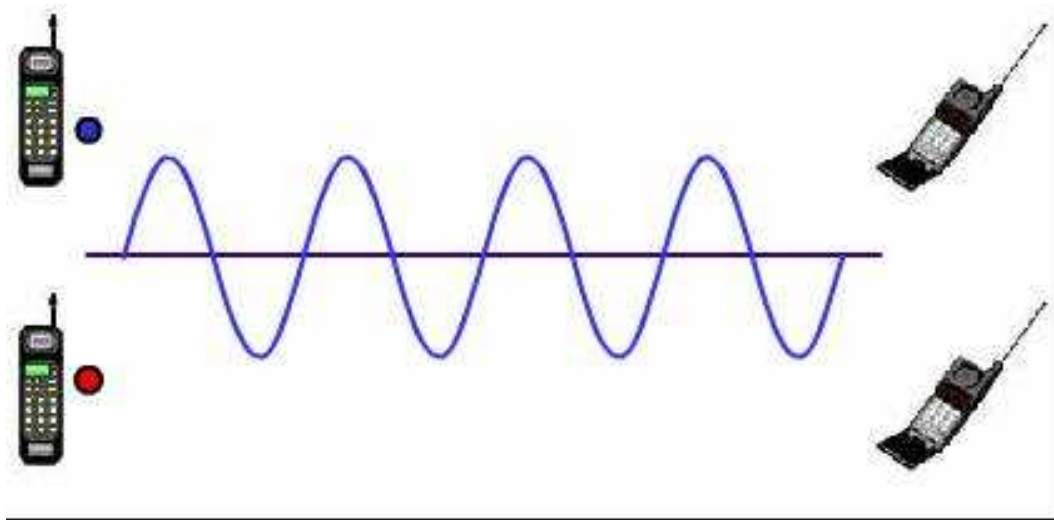
Jedná se o přístupovou metodu použitelnou pouze v digitálních systémech. V daném frekvenčním pásmu jsou vytvořeny časové úseky (intervaly, sloty) a ty jsou poté přidělovány jednotlivým uživatelům. Skupina takovýchto intervalů příslušejících různým účastníkům se nazývá rámeček.



Nevýhodou této metody je omezený dosah. Ten je způsoben různou dobou šíření rádiového signálu od různě vzdálených uživatelů, a například u systému DECT je tímto problémem omezen dosah na 7,5 km. Omezení tohoto mechanismu lze řešit měřením a kompenzací doby šíření signálu mezi základnovou stanicí a mobilní stanicí, tzn. vysláním mobilní stanice v předstihu, aby na přijímací straně nedocházelo k časové kolizi se signály jiných stanic. Tento mechanismus je implementován například v systému GSM, kde je za tímto účelem použit parametr TA (Timing Advance) a dosah u tohoto systému je 35 km.

Vícenásobný princip s kódovým dělením, CDMA (Code division Multiple Access)

Jde o novou techniku, která spočívá v tom, že datová posloupnost každého komunikačního kanálu je na vysílací straně podrobena procesu dalšího kódování podle speciálního, pro každého uživatele jedinečného, kódovacího předpisu. Tímto dojde k tzv. rozprostření úzkopásmového signálu do širokého kanálu, společného všem uživatelům. Signály všech účastníků se tedy přenášejí ve stejném frekvenčním pásmu a bez nutnosti časového oddělení. Na přijímací straně probíhá naopak dekódování a jednotlivé kanály jsou odděleny na základě dekódovacího předpisu.



Všechny tyto metody jsou v praktickém nasazení většinou kombinovány, a tak se setkáváme například s kombinací TDMA/FDMA (GSM). Pásmo je tak nejdříve rozděleno metodou FDMA na rádiové kanály, v nichž jsou potom pomocí TDMA vytvořeny kanály uživatelské.

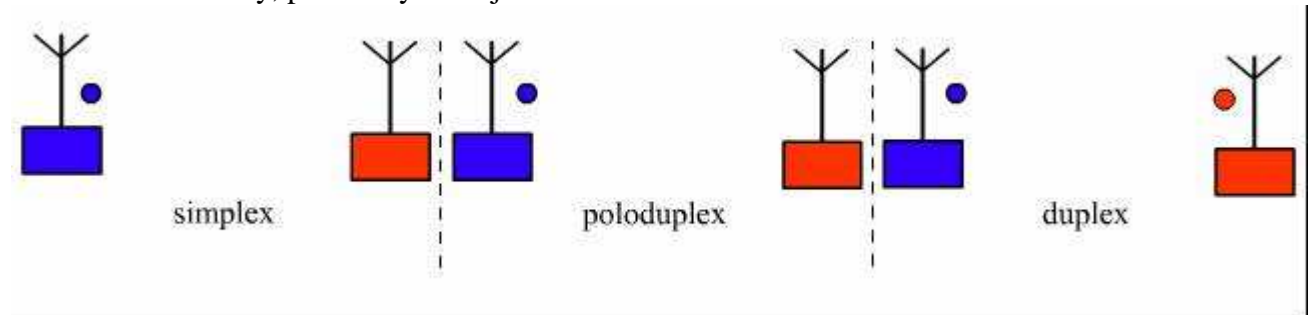
Způsoby přenosu

Pro účastnickou rádiovou komunikaci mezi dvěma body je vždy použita jedna z následujících přenosových metod.

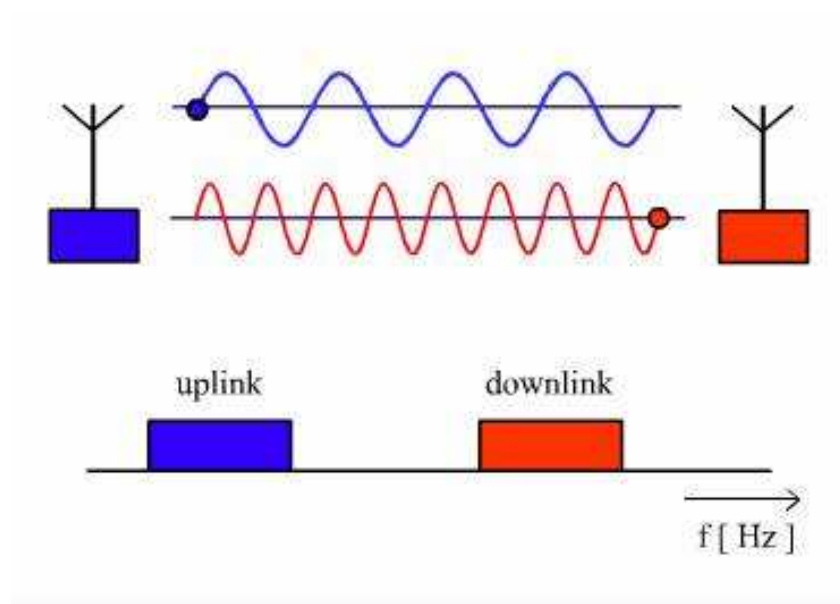
Simplexní přenos - Jedná se o případ, kdy komunikace mezi dvěma body může probíhat pouze jednosměrně a stačí využití jednoho přiděleného kanálu.

Poloduplexní přenos - V tomto případě opět stačí jeden přidělený kanál, ale komunikace může probíhat obousměrně, ne však současně v obou směrech. Jednotlivé směry přenosu je třeba během komunikace přepínat.

Duplexní přenos - Komunikace probíhá současně oběma směry - je tedy nutné použít dva komunikační kanály, pro každý směr jeden.



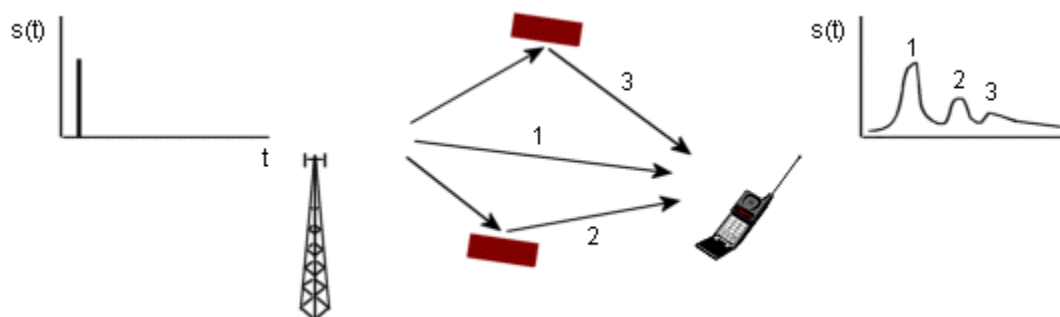
Pro bezdrátovou účastnickou komunikaci se ve většině případů vyžaduje duplexní přenos. Nejčastěji se používá pro každý směr přenosu rozdílného frekvenčního pásma a příslušná metoda je označována **FDD** (Frequency Division Duplex). Tato technika je používána pro analogové systémy nebo digitální systémy s větším dosahem (NMT, GSM).



V některých případech se oba kanály příslušející jednomu okruhu rozlišují na základě časového duplexu, to znamená, že komunikace probíhá na jednom kmitočtu a dopřednému kanálu je přiřazen jeden časový interval, zpětnému pak jiný časový interval. Tento princip je nazýván **TDD** (Time Division Duplex) a je používán především pro systémy s malým dosahem, například pro bezšňůrové telefony (DECT)

Problémy šíření rádiového signálu

V pozemní mobilní komunikaci se velice často mezi mobilní a základnovou stanicí nacházejí nejrůznější překážky, jako terénní nerovnosti, domy a další různé objekty, takže není možno docílit přímé viditelnosti **LOS** (Line Of Sight) mezi těmito dvěma stanicemi. Tento případ je velice častý v městských aglomeracích, některé z uvedených překážek se však mohou vyskytovat i ve venkovských oblastech. Nastane-li tedy taková situace, nepřijímá přijímač pouze vlny vysílané základnovou stanicí, ale i vlny, které přicházejí vlivem ohybu, odrazu a rozptylu na zmíněných překážkách. Dochází zde tedy k mnohacestnému šíření rádiových vln (multipath propagation).



Jestliže se mezi základnovou a mobilní stanicí nacházejí relativně velké stínící překážky (vůči vlnové délce λ), závisí intenzita přijímaného signálu na ohybu a na rozptylu rádiových vln způsobených těmito překážkami. Příslušný průběh přijímaného signálu potom vykazuje mírné zvlnění, přijímaný signál je tedy postižen únikem. Tento únik je však nevýrazný, neboť kolísání signálu od střední úrovně zpravidla nepřesáhne 3 až 5 dB. Vzdálenost mezi maximy a minimy v popisované závislosti je většinou několik stovek až tisíc délek vlny λ a proto se tento efekt označuje jako kolísání signálu ve velkém měřítku nebo **pomalý únik**.

V prostředí s mnohacestným šířením rádiových vln přijímá anténa mobilní stanice mnoho složek vysílaného signálu, vzniklých odrazy od různých okolních objektů, které procházejí různě dlouhými drahami šíření a proto na tuto anténu přicházejí s různým zpožděním; dochází tedy k rozptylu dob zpoždění (delay spread). Všechny složky se v anténě vektorově sčítají, což má v případě pohybujícího se přijímače za následek výrazné kolísání intenzity přijímaného signálu. Takto vzniklý únik signálu bývá velmi hluboký, běžně 20-30 dB. Mezi maximy a minimy je zde vzdálenost odpovídající polovině vlnové délky λ , proto se tento efekt označuje jako kolísání signálu v malém měřítku nebo **rychlý únik**. Rozložení okamžitých amplitud signálu zde sleduje Rayleighovu statistiku, a proto je tento typ úniku nazýván také jako **Rayleighův únik**.

Další jev komplikující situaci při rychlém pohybu mobilní stanice je Dopplerův jev (posun). Tento jev způsobuje při vzájemném pohybu vysílače a přijímače kmitočtový posun přijímaného kmitočtu oproti původně vysílanému. Dopplerův jev způsobuje parazitní kmitočtovou modulaci, která způsobuje problémy při demodulaci signálu.

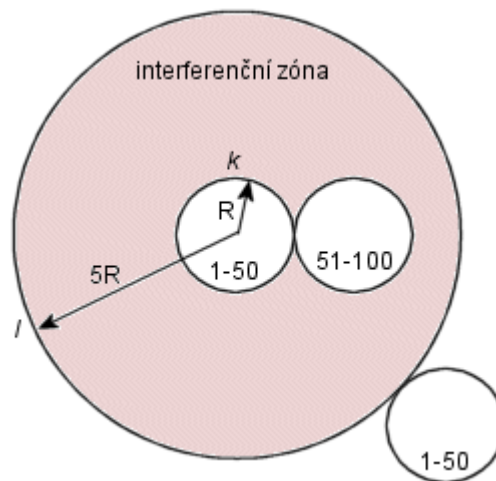
Popisované efekty se objevují nejen při šíření rádiových vln pozemskými rádiovými kanály, ale i v případě komunikace pozemských stanic a stanicích umístěných na kosmických družicích. Ze jsou tyto jevy výrazné především u nestacionárních družic blízko nad obzorem, kdy pozemská stanice přijímá jednak vlnu přímou a jednak vlny odražené od různých překážek.

Princip buňkového systému

První pozemní komunikační systémy měly takzvanou ostrůvkovitou koncepci. Jediná základnová stanice zajišťovala spojení s mobilními stanicemi v celém, obvykle velice rozlehlém území.

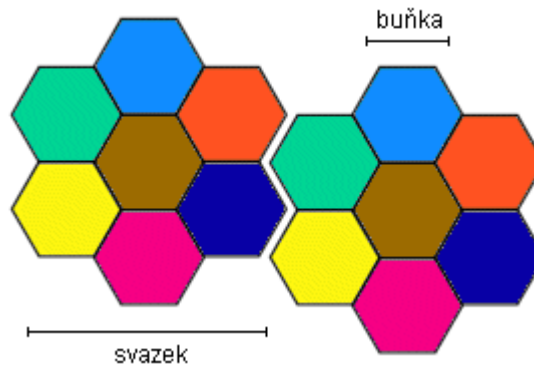
Taková koncepce však měla řadu nevýhod:

- Mobilní účastník takovéto sítě si při přesunu do oblasti sousední základnové stanice musel sám přeladit mobilní stanici na jiná frekvenční pásma.
- Koncepce vyžadovala velké vysílací výkony u vysílačů základnových stanic i mobilních stanic, které jsou potom rozměrné a energeticky náročné.
- Zásadním nedostatkem je špatné využití přiděleného frekvenčního pásma. Aby systém mohl pracovat bez "hluchých zón", musel by mít k dispozici velmi velký počet přidělených kanálů a tím pádem velmi široká frekvenční pásma, což je však při nedostatku frekvenčního spektra problém. Podstata tohoto problému je znázorněna na obrázku.



V oblasti znázorněné kruhem k o poloměru R je umístěna jediná základnová stanice, která obsluhuje celé toto území a disponuje rádiovými kanály číslo 1 až 50. Je-li spolehlivě pokryta oblast kruhu k , signál základnové stanice je jistě poměrně silný i v tzv. interferenční zóně v podobě kruhu l a v celé této oblasti se již kanály 1-50 nesmí vyskytovat a musí být využívány kanály 51-100, 101-150 atd. Celkově tedy bude pro pokrytí oblasti l zapotřebí přibližně 1250 různých kanálů. Tyto kanály se mohou opakovat až vně interferenční zóny, tedy po překročení bezpečnostní vzdálenosti (reuse distance) $5R$.

Revoluční zlom ve vývoji přišel v roce 1946, kdy byl v laboratořích firmy Bell formulován princip tzv. celulárních (buňkových) systémů pro mobilní komunikaci. Základním rysem současných mobilních buňkových radiotelefonních systémů je velmi efektivní hospodaření s frekvenčním spektrem, které je výsledkem mnohonásobného použití stejné přidělené frekvence v obsluhované oblasti. Princip buňkové struktury ukazuje obrázek.



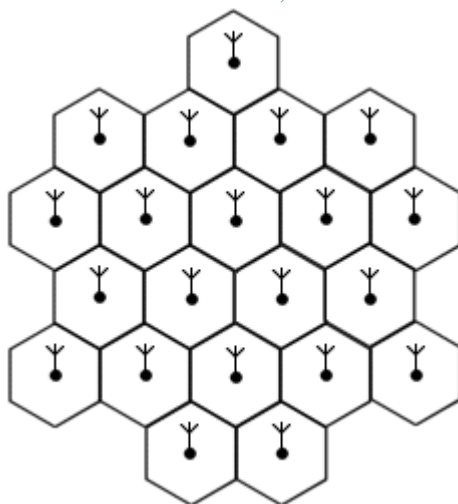
Celá obsluhovaná oblast je zde rozdělena do 14 šestiúhelníkových buněk, které tvoří dva svazky (clusters) po sedmi buňkách. Dalším přidáváním svazků je potom možno pokrýt neomezeně velké území. ***Uvnitř každé buňky je jedna základnová stanice s určitou přidělenou skupinou kanálů a komunikující s mobilními účastníky, kteří se nacházejí pouze v této buňce.*** Zbývajících 6 buněk příslušejících jednomu svazku má přiděleny své skupiny kanálů. Za podmínky, že se oblast všech sedmi buněk přibližně rovná interferenční oblasti, je v každém z obou svazků možno použít stejné kanály.

Pro porovnání se starší koncepcí (viz. výše) předpokládejme, že je plocha svazku zhruba stejná s plochou kruhu o poloměru R . V první buňce jsou použity např. kanály 1-7, ve druhé 8-15 a v sedmé 42-49. Svazek potom obsahuje 49 kanálů, což je prakticky stejný počet jako obsahuje kruh k . Důležité je to, že lze tyto kanály opakovat ihned v sousedním svazku. Vzdálenost buněk používajících stejnou frekvenci je totiž rovna přibližně pětinasobku jejich poloměru a je tudíž splněna podmínka $5R$. Systém tedy potřebuje pro pokrytí libovolně velkého území 50 kanálů, kdežto starší systém by jich potřeboval asi 1250. Toto je jedna z hlavních předností celulárních systémů, mezi které patří:

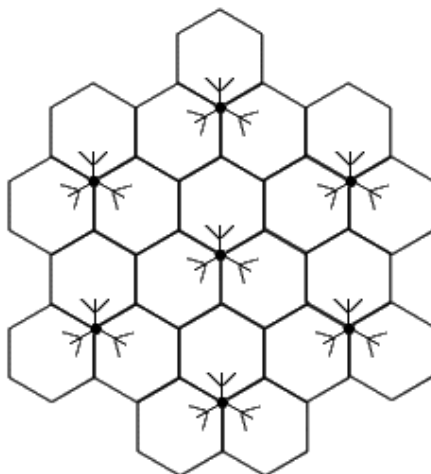
- Již zmíněné efektivní hospodaření s přiděleným rádiovým spektrem.
- Možnost použít handover.
- Podstatně menší vysílací výkon na straně základnové stanice i mobilní stanice.

Tyto výhody však nejsou úplně zdarma. Jestliže ve starším systému obsloužila oblast o poloměru R jediná základnová stanice, je jich v buňkovém systému pro přibližně stejně velký svazek potřeba sedm.

Pro vytvoření sítě s lepšími provozními vlastnostmi (např. nižší vysílací výkony a zvětšení počtu současně obsluhovaných mobilních stanic) je možno použít princip tzv. **sektorizace**. Jeden svazek nyní rozdělíme na 21 menších buněk.



Nezmění se tím počet potřebných kanálů, ale stoupne počet základnových stanic ze 7 na 21. Jejich počet však lze sektorizací redukovat na sedm umístění tří samostatných směrových antén do společných bodů tří sousedních buněk.

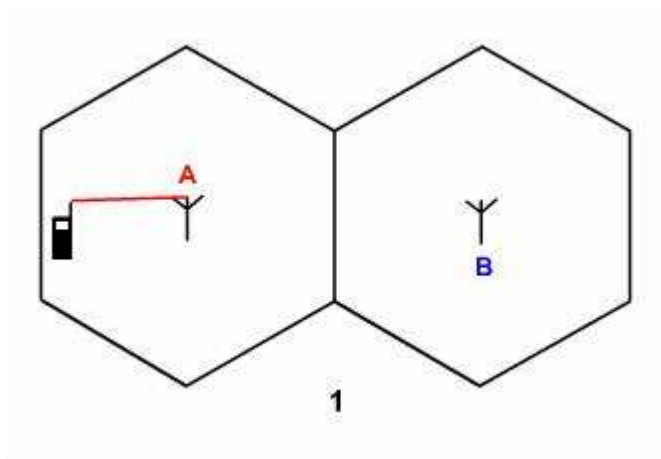


Velké buňky mají poloměr zpravidla větší než 3 km a antény bývají umístěny nad nejvyšším bodem okolní zástavby. Malé buňky mají poloměr menší než 3 km a antény základnových stanic jsou umístěny pod nejvyšším bodem okolní zástavby, avšak výše než je střední výška zástavby. Mikrobuňky o poloměru menším než 300 m mají antény základnových stanic pod úrovní střech a okolních budov; signál se zde šíří v uličních "kaňonech" díky rozptylu a ohybu kolem těchto budov. Uvnitř budov a v místech s vysokou koncentrací osob mohou být použity pikobuňky, které zpravidla mívají dosah desítek metrů.

Handover

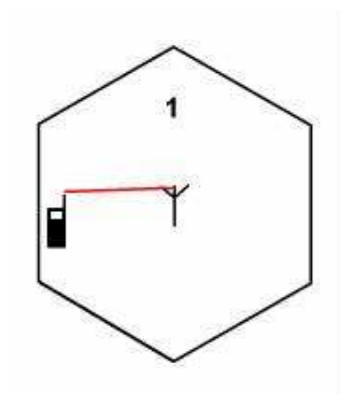
V sousedních buňkách se vždy používají kanály s odlišnými frekvencemi a při přechodu mobilního účastníka přes hranice buněk je tedy nutné přeladit jeho stanici. Tento proces se v moderních systémech uskutečňuje zcela automaticky, bez zásahu obsluhy stanice, a nazývá se handover. Provoz systému vyžaduje, aby byla neustále registrována okamžitá poloha mobilní stanice alespoň na úrovni buněk. Určování polohy stanice může být realizováno například tak, že mobilní stanice neustále udržuje spojení s nejbližšími základnovými stanicemi, které jsou v dosahu. Ty vyhodnocují kvalitu spojení a informují o tom ústřednu. Z těchto informací poté ústředna určí tu základnovou stanicí, jejíž spojení s mobilní stanicí je nejkvalitnější a která je tedy pravděpodobně nejbližší. Dojde-li k přemístění mobilní stanice z jedné buňky do druhé v průběhu hovoru, ústředna jí přidělí nové hovorové kanály. Celý tento proces trvá velice krátce a během hovoru je nepostřehnutelný

Mezibuňkový handover: Automatické přeladování mobilních stanic při přechodech přes hranice buněk se označuje pojmem inter-cell Hannover



V momentě 1 mobilní stanice komunikuje se základnovou stanicí A. V okamžiku 2, kdy se stává spojení se stanicí B kvalitnější, dochází k přeladění a komunikace přechází na stanicí B a nadále již probíhá komunikace s touto základnovou stanicí.

Vnitrobuňkový handover: V moderních sítích se používá i metoda přeladování mobilní stanice v průběhu pohybu v rámci jedné buňky, neboť se mohou objevit kanály, zajišťující kvalitnější spojení než kanály původně přidělené. Tento proces se nazývá intra-cell handover.



Celý tento mechanismus probíhá v jediné buňce a mobilní stanice stále komunikuje s jedinou základnovou stanicí. Do momentu 2 probíhá komunikace na určitých přidělených kanálech a v tomto okamžiku se stanice přeladí na kanály nové, které poté používá.

Popisovaný proces může být řízen stacionárními složkami celulárního systému, bez spoluúčasti mobilní stanice. Mobilní stanice se však může řízení také zúčastnit, případně jej na sebe zcela převzít. Rozlišujeme tedy tři základní typy handoveru:

Handover řízený systémem (Network Controlled HandOver - NCHO): Mobilní stanice pouze vysílá kontrolní signál, který je přijímán základnovými stanicemi v rádiovém dosahu. Příslušný systém, umístěný např. v ústředně, poté na základě porovnání kvality signálu rozhodne, který signál je nejlepší a se kterou základnovou stanicí je pro mobilní stanici nejvýhodnější komunikovat. Výhodou této metody je fakt, že mobilní stanice neprovádí žádné měření, jehož výsledky by bylo nutné zpětně přenášet. Na druhou stranu slabinou jsou vysoké nároky na přenosovou kapacitu tras mezi základnovými stanicemi a radiotelefonní ústřednou, zatížení rozhodovacích subsystémů ústředny a nemožnost mobilní stanice aktivně se zúčastnit rozhodovacího procesu. Tento handover používají zejména analogové celulární systémy, například systém NMT.

Handover řízený za spoluúčasti mobilní stanice (Mobile Assisted HandOver - MAHO): Mobilní stanice nepřetržitě měří intenzitu, případně poměr signál/šum signálů okolních základnových stanic a výsledky předává základnové stanici, s níž právě komunikuje. Měření signálu vysílaného mobilní stanicí může provádět i tato, případně okolní základnové stanice. Rozhodnutí je opět provedeno příslušným systémem v radiotelefonní ústředně, ale jako základní rozhodující informace jsou brány údaje přicházející z mobilní stanice. Výhodou této metody je akceptování lokálních podmínek v nichž se stanice nachází, dále posuzování kvality sestupné i vzestupné rádiové trasy a menší nárok na přenosovou kapacitu fixních složek sítě. Nevýhodou je pak větší intenzita přenosu rádiovým sektorem systému. Tento typ handoveru používá například síť GSM.

Handover řízený mobilní stanicí (Mobile Controlled HandOver - MCHO): Zde se rozhodovací proces o přechodu na nové realizuje pouze na mobilní stanici. Vychází se jak z údajů měřených přímo mobilní stanicí, tak z měření prováděných základnovými stanicemi. Výsledný požadavek na změnu poté mobilní stanice předává přímo nové základnové stanici, do jejíž buňky právě vstoupila. Tento model mění koncepci mobilních stanic ale výrazně šetří rádiový sektor a je z uvedených principů nejrychlejší. Tento handover je aplikován například u bezšňůrových telefonů DECT.

Z hlediska přepínacího procesu dále rozlišujeme následující druhy handovery:

Hard handover "Tvrdý": V tomto případě je nejdříve mobilní stanice odpojena od původního kanálu a teprve poté připojena na kanál nový. Čas přepojení je co možná nejmenší, přesto dojde ke krátkému přerušení spoje, které je však v hovoru těžko postřehnutelné. Tento typ handoveru však může činit problémy při přenosu dat. Handover je většinou řízen sítí (NCHO). Výhodný je v tom, že terminál nemusí být schopen pracovat na více kanálech současně a je tedy jednodušší. Tato technologie je používána například v sítích NMT nebo GSM.

Seamless handover "Bezešvý": Jedná se o handover, při němž se nejdříve vytvoří spojení na novém kanálu a teprve poté je zrušeno spojení na kanálu opouštěném. Mobilní stanice tedy musí určitý čas komunikovat současně na dvou kanálech, což vyžaduje synchronizaci. Řízení většinou přebírá mobilní stanice (MCHO) a tento handover používá například systém DECT.

Soft handover "Měkký": Tento způsob handoveru využívá faktu, že je stanice neustále připojena alespoň ke dvěma dostupným základnovým stanicím. Při pohybu terminálu jsou jednotlivá spojení rušena a další nová vznikají. Tento typ způsobuje větší nároky na kapacitu sítě a je používán například v americkém systému IS-95. Uplatnění najde také v systému třetí generace UMTS.

Metody přidělování rádiových kanálů

U celulárních radiotelefonních systémů se používají dvě hlavní metody přidělování rádiových kanálů mobilním účastníkům.

- **Fixní přidělování rádiových kanálů (Fixed Channel Allocation - FCA):** U této metody je celé rádiové pásmo rozděleno do skupin, jejichž počet je stejný jako počet buněk ve svazku. Vypracován je frekvenční plán, vycházející z konkrétních podmínek. Na základě tohoto plánu jsou pak jednotlivým buňkám natrvalo přiděleny jednotlivé rádiové komunikační kanály. Jasnou nevýhodou tohoto systému FCA je skutečnost, že volné kanály v jedné buňce nelze operativně použít v jiné, momentálně přetížené buňce. Fixní přidělování kanálů je typické pro analogové radiotelefon buňkové systémy, například pro systém NMT.
- **Dynamické přidělování rádiových kanálů (Dynamic Channel Allocation - DCA):** Tato metoda umožňuje použít nevyužití rádiové kanály z jedné buňky pro jinou, v tom okamžiku přetíženou buňku ve svazku. Přitom však nesmí být překročeny přípustné úrovně interferencí a měl by tedy být dodržen princip bezpečné vzdálenosti 5R. V praxi jsou uplatňovány základní dvě varianty systémů s dynamickým přidělováním rádiových kanálů.
- **Systém DCA adaptivní vůči provoznímu zatížení.** Tento systém je založen na principu dodržování minimální vzdálenosti opětovného využití frekvenčního spektra. Volné kanály je možné použít v libovolné buňce svazku, která je právě přetížena.
- **Systém DCA adaptivní vůči provoznímu zatížení a vůči interferencím.** U tohoto systému se již přesně nedbá na dodržování minimální vzdálenosti opětovného využití frekvenčního spektra, nesmí však být překročena určitá přípustná hodnota bitové chybovosti BER. Po splnění této podmínky může být opět volný kanál použit v libovolné buňce.

Systémy s dynamickým přidělováním rádiových kanálů se uplatňují především u digitálních celulárních radiotelefonů, například u systému GSM. Kategorie DCA adaptivní vůči interferencím je vhodná například pro bezšňůrové telefony DECT.

Digitální systémy ve světě

Do systémů druhé generace patří digitální celulární mobilní telefony, které mají v porovnání se systémy první generace mnohé výhody, plynoucí hlavně z použití časového multiplexu TDMA a používaných metod digitálního zpracování signálů. Mezi hlavní výhody bezesporu patří:

- Efektivnější využití přidělených frekvenčních pásem a z toho plynoucí vyšší provozní kapacita sítě
- Vyšší kvalita pojení
- Vysoká úroveň zabezpečení
- Menší rozměry, hmotnost a energetická náročnost mobilních stanic
- Více nabízených služeb, které kromě přenosu hovorových kanálů umožňují přenos textových zpráv (SMS), dat apod.
- Snadná možnost zavedení mezinárodního roamingu v rámci států používajících jednotný systém
- Kompatibilita s fixními sítěmi ISDN i většinou ostatních perspektivních komunikačních systémů

	1. generace	2. generace	3. generace
Celulární systémy	analogové systémy NMT, C-NET, TACS, ...	digitální systémy GSM, D-AMPS, ...	UMTS
Bezšňůrové systémy	analogové systémy CT0, CT1, ...	digitální systémy CT2, DECT, ...	

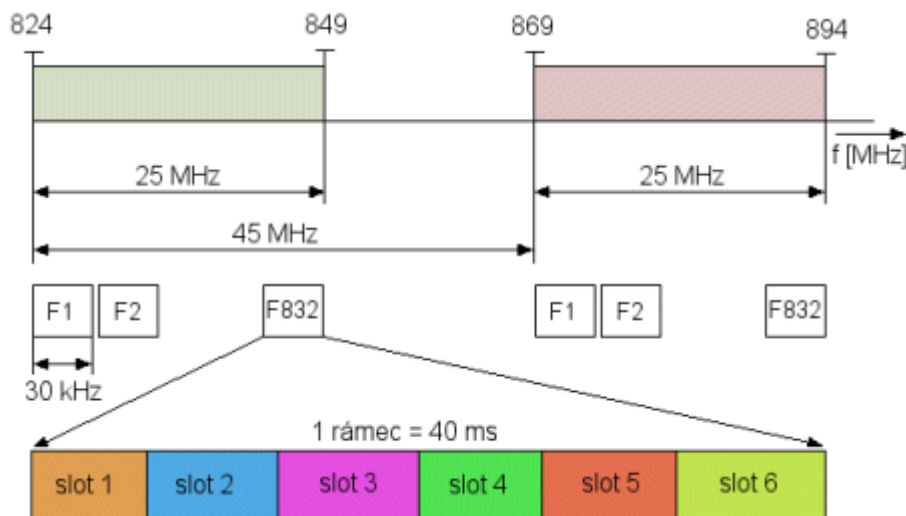
Přehled základních digitálních systémů celulární mobilní komunikace :

- **GSM**

V Evropě (především) se od počátku devadesátých let uplatňuje globální systém pro mobilní komunikaci **GSM**, pracující v okolí frekvence 900 MHz. Kapacita frekvenčního pásma se však ukázala nedostatečnou a proto bylo třeba hledat další kmitočtová pásma pro uspokojení kapacitních požadavků. Byla tak vytvořena varianta systému GSM, pracující v okolí frekvence 1800 MHz, nazývaná **GSM 1800** nebo také **DCS 1800**. Výhodou tohoto systému je kompatibilita se systémem GSM 900 a tedy jednoduchá výroba mobilních stanic pracujících v obou pásmech. Tyto duální stanice jsou dnes běžným standardem. Systém GSM také překročil hranice Evropy, kde byl však použit především v jiném kmitočtovém pásmu. Jedná se o systém **GSM 1900** (DCS 1900 nebo PCS 1900), kterému bylo v USA přiděleno kmitočtové pásmo 1850-1910/1930-1990 MHz. Tento systém se od GSM 900 liší právě použitými frekvencemi a dále výkonovými úrovněmi. Další variantou systému GSM je systém **GSM-R** (Railway), který schválili evropští provozovatelé železnic jako jednotný systém používaný v železniční dopravě. Uvažuje se i o výrobě zařízení pracujícího podle standardu GSM avšak v pásmu 450 MHz. Výhodou tohoto systému by bylo lepší šíření rádiových vln a velice výhodné by bylo použití např. v odlehlých, řídko osídlených oblastech.

- **ADC, IS-54, D-AMPS**

S malým zpožděním za GSM se na americkém kontinentu začal budovat systém **ADC** (American Digital Cellular), nazývaný také **D-AMPS** (Digital-Advanced Mobile Phone System), nebo **IS-54** (Iterim Standard-54). Jedná se o standard vypracovaný asociacemi EIA (Electronic Industries Association) a TIA (Telecommunications Industries Association). Z důvodu kompatibility se starším analogovým systémem AMPS je šířka kanálu 30 kHz a je použito stejné kmitočtové pásmo 824-849/869-894 MHz. K dispozici je 832 rádiových duplexních kanálů. Systém je založen na TDMA/FDMA přístupu a duplexu FDD. Datový tok modulovaný pomocí modulace $\pi/4$ DQPSK má rychlost 48,6 kbit/s. Rámec o periodě 40 ms je rozdělen do 6 časových intervalů (každý je tedy schopen přenést 8,1 kbit/s) po 324 bitech.



Systém používá ekvalizaci pro potlačení mezisymbolové interference, ale v mnoha případech není použití ekvalizátoru nutné. Hlasový signál je komprimován metodou **VSELP** (Vector Sum Excited Linear Predictor), který má výstupní bitovou rychlost po zabezpečení 13 kbit/s. Další 3,2 kbit/s je využito pro řízení, synchronizaci a pod. Pro jeden hovorový kanál je tedy potřeba využít 2 časové intervaly, tj. 16,2 kbit/s. Na jeden rádiový kanál pak lze umístit 3 účastnické kanály (6 při použití kodeku s poloviční rychlostí), do celého přiděleného pásma pak 4992 (6 x 832) účastnických kanálů. Mobilní stanice jsou dvoumódové, tzn. mohou spolupracovat s analogovým systémem D-AMPS i se systémem AMPS.

- **ADC, IS-136, D-AMPS**

Počáteční verze systému IS-54 používala signalizační systém AMPS (10 kbit/s). Později byl vytvořen nový standard signalizace **IS-136** (DCC-Digital Control Channel), který má rychlost 48 kbit/s a umožňuje přenos krátkých zpráv, uzavřené skupiny a taktovaný pagingový kanál pro podporu sleep modu u mobilní stanice z důvodu šetření energie. Z důvodu těchto odlišností se systém nenazývá IS-54 ale IS-136.

- **JDC, PDC**

V roce 1991 byl nasazen v Japonsku systém **JCD** (Japanese Digital Cellular), nazývaný též **PDC** (Personal Digital Cellular). Jedná se o systém pracující v pásmech 810-829/940-956 MHz a 1429-1453/1477-1501 MHz. Systém používá TDMA/FDMA přístup se třemi časovými intervaly na

jeden rádiový kanál o šířce 25 kHz a obousměrná komunikace je zabezpečena kmitočtovým duplexem FDD. Celkový počet rádiových kanálů je tedy 1600, účastnických je 4800. Systém používá modulaci $\pi/4$ DQPSK; pro kódování hlasového signálu je použito algoritmu VSELP a handover je typu MAHO.

- **ADC, IS-95, cdmaOne, CDMA**

K digitálním systémům 2. generace patří také vývojově nejmladší americký standard **IS-95**, nesoucí také názvy **cdmaOne** nebo **CDMA**. Systém používá přístupovou metodu CDMA/FDMA a kmitočtový duplex. Systémy CDMA mají v mobilní komunikaci řadu výhod. Největší z nich je možnost pracovat bez vzájemného rušení v těch frekvenčních pásmech, kde již existují jiné rádiové služby. Přínosem je také imunita těchto systémů vůči interferencím a dalším rušivým efektům, typickým pro pozemské kanály. Z důvodu zpětné kompatibility je opět použito shodné frekvenční schéma 869-894/824-849 MHz. Mobilní terminály pracují v kanálech o šířce 1250 kHz, kterých je 20. Jeden rádiový kanál pojme až 798 účastnických kanálů a celkem je tedy k dispozici 15960 duplexních uživatelských kanálů. Systém pracuje s QPSK a měkkým handoverem. Stejně jako IS-54 je i systém IS-95 kompatibilní se signalizačním systémem AMPS a terminály jsou schopny pracovat v obou módech (AMPS i IS-95)

Digitální systémy ve světě - přehled

	GSM DCS 1800 PCS 1900	D-AMPS	IS-95	PDC
Frekvenční pásmo [MHz]	900 1800 1900	800 1900	800 1900	800/1500
MS -> BTS [MHz]	890-915 1710-1785 1850-1890	824-846 1850-1890	824-849 1850-1890	940-956 1429-1441 1453-1441
BTS -> MS [MHz]	935-960 1805-1880 1930-1970	869-894 1930-1970	869-894 1930-1970	810-826 1477-1489 1501-1513
Duplexní odstup [MHz]	45 95 80	45 80	45 80	130 48
Metoda přístupu	FDMA TDMA 8/16 slotů	FDMA TDMA 3 sloty	CDMA	FDMA TDMA 3/6 slotů
Šířka kanálu	200 kHz	30 kHz	1,25 MHz	25 kHz
Zdrojové kódování	RPE-LTP, 13 kbit/s	VSELP, 7,95 kbit/s	QSELP, 1,2-8 kbit/s	VSELP, 11,2 kbit/s
Vysílací výkon MS	2 W 1 W 2 W	1.2 W	0,2 W	0,8 W

Historie systému GSM

V průběhu 80tých let svět zaznamenal rychlý růst analogových celulárních systémů v Evropě, především pak ve Skandinávii, Velké Británii, Francii a Německu. Každá země měla vyvinutý svůj systém, který však byl neslučitelný s jakýmkoliv jiným systémem celulární komunikace. Tato situace byla neudržitelná nejenom z důvodu nepoužitelnosti zařízení za hranicemi země, které ve sjednocující se Evropě ztrácely na významu, ale také z důvodu velmi omezeného trhu pro jednotlivé typy zařízení, což s sebou přinášelo ekonomické problémy. 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 (světa).

Navrhnutý systém musel splňovat určitá kritéria :

- Perfektní subjektivní kvalita přenášené řeči
- Nízká cena vybavení a služeb
- Podpora mezinárodního roamingu
- Frekvenční hospodárnost
- ISDN slučitelnost
- Efektivitu v budoucnosti

V roce 1989 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.



Komerční provoz první GSM sítě byl zahájen v polovině roku 1991 a již v roce 1993 existovalo 36 GSM sítí v 22 zemích. Ačkoliv byl standardizován v Evropě, GSM není jen evropský standard, ale například i Jižní Afrika, Austrálie a mnoho dalších zemí středního a dálného východu zvolily z hlediska kompatibility tento systém. S jistým zpožděním použili tuto technologii i v USA, kde pod názvem PCS 1900 pracuje na odlišných frekvencích. Systém GSM tak existuje na všech kontinentech a zkratka GSM je interpretována jako "**Global System for Mobile Communication**", tedy "Globální systém pro mobilní komunikaci". Analogové buňkové systémy jako například AMPS v USA nebo TACS ve Velké Británii začaly pomalu upadat a v současné době je systém GSM velice rozšířeným mobilním komunikačním prostředkem. V květnu 2001 dosáhl počet uživatelů GSM 900/1800/1900 na celém světě 500 miliónů. V České republice byl systém GSM spuštěn v roce 1996 společností Eurotel a dále následován společnostmi Radiomobil a Český mobil.

Základní struktura sítě GSM

Úvod

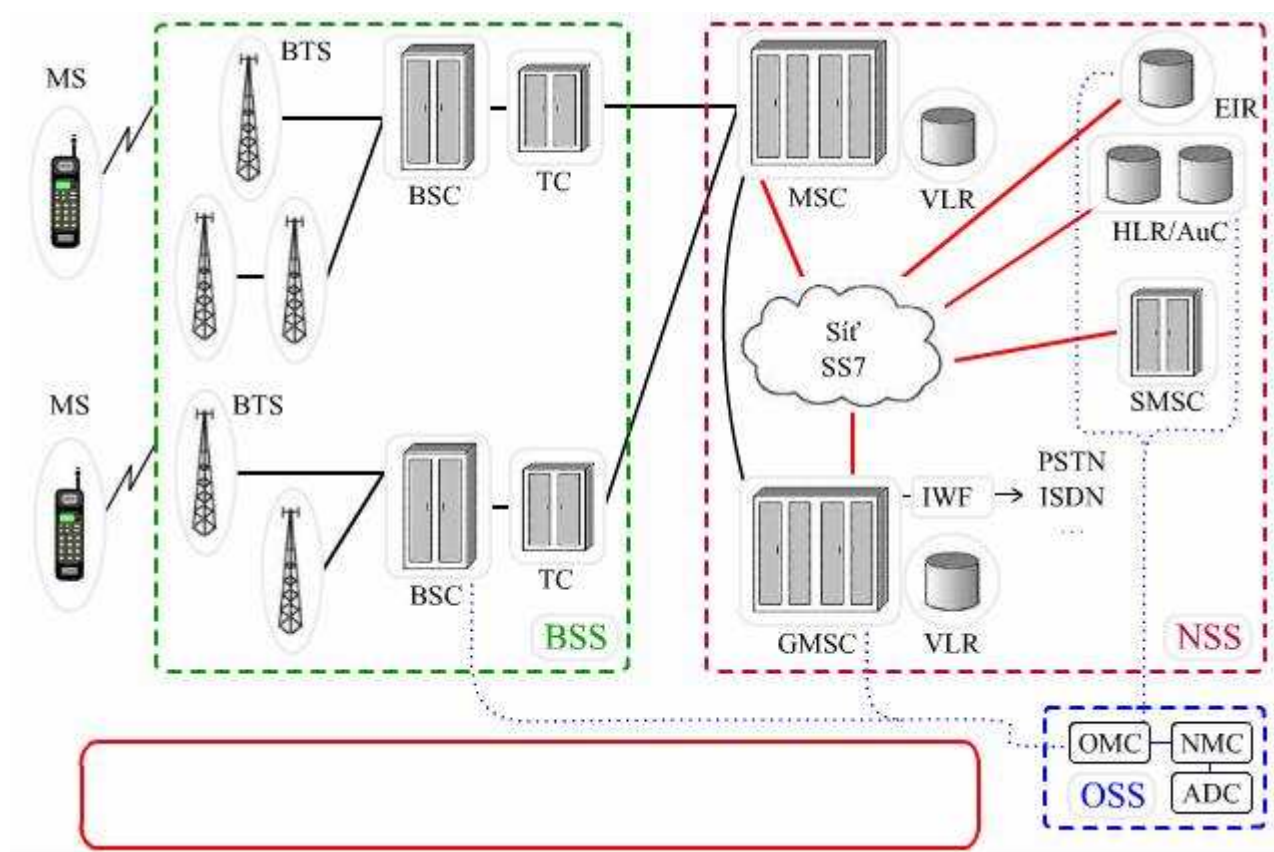
MS

BSS

NSS

OSS

Na následujícím obrázku je ve formě tzv. síťového (blokového) schématu znázorněna celková struktura systému GSM. Zobrazený systém je rozdělen na *tři subsystémy* a jsou zde uvedeny i významy jednotlivých zkratk.



Mobilní uživatelské stanice - MS (Mobile Station)

Mobilní telefon je v podstatě transceiver (vysílač/přijímač) komunikující se základnovou stanicí BTS doplněný řídicími obvody (mikroprocesor) a vstupně/výstupními zařízeními (klávesnice, display, sluchátko, mikrofon, porty). Mobilní stanice je jednoznačně identifikována pomocí čísla IMEI (International Mobile Equipment Identity), uloženého v její paměti. Sám účastník je identifikován pomocí SIM karty (Subscriber Identification Module).

Dle specifikací GSM se mobilní stanicí rozumí jednak vlastní mobilní zařízení (vysílač/přijímač), navíc také předplatitelský identifikační modul SIM (Subscriber Identification Module) - ten umožňuje unikátní identifikaci uživatele v rámci celé sítě GSM.

- **Mobilní zařízení (Mobile Equipment)** obsahuje rádiový přijímač/vysílač, pomocí kterého komunikuje se základnovými stanicemi. Mezi další bloky náleží předmodulační a podetekční obvody, mající na starost zdrojové a kanálové kódování, dále mikroprocesorové obvody a další pomocné bloky. Uživatel přichází do styku s klávesnicí, displejem, sluchátkem a mikrofonem. Pro některé účely, především komunikaci MS s dalším

Nerecenzovaný text určený pouze pro interní použití ve výuce elektroniky ve třetím ročníku Strana 15 (celkem 37)

Vytvořil ing. Jáchym Vacek s použitím uvedené literatury

zařízením je nutné použít další rozhraní. Mobilní zařízení jej jednoznačně identifikováno pomocí čísla IMEI (International Mobile Equipment Identity), uloženého v její paměti.

- **Karta SIM (Subscriber Identification Module)** je nutnou součástí mobilní stanice a ta je bez této karty nepoužitelná (s výjimkou tísňového volání 112). V obvodech této karty jsou uloženy specifické údaje o právoplatném majiteli karty, dále jeho čtyřmístné identifikační číslo PIN (Personal Identification Number) a neměnné identifikační číslo PUK (Personal Unblocking Key). Hlavním smyslem SIM karty je ověření a identifikace uživatele a služeb jemu přístupných. Karta je přenosná a lze ji použít s libovolným mobilním telefonem. SIM dále uchovává následující údaje :
 - IMSI (International Mobile Subscriber Identity)
 - Autentikační klíč (Ki)
 - Šifrovací klíč (Kc)
 - TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity)
 - LAI (Location Area Identity)

Podle maximálního vysílacího výkonu se mobilní stanice dále dělí do pěti výkonnostních skupin.

GSM Class	1	2	3	4	5
max. výkon	20W	8W	5W	2W	0,8W

Uvedené výkony jsou maximální pro danou třídu, v praxi je výkon adaptivně nastavován. Většina dnešních příručních mobilních stanic spadá do kategorie GSM Class 4.

Subsystém základnových stanic - BSS (Base Station Subsystem)

Jedná se o subsystém, se kterým prostřednictvím rádiového rozhraní komunikují jednotlivé mobilní stanice MS. Samozřejmě není možná komunikace jednotlivým mobilních stanic přímo mezi sebou. Mobilní stanice nepatří do BSS ani do žádného z dalších subsystému, ale jsou samostatnou součástí systému GSM.

Subsystém základnových stanic - BSS (Base Station Subsystem)

Základními stavebními prvky subsystému BSS jsou následující zařízení:

- **Základnové stanice BTS (Base Transceiver Station)**
- **Základnová řídicí jednotka BSC (Base Station Controller)**
- **Transkodér TC (TransCoder)**

V systému GSM obvykle obsahuje jeden svazek 9 buněk, používají se však i svazky s menším počtem buněk. Uvnitř každé buňky je umístěna základnová stanice (není-li využito principu sektorizace), která zajišťuje komunikaci s mobilní stanicí. Tato komunikace probíhá přes rádiové rozhraní (Air interface), označované jako rozhraní Um nebo I/F. Několik základnových stanic je společně řízeno jedinou základnovou řídicí jednotkou BSC. Jednotlivé BTS mohou spolu s BSC vytvářet hvězdicovou, kaskádní, stromovou i jinou topologii. Základnové stanice se dělí do osmi výkonových tříd s výkony 2,5; 5; 10; 20; 40; 80; 160; 320 Wattů a komunikace s BSC je často realizována radioreléovými spoji. Stejně jako v případě komunikace BSC - MSC však může být použito optického nebo metalického vedení. Základnové řídicí jednotky BSC výrazně odlehčují

ústředně MSC tím, že vykonávají funkce handoveru (v systému GSM typu MAHO), přidělování kanálů (dynamické) a částečně také plní funkce přepojovací. Mezi BTS a BSC se nachází rozhraní Abis. Na rádiovém rozhraní (Um) má telefonní kanál přenosovou rychlost 13 kbit/s, na rozhraní Abis již 16 kbit/s. Rozhraní mezi základnovou řídicí jednotkou a ústřednou MSC se nazývá rozhraní A. Mobilní ústředna však z důvodu kompatibility s externími sítěmi používá telefonní kanály s rychlostmi 64 kbit/s. Proto je nutností zařadit mezi BSC a MSC transkódovací jednotku TC (TransCoder), která má na starost přizpůsobení rychlostí. Tato jednotka může být umístěna jednak na straně BSC nebo na straně MSC, což je z ekonomických důvodů výhodnější.

Síťový spojovací subsystém - NSS (Network Switching subsystem)

Jde vlastně o systém mobilních resp. radiotelefonních ústředen. Na rozdíl od klasických telefonních ústředen však celý tento systém vykonává kromě obvyklých přepojovacích funkcí ještě mnoho dalších činností, vyplývajících z mobility účastníků (určování polohy, handover, přidělování kanálů apod.).

Základními stavebními prvky subsystému NSS jsou následující zařízení:

- **Mobilní radiotelefonní ústředna MSC (Mobile Switching Centre)**
- **Domovský lokační registr HLR (Home Location Register)**
- **Návštěvní lokační registr VLR (Visitor Location Register)**
- **Centrum autentičnosti AuC (Authentication Centre)**
- **Identifikační registr mobilních stanic EIR (Equipment Identity Register)**
- **Jednotkou spolupráce s externími sítěmi IWF (Inter-Working Functionality)**
- **SMS Centrum**

Síťový spojovací subsystém plní v systému GSM především spojovací funkce, obdobně jako je uskutečňuje klasická telefonní ústředna. Tuto funkci plní v subsystému NSS mobilní radiotelefonní ústředna MSC. Jde zde o běžný typ telefonní ústředny, která je však doplněna o další funkce plynoucí z mobility přepojovaných účastnických stanic. Tato ústředna je nadřazena nad systémem řadičů BSC a jedna nebo více z nich plní funkci tzv. Gateway MSC a umožňuje propojení mobilní sítě GSM s externími telekomunikačními sítěmi, fixními nebo mobilními. Za tímto účelem je potřeba ústřednu vybavit jednotkou spolupráce s externími sítěmi IWF (Inter-Working Functionality)

Subsystém NSS dále realizuje celou řadu specifických úloh, spojených s mobilitou účastníků. Součástí každé sítě GSM je domovský lokační registr HLR, což je v podstatě hlavní databáze, ve které jsou uložena veškerá důležitá data o uživateli sítě. Obsahuje důležitá čísla IMSI (International Mobile Subscriber Identity), MSISDN (Mobile Subscriber ISDN Number), zpřístupněné služby a dále například údaje týkající se polohy uživatele. V síti jednoho operátora je vždy minimálně jeden HLR, může jich být i více. Součástí registru HLR je i centrum autentičnosti AuC (Authentication Centre), což je chráněná databáze, obsahující klíče pro ověřování totožnosti účastníků. Toto centrum má dále na starost šifrovací klíč, podle kterého se šifruje každý účastnický signál přenášený rádiovým rozhraním. Tento klíč je unikátní pro každého účastníka a je proměnný v čase. Na registr je dále napojen identifikační registr mobilních stanic EIR. V této databázi jsou uložena čísla IMEI (International Mobile Equipment Identity) mobilních stanic, které jsou autorizovány k použití v dané síti, dále čísla ukradených MS a je zde i seznam stanic, které jsou označeny jako porouchané, případně nesplňující určitá požadovaná specifika. Velmi důležitou roli hraje také návštěvní lokační registr VLR, který přechodně uchovává a obnovuje data o

uživatelích, v dané chvíli se nacházejících v oblasti příslušné MSC. Obsahuje podobné informace jako HLR, ale pouze dočasně, tzn. že jakmile účastník opustí oblast, data jsou vymazána.

K přenosu signalizace mezi jednotlivými zařízeními je použita signalizační síť SS7 a jsou definovány následující rozhraní:

- **B** mezi MSC a VLR
- **C** mezi MSC a HLR
- **D** mezi registry VLR a HLR
- **E** mezi dvěma ústřednami MSC
- **F** mezi MSC a EIR
- **G** mezi HLR a AuC

Operační a podpůrný subsystém - OSS (Operational and Support Subsystem)

Cílem tohoto subsystému je zajišťovat řádnou činnost a údržbu celé sítě GSM. Je zde prováděn monitoring, diagnostika a opravy poruch systému a mnoho dalších úkonů. Další funkcí tohoto bloku je také administrativní podpora.

Systém GSM dále spolupracuje s externími složkami.

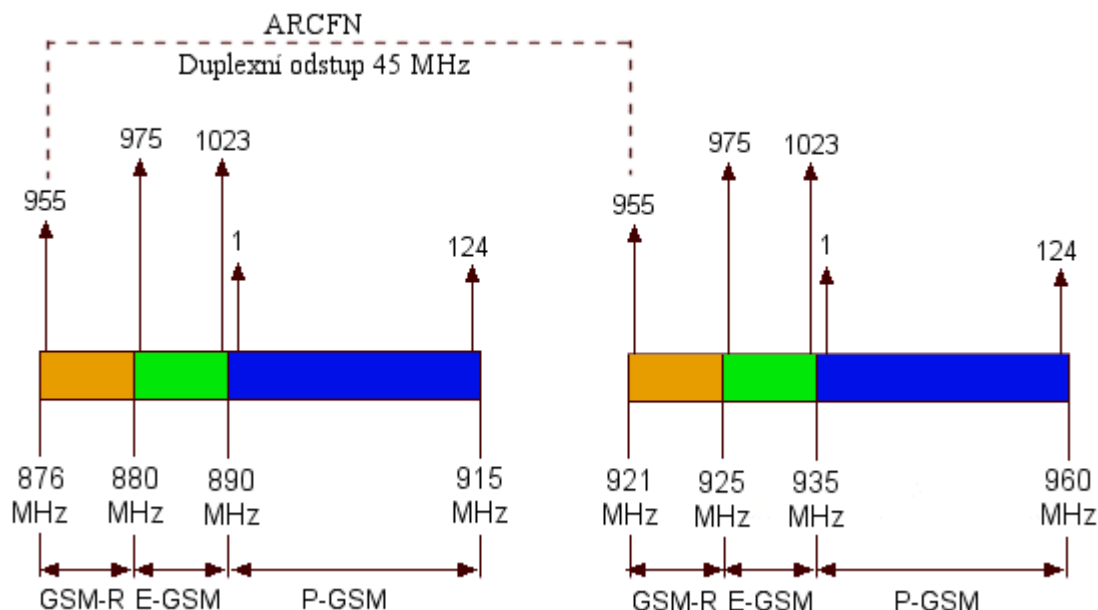
Uživatelé systému, účastníci (subscribers): Ti přicházejí do styku se systémem pouze prostřednictvím svých mobilních stanic MS.

Operátoři: Budují a provozují systém GSM. Pod dohledem regulačních orgánů se starají o stránku technickou, administrativní i finanční.

Externí telekomunikační sítě: K těmto sítím náleží především veřejná komutovaná telefonní síť PSTN (Public Switching Telecommunication Network) a digitální sítě integrovaných služeb ISDN (Integrated Services digital Network), dále například síť PSPDN (Packet Switched Public Data Network), PLMN (Public Land Mobile Network) nebo družicové telekomunikační systémy.

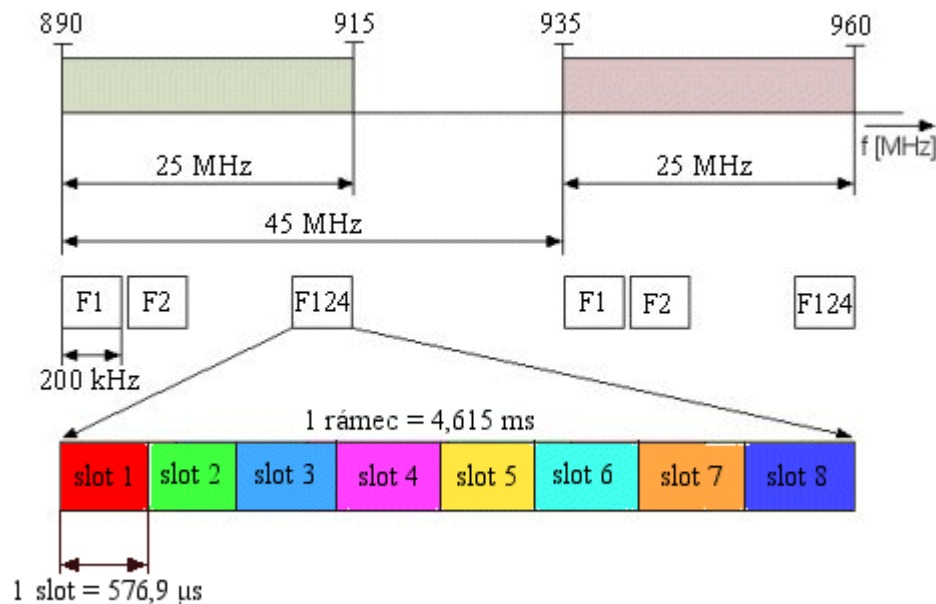
Rádiové rozhraní systému GSM

Systém GSM má vyhrazena dvě rádiová pásma o šířce 2x25 MHz. Pro vzestupnou trasu (vysílají mobilní stanice) je to 890-915 MHz a pro trasu sestupnou (vysílají základnové stanice) je to 935-960 MHz. Systém poskytuje plně duplexní provoz ve formě frekvenčního duplexu FDD 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)**, 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 systému **PCS 1900 (DCS 1900, GSM 1900)** přiděleno pásmo 1850-1910/1930-1990, což znamená že šířka pásma 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).



Na každém rádiovém kanálu je metodou TDMA vytvořeno 8 časových slotů, přičemž každý interval představuje 1 uživatelský kanál. Celkem je tedy u standardního systému GSM 900 k dispozici $8 \times 124 = 992$ duplexních kanálů (3000 u varianty GSM 1800). To ovšem platí při

zdrojovém kódování "plnou rychlostí", tzv. full rate. Zavedením dokonalejšího a účinnějšího zdrojového kódování half rate je potom možno docílit přenosu 16 hovorových kanálů na jedné nosné vlně. Uvedený způsob přenosu s kombinovaným frekvenčním a časovým multiplexem se pak označuje zkratkou **FDMA/TDMA**.



Každý digitalizovaný hovorový kanál má po zakódování v kodéru zdroje přenosovou rychlost 13 kbit/s. Ta se dále po přidání ochranných bitů, prováděném při kanálovém kódování, zvýší na 22,8 kbit/s. Sdružením takových osmi kanálů a přidáním dalších pomocných a signalizačních bitů dojdeme k celkové přenosové rychlosti signálu připadajícího na jednu frekvenci o hodnotě 270,883 kbit/s. Odpovídající perioda jednoho bitu je potom 3,692 μs a efektivní přenosová rychlost na jeden kanál 33,854 kbit/s. Jako optimální modulační metoda byla vybrána pro systém GSM gaussovská modulace MSK, tj. **GMSK** s normovanou šířkou pásma předmodulační gaussovské dolní propusti $B \times T = 0,3$.

Odolnost proti selektivnímu úniku je zajištěna tzv. ekvalizací. Při ekvalizaci je do přenosového řetězce na straně přijímače zařazen filtr, který kompenzuje vlastnosti přenosového kanálu na přijímací straně. Proto je v každém slotu vysílána tréninková posloupnost (známá posloupnost bitů) a v přijímači se deformovaný signál porovná se správným signálem a podle výsledku se nastaví parametry ekvalizačního filtru. Ekvalizace je málo účinná v prostředích, kde vznikají dlouhé výpadky signálu a proto základnová stanice v každém časovém slotu mění kmitočet komunikace (mobilní stanice se jí přizpůsobují). Použitá ekvalizace spolu se strukturou rámců umožňuje používat mobilní stanice až do rychlosti 250 km/h, což je i maximální rychlost pro úspěšný handover. Mobilní stanice neustále sleduje kvalitu rádiových kanálů nejen z hlediska intenzity signálu ale také z hlediska bitové chybovosti BER. Měří se až 6 sousedních základnových stanic a na základě těchto údajů BSC nebo MSC rozhoduje o handoveru.

Zpracování signálu v systému GSM

Úvod

Zdrojové a kanálové kódování

Prokládání a formátování

Modulace/Demodulace

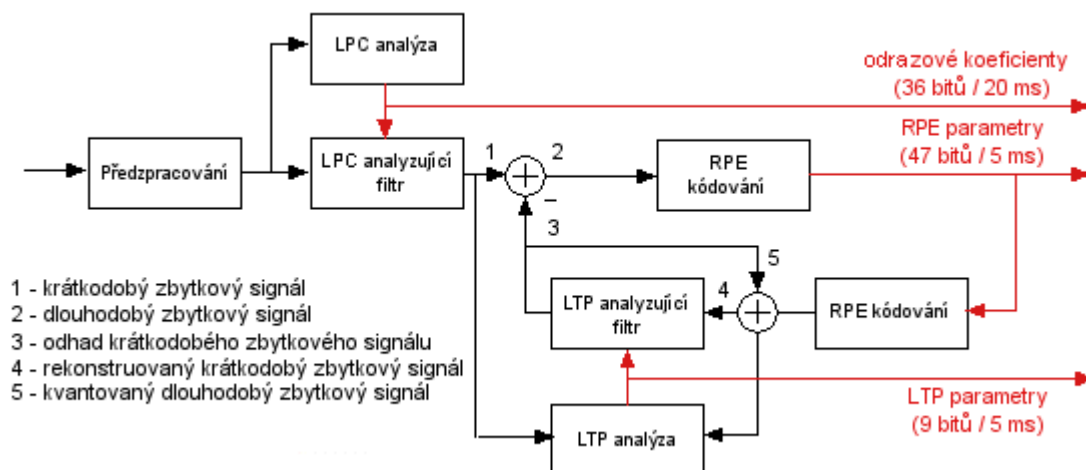
Úvod

Na následujícím obrázku jsou schematicky znázorněny funkce uskutečňující se ve vysílači a v přijímači mobilní stanice. Princip zde použitý je v podstatě shodný s principem použitým v jakýmkoliv jiném digitálním rádiovém komunikačním systému.

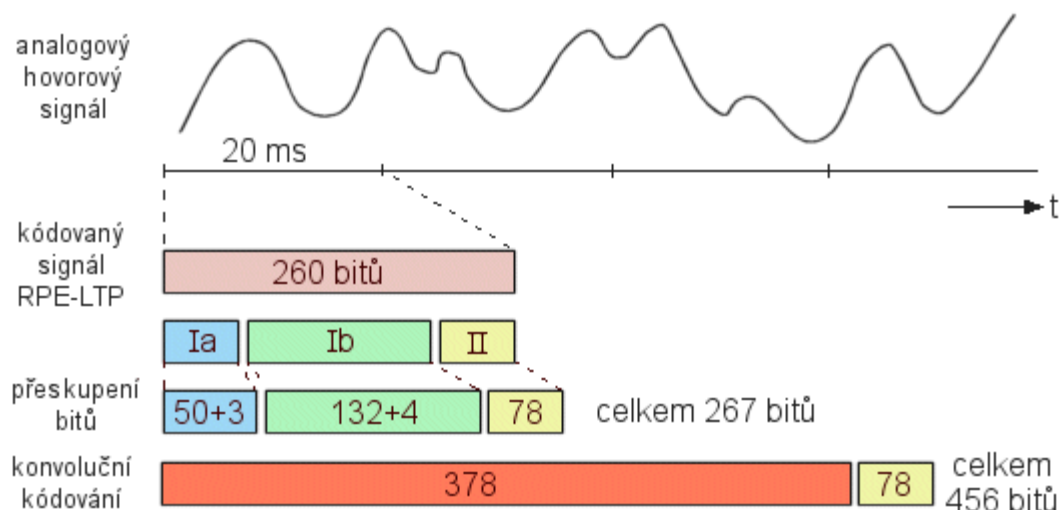
Na vstup vysílací části mobilní stanice přichází z mikrofonu analogový elektroakustický (hovorový) signál. Ten je nejprve v kodéru zdroje signálu digitalizován a zbavován redundance, čímž se výrazně snižuje jeho bitová rychlost. V následujícím kodéru je zvětšována jeho imunita vůči rušivým vlivům, působícím v pozemském rádiovém kanálu. Zakódovaný signál je poté podroben prokládání (interleaving) a dále se uskutečňuje formátování burstů. Následuje proces šifrování a takto upraveným signálem se poté v modulátoru moduluje nosná vlna. Modulovaný signál je po frekvenční transpozici a výkonovém zesílení vysílán. Na přijímací straně probíhá tentýž proces v obráceném pořadí, navíc je do řetězce zapojen proces ekvalizace.

Zdrojové a kanálové kódování

V systému GM se používá moderní parametrická metoda zdrojového kódování, označovaná zkratkou **RPE-LTP** (Regular Pulse Excitation - Long Time Prediction), umožňující redukovat rychlost nezakódovaného hovorového signálu 64 kbit/s na 13 kbit/s. Pro buzení filtru na přijímací straně je přenášén zakódovaný zbytkový rozdílový signál mezi originálním hovorovým signálem a signálem syntetickým. Dlouhodobá predikce spočívá ve využití korelací mezi sousedními periodami základního tónu hovorového signálu k predikci hodnoty signálu v následující periodě. Na následujícím obrázku je schéma kodeku RPE-LTP.



Analogový elektroakustický signál je v kodéru vysílače členěn do časových segmentů o délce 20 ms. Procesem kódování jsou potom jednotlivé segmenty převedeny na digitální hovorové rámce po 260 bitech, čemuž odpovídá přenosová rychlost $260/0,02 = 13$ kbit/s. Každý rámec obsahuje 188 bitů tzv. excitačního signálu, z něhož se v dekodéru přijímač rekonstruuje požadovaný výstupní signál. Dále je zde $2 \times 36 = 72$ bitů, reprezentujících koeficienty digitálních filtrů. Tyto bity jsou dále přeskupeny a uspořádány do skupin vhodných pro následující ochranné kanálové kódování. Při tomto procesu se přihlíží k významu jednotlivých bitů pro zajištění dostatečné kvality přenosu hovorových signálů.

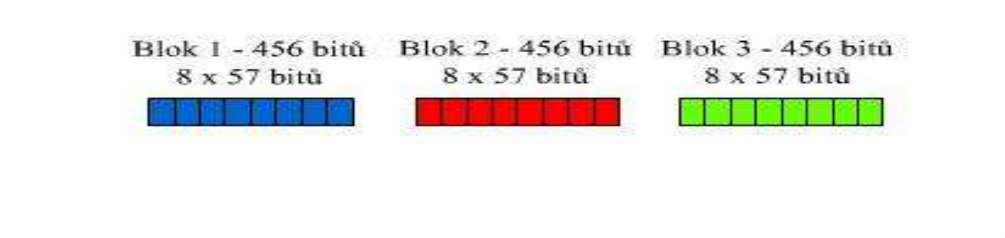


Z původních 260 bitů se použije nejprve prvních (co se důležitosti týče) 50 bitů typu I_a a ty jsou zabezpečeny kódem CRC (jsou přidány 3 kontrolní bity). Následujících 132 bitů typu I_b je doplněno o 4 nulové bity a vytvoří se tak blok bitů typu I o 189 bitech. Tento blok je poté podroben konvolučnímu kódování (rychlost $1/2$, omezovací délka $K=5$), čímž získáme 378 bitů, které jsou dále sloučeny se zbývajících 78 nejméně důležitými bity typu II, které se protichybově nekódují. Výsledný blok má pak délku 456 bitů a odpovídá časovému segmentu 20 ms. Ochranným kódováním se tak zvyšuje přenosová rychlost zakódovaného signálu z původních 13 kbit/s na $456/0,02=22,8$ kbit/s.

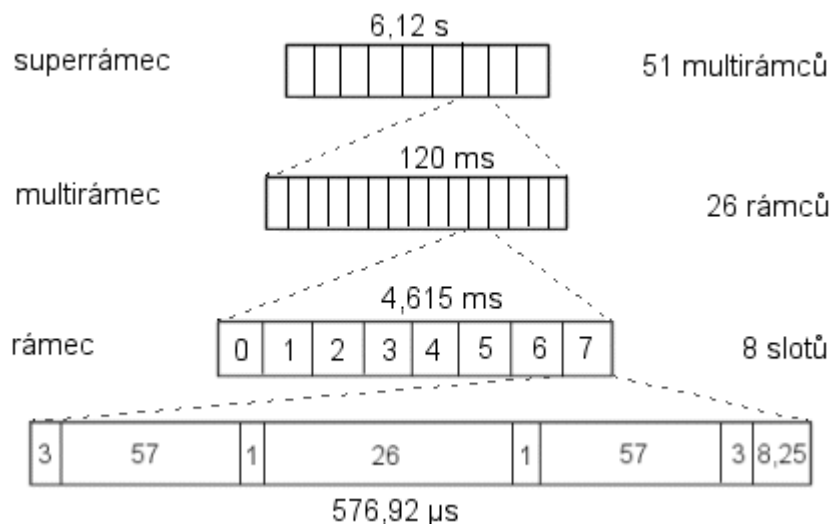
- V doporučeních je také popsána varianta kodeku half-rate, jehož výstupní bitová rychlost je poloviční, tedy 6,5 kbit/s a umožňuje přenos dvojnásobného počtu hovorů. Dále je k dispozici kodekEFR (Enhanced Full Rate), což je kodek s plnou rychlostí avšak výrazně lepšími parametry (kvalita hlasu).
- K ušetření až 90 % energie je u systému SM použito tzv. nespojitého (diskontinuálního) přenosu). Princip spočívá ve faktu, že při běžné konverzaci mluvčí hovoří pouze přibližně 40 % času a během doby kdy nemluví není potřeba přenášet signál. K tomuto jsou mobilní stanice vybaveny obvodem detekce hlasové aktivity (Voice Activity Detection). Protože je systém GSM digitální, bylo by v době ticha na přijímací straně opravdu nepřírozené ticho a telefon by se jevil jako vypnutý či rozbitý. Z tohoto důvodu je v těchto časových okamžicích generován šum.

Prokládání a formátování burstů

Pro dosažení co nejvyšší odolnosti systému GSM vůči rušivému působení shluků chyb je kanálové konvoluční kódování doplněno ještě tzv. diagonálním prokládáním (interleaving). Každý bitový blok o délce 456 bitů vytvořený při předchozím kanálovém kódování, je rozdělen na 8 skupin po 57 bitech. Ty jsou poté metodou diagonálního prokládání proloženy s posledními čtyřmi skupinami z předchozího bloku a prvními čtyřmi skupinami z bloku následujícího. V takto upraveném signálu již dvě sousední skupiny 57 bitů nenáleží jedinému, ale dvěma různým blokům.



Dvě sousední bitové skupiny délky 2×57 bitů se označují termínem burst. Po doplnění tréninkové sekvence, využívané pro účely ekvalizace, a několika dalších pomocných bitů mají bursty dobu trvání 0,577 ms, což je doba trvání jednoho časového intervalu. Takto upravený burst se nazývá normální burst a je základní jednotkou přenosu v systému GSM. Prokládání má velký význam v tom, že je při přenosu změněno pořadí bitových skupin a dojde-li tedy v průběhu přenosu k typickému shluku chyb, budou postižené bity náležet do různých bitových skupin. Po inverzní operaci v přijímači se tak získá signál, u něhož chybně přenesené bity nesousedí a shluk chyb je tak převeden na rozptýlené osamocené chyby, které nejsou již tolik závažné a je možno je korigovat konvolučním dekodérem.



Kompletní normální burst je situován do časového intervalu o délce 0,577 ms. Obsahuje celkem 2 skupiny po 57 bitech, nesoucí vlastní informaci a dále tréninkovou ekvalizační sekvenci o 26 bitech. Typ ekvalizéru není specifikací GSM pevně stanoven - jeho provedení záleží na výrobci mobilní stanice. Zbytek burstu je tvořen 6 okrajovými bity, dva kontrolní bity a 8,25 bitů ochranných. Takto vytvořený burst má délku 156,25 bitů a dobu trvání 0,577 ms. Spojením 8 burstů se vytváří časový rámeček TDMA o době trvání 4,615 ms. Dalším spojením 26 časových rámečků TDMA vzniká jeden multirámec, spojením 51 multirámeců vznikne superrámec a nejvýše v této hierarchii stojí hyperrámec.

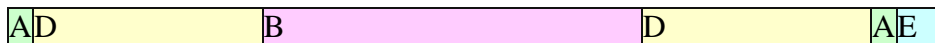
Kromě normálních burstů se v systému GSM používají ještě další typy burstů, všechny jsou popsány dále:

- **Normální burst:** Určen pro přenos hlasu, dat a většiny signalizace.



A (3 bity) - okrajové bity, **B** (26 bitů) - tréninková sekvence, **C** (1 bit) - řídicí bity, **D** (57 bitů) - data, **E** (8,25 bitu) - ochranná doba

- **Synchronizační burst:** Užívá se pro synchronizaci mobilní stanice, má rozšířenou tréninkovou sekvenci a nemá řídicí bity.



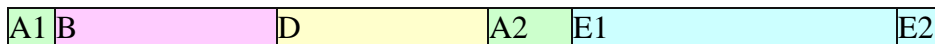
A (3 bity) - okrajové bity, **B** (64 bitů) - tréninková sekvence, **D** (39 bitů) - data, **E** (8,25 bitu) - ochranná doba

- **Burst pro kmitočtovou korekci:** Užívá se pro kmitočtovou synchronizaci mobilní stanice. Vysílají se samé nuly takže vysílaný signál má konstantní kmitočet.



A (3 bity) - okrajové bity, **E** (8,25 bitu) - ochranná doba

- **Přístupový burst:** Užívá se pro náhodný přístup (žádost mobilní stanice o spojení). Protože ještě není znám vzájemný časový posun mobilní a základnové stanice, má delší ochrannou dobu.

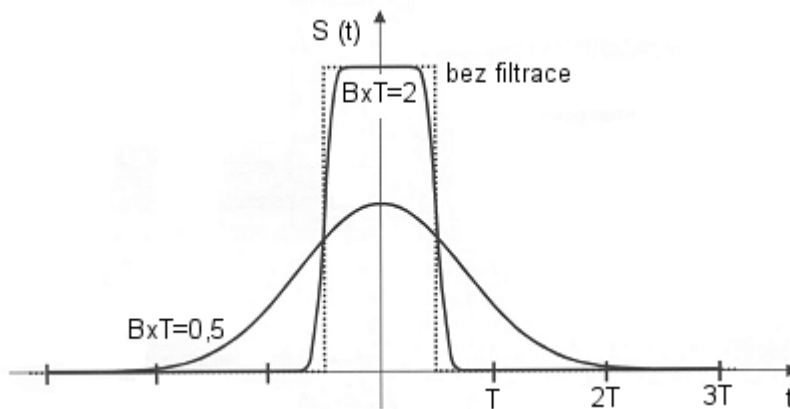


A1 (8 bitů), **A2** (3 bity) - okrajové bity, **B** (41 bitů) - tréninková sekvence, **D** (36 bitů) - data, **E1** (60 bitů) - přídatná ochranná doba, **A2** (8,25 bitu) - ochranná doba

Modulace a demodulace

Zakódovaný digitální modulační signál se přivádí do modulátoru vysílače, kde se jím moduluje nosná vlna. Pro radiotelefonní systém GSM byla jako nejvhodnější modulační metoda vybrána gaussovská modulace s minimálním zdvihem, značená zkratkou **GMSK** (Gaussian Minimum Shift Keying). Jedná se o upravenou variantu modulace MSK. Signál modulovaný metodou MSK zaujímá relativně malé kmitočtové pásmo, zůstává však nepříjemné vyzařování do sousedních pásem, které lze odstranit filtrací. Provádí se tedy předfiltrace datového signálu pomocí gaussovské dolní propusti, odtud pochází název této modulace. Protože časový průběh filtrovaného signálu neobsahuje skokové změny, nemění se skokově ani vysílaný kmitočet. U této modulace je důležitý modulační index ($B \times T$), což je součin šířky pásma gaussovské propusti a doby trvání bitu. Pro

malé hodnoty modulačního indexu klesají postranní laloky ale roste mezisymbolová interference, pro velké hodnoty je tomu naopak.



U systému GSM je použita GMSK s filtrací modulačního signálu gaussovskou dolní propustí s relativní šířkou pásma $B \times T = 0,3$.

Frekvenční skoky nosné vlny

Dvě sousední nosné vlny mají v systému GSM odstup 200 kHz, přičemž každá z nich přenáší 8 nezávislých účastnických kanálů sdružených metodou TDMA. Jeden kanál však nevyužívá v průběhu hovoru jednu a tutéž frekvenci, ale v určitých časových intervalech "přeskakuje" mezi více nosnými frekvencemi. Systém GSM tedy používá pomalé frekvenční skoky **SFH** (Slow Frequency Hopping). Pomalé frekvenční skoky tak přinášejí dvě hlavní výhody.

- Frekvenční diverzita: Pomáhá redukovat ztráty rádiového spojení v oblastech s rychlým Rayleighovým únikem.
- Interferenční diverzita: Zvyšuje účinnost metody opětovného využití frekvencí rádiových kanálů.

Časový předstih ve vysílání

Pro správné fungování multiplexu TDMA je nutné, aby jednotlivé bursty používající sousední časové intervaly dospěly k základnové stanici ve správném čase a nedocházelo tak k překrývání, které vede k nárůstu chybovosti. Závažnost tohoto problému narůstá v okamžiku, kdy je mobilní stanice vzdálena od základnové stanice natolik, že nelze zanedbat dobu šíření rádiových vln. V klidovém stavu je mobilní stanice na příjmu, sleduje návěstní kanál (příchozí hovory) a její časování je oproti časování základnové stanice posunuto. V případě komunikace (odchází nebo příchozí hovor) požádá pomocí přístupového burstu o přidělení řídicího kanálu. Přístupový burst má prodlouženou ochrannou dobu (252 ms) a umožňuje komunikaci na 37,8 km. Základnová stanice změří zpoždění příchozího signálu a spočítá parametr **TA** (Timing Advance, "předstih"), který pošle mobilní stanici. Mobilní stanice tento parametr používá tak, že signál vysílá v předstihu, daném právě tímto parametrem, který může nabývat hodnot 0 bitů (mobilní stanice velmi blízko u základnové stanice) až 63 bitů. Mobilní stanice tedy nevysílá přesně po uplynutí 3 časových intervalů od příjmu ($3 \times 165,25$ bitů), ale po době kratší ($3 \times 165,25 - TA$ bitů). Z tohoto plyne i dosah systému GSM 35 km. Tohoto parametru lze využít i pro lokalizaci mobilní stanice, kdy je pomocí TA určena přibližná vzdálenost mobilní stanice od základnové a v případě porovnání výsledků od více základnových stanic lze dojít k poměrně kvalitnímu určení polohy mobilní stanice.

Zabezpečení systému GSM proti zneužití

Úvod

Ověření totožnosti

Šifrování

Úvod

V systému GSM je třeba, stejně jako v jiných telefonních sítích zabránit nejen odposlechu, ale také zneužití ztraceného telefonu, volání na cizí účet a podobně. Bezpečnost v systému GSM je obecně rozdělena do dvou hlavních kategorií. První z nich je ověření totožnosti účastníka, mobilní stanice a SIM karty, druhou kategorií je samotný proces šifrování přenášených dat.

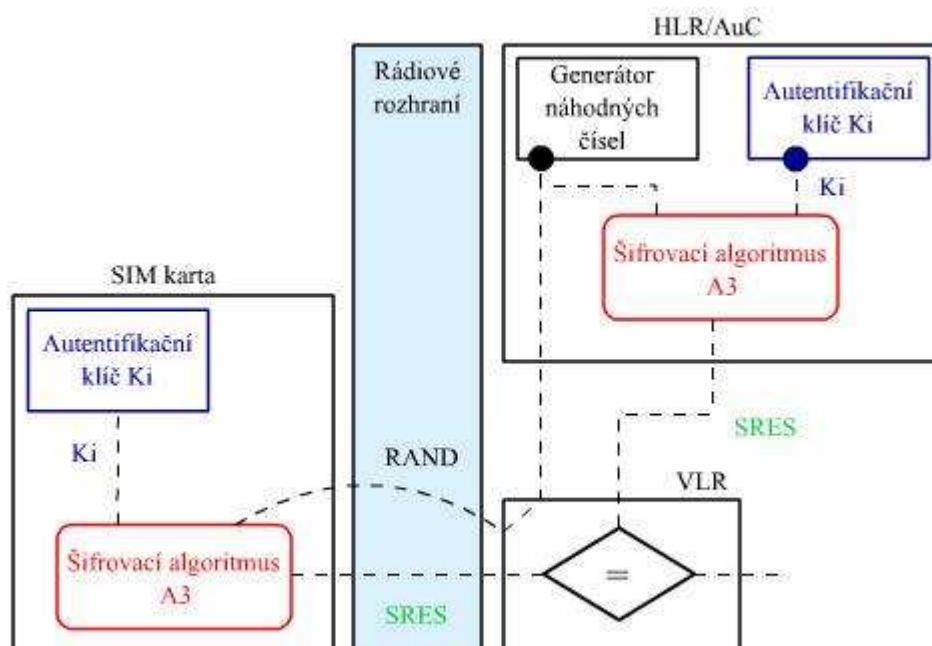
Ověření totožnosti uživatele SIM karty probíhá pomocí zadávání číselných kódů PIN (PIN2) a PUK. Ověření totožnosti mobilní stanice může probíhat (záleží na operátorovi) pomocí IMEI (International Mobile Equipment Identity), což je číslo uložené v mobilní stanici a dále v registru EIR. Do registru VLR je zasláno toto číslo, které je pak ověřeno a zařazeno do jednoho ze seznamů:

- White list ("bílý seznam") - stanice, jímž je přístup povolen
- Black list ("černý seznam") - kradené mobilní stanice
- Grey list ("šedý seznam") - porouchané stanice, nebo stanice nepodporující určité specifikace

Jediné slabé místo při přenosu jakýchkoli dat systémem GSM se nachází v jeho rádiové části. Data přenášená mezi mobilní stanicí a základnovou stanicí na jedné straně umožňují téměř neomezenou volnost uživatele mobilního telefonu, na straně druhé však znamenají potenciální nebezpečí odposlechu nebo například telefonování na účet majitele. Systém GSM proto používá řadu mechanismů, jak tomuto předejít. Jedná se o použité protokoly a formáty dat, digitální modulaci GMSK, neustálé přeladování stanice na různé frekvence, kanálové kódování a výše popsané ověření totožnosti účastníka a mobilní stanice. Další důležité procesy ([ověření totožnosti SIM karty](#) a samotné [šifrování dat](#)) jsou popsány v samostatných kapitolách

Proces ověření totožnosti SIM karty

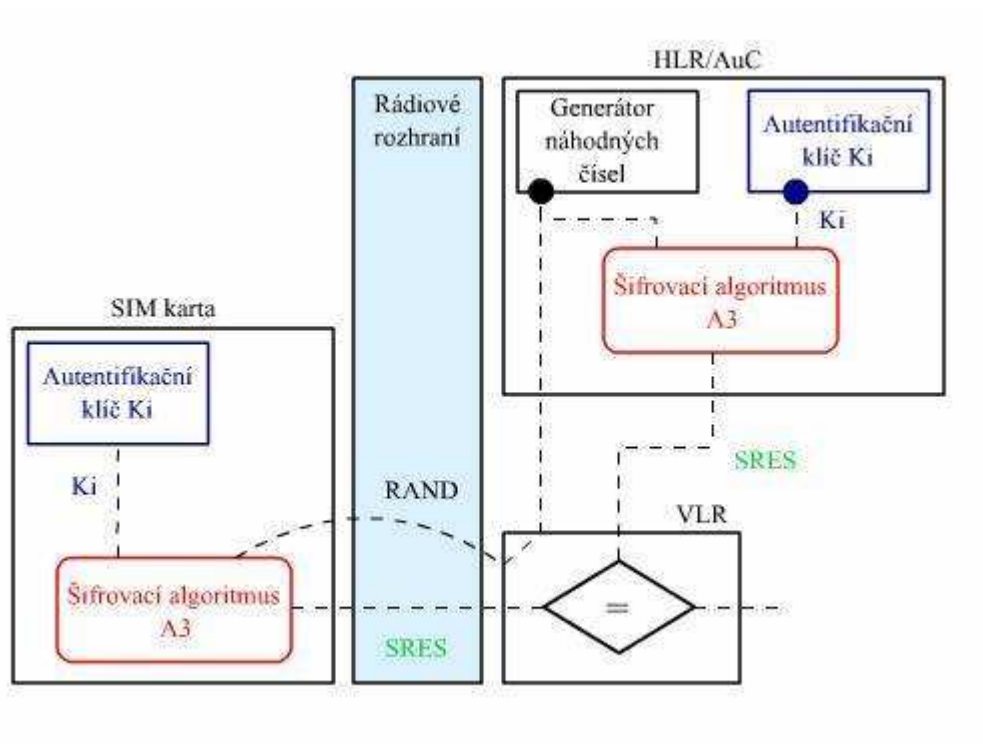
Po zapnutí požádá mobilní stanice o přístup do sítě. Zašle tedy své IMSI (International Mobile Subscriber Identity) a toto je jediný okamžik, kdy je používáno toto číslo IMSI. Anonymita je poté zajištěna přidělením tzv. dočasné identifikace TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity), která je uložena na SIM kartě a v registru VLR. Způsob, jakým probíhá ověření totožnosti SIM karty je znázorněn na následujícím obrázku.



V registru HLR (AuC) je vygenerováno náhodné číslo RAND. Na základě tohoto čísla je pak s pomocí autentifikačního klíče Ki podle šifrovacího algoritmu A3 spočítána odezva SRES (Signed Response) na toto náhodné číslo. Zároveň je podle šifrovacího algoritmu A8 (označovaný též A38) vygenerován šifrovací klíč Kc (viz. šifrování). Tato trojice (RAND - 128 bitů, SRES - 32 bitů a Kc - 64 bitů) je předána do registru VLR, kde je po dobu spojení uchována. Registr VLR dále přepośle náhodné číslo RAND mobilní stanici, která v SIM kartě na základě znalosti klíče Ki a čísla RAND spočte odpověď SRES. Tato odpověď je poslána zpět do VLR, kde je porovnána s odpovědí vygenerovanou v HLR a určí, zda stanice má přístup do sítě. Algoritmus A3 a klíč Ki jsou tedy zabezpečeně uloženy jednak v registru HLR a také v SIM kartě. Při komunikaci tedy rádiovým rozhráním prochází pouze náhodné číslo RAND a odpověď SRES. Algoritmus A3 je vytvořen tak, aby bylo relativně snadné spočítat SRES z údajů Ki a RAND, ale velmi náročné vypočítat Ki z údajů RAND a SRES.

Šifrovací proces

Šifrování probíhá tak, že je na základě klíče (kombinace znaků) pomocí šifrovacího algoritmu vygenerována bitová posloupnost. Tato šifrovací posloupnost se pak přičítá k přenášené bitové posloupnosti. Proces šifrování v systému GSM je popsán následujícím obrázkem.



V registru HLR (AuC) je vygenerováno náhodné číslo RAND. Na základě tohoto čísla je pak s pomocí autentifikačního klíče Ki podle šifrovacího algoritmu A8 vygenerován šifrovací klíč Kc (zároveň je pomocí algoritmu A3 spočítána odezva SRES - viz. autentikace). Tato trojice (RAND - 128 bitů, SRES - 32 bitů a Kc - 64 bitů) je předána do registru VLR, kde je po dobu spojení uchována. Registr VLR dále přeposle náhodné číslo RAND mobilní stanici, která v SIM kartě na základě znalosti Ki a algoritmu A8 vygeneruje šifrovací klíč Kc. Šifrovací posloupnost, kterou k přenášeným datům přičítáme, je generována pomocí algoritmu A5. Vstupními údaji pro tento algoritmus je šifrovací klíč Kc (64 bitů, generovaný zvlášť pro každé spojení) a číslo TDMA rámce (22 bitů měnících se každých 4,615 ms). Šifrovací algoritmus již není z důvodu dostatečné výpočetní kapacity a rychlosti uložen na SIM kartě, ale je implementován přímo v mobilní stanici. Pokud během hovoru dojde k handoveru, šifrovací klíč Kc se nemění. Ani při šifrování tedy nedochází k přenosu žádného klíče a rádiovým rozhráním jsou přenášena pouze náhodná čísla RAND a šifrovaná data.

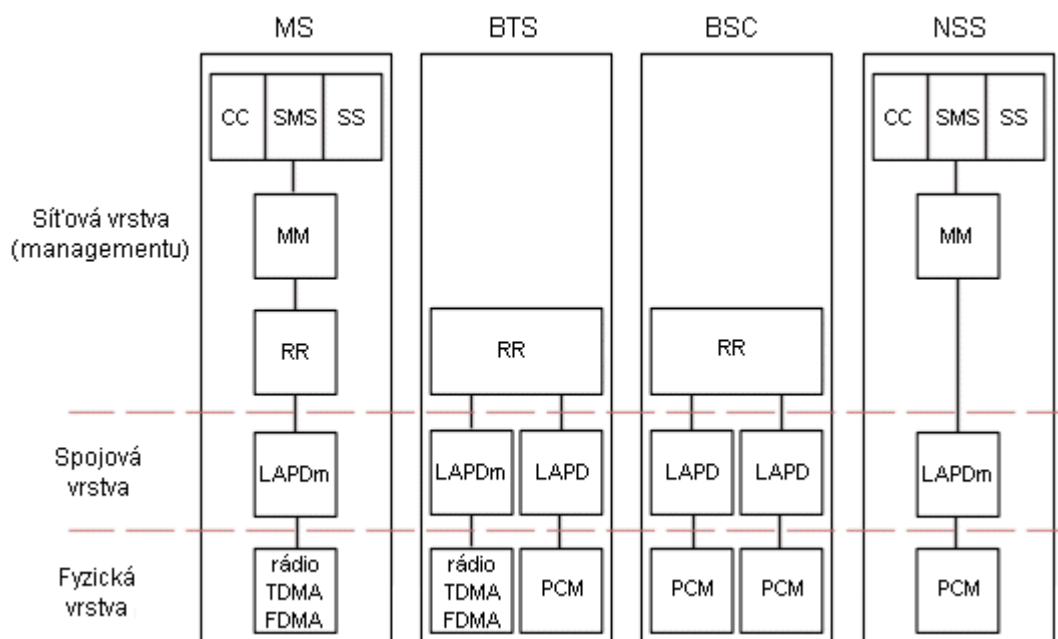
Algoritmy A3 a A8 nejsou specifikovány v doporučení, ale GSM MoU (Memorandum of Understanding) a je zde ponechána určitá volnost, ponechávající možnost domluvy mezi provozovatelem sítě a výrobcem SIM karet.

Vrstvový model, logické kanály

Vrstvový model

Logické kanály

Na následujícím obrázku je zobrazen vrstvý model systému GSM, který je definován pro tři spodní vrstvy modelu OSI. Každá vrstva je tvořena skupinou tzv. entit, což jsou všechny do ní spadající funkční jednotky.



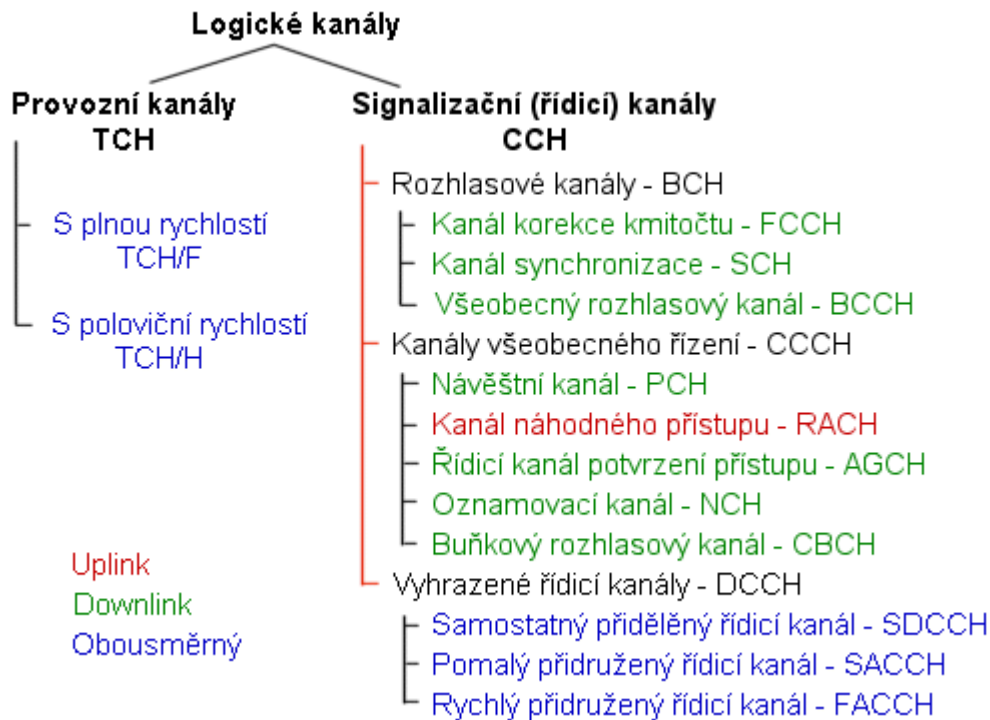
V dalších úvahách je třeba požit další pojmy - fyzické a logické kanály. Fyzickým kanálem je kombinace rádiového kanálu o šířce 200 kHz (označeného pomocí ARFCN) a časového intervalu (označené příslušným číslem 0-7). Do každého takto vytvořeného fyzického kanálu potom může být v rozdílných časech procesem mapování vložen různý logický kanál. Seznam a popis logických kanálů je uveden v [samostatné kapitole](#).

- Fyzická vrstva **PH** (Physical Layer): Definuje rádiové fyzické kanály, tedy parametry TDMA, FDMA, modulace a mapuje do těchto kanálů kanály logické.
- Spojová vrstva **DL** (Data Link Layer): Na této vrstvě je použit protokol LAPDm, což je varianta protokolu LAPD, přizpůsobená pro použití v systému GSM. Na této vrstvě jsou vytvářeny logické kanály.
- Sít'ová vrstva **NL** (Network Layer): Je dále rozdělena na tři podvrstvy :
 - Management rádiových zdrojů **RR** (Radio Resource Management), který zajišťuje spojení mezi mobilní stanicí a subsystémem základnových stanic BSS, řídí handover, výkony vysílačů apod. Relace této podvrstvy existují mezi MS a BSS
 - Management mobility **MM** (Mobility Management), zajišťující funkce vycházející z mobility účastníků. Na starost tedy má aktualizaci polohy, identifikaci a ověření účastníka. Vazby na této podvrstvě existují mezi MS a MSC/VLR, HLR a AuC.
 - Management komunikace **CM** (Communication Management) je opět podrobněji dělen :

- Řízení hovoru **CC** (Call Control): Zajišťuje vytváření, udržení a ukončení hovorů. Komunikace zde probíhá mezi MS a MSC.
- Doplnkové služby **SS** (Supplementary Services): Má na starost registraci, řízení a rušení doplňkových služeb, poskytovaných danou sítí. SS procedury existují mezi MS a MSC/VR, HLR a Auc.
- Služba krátkých textových zpráv **SMS** (Short Message Service): Zajišťuje mobilní stanicí možnost přijímání a odesílání krátkých textových zpráv. Komunikace probíhá mezi MS a SMS Centrem **SMSC** (Short Message Service Centre).

Logické kanály

Struktura časových slotů vytváří na nosné frekvenci fyzické kanály. Fyzickým kanálem se tedy rozumí kombinace přiděleného rádiového kanálu o šířce 200 kHz (označeného pomocí ARFCN) a časového intervalu (označené příslušným číslem 0-7). Do každého takto vytvořeného fyzického kanálu potom může být v rozdílných časech procesem mapování vložen různý **logický kanál**. Specifikace GSM definují širokou řadu logických kanálů, které jsou v závislosti na účelu tohoto kanálu tvořeny různými typy burstů.



- **Provozní kanály TCH (Traffic Channels)**

Tyto kanály jsou určeny k přenosu digitalizovaných hovorů nebo datových signálů

- Provozní kanály s plnou rychlostí **TCH/F** (Full Rate Traffic Channels)
- Provozní kanály s poloviční rychlostí **TCH/H** (Half Rate Traffic Channels)

- **Signalizační (řídící) kanály CCH (Control Channels)**

Tyto kanály jsou určeny pro přenosu signalizace a dále je dělíme :

Rozhlasové kanály BCH (Broadcast Channels)

- Kanál korekce kmitočtu **FCCH** (Frequency Correction Channel): Nese informace umožňující korekci naladění mobilní stanice a identifikaci kmitočtu nesoucího signalizační kanály. Tvoří ho bursty pro kmitočtovou korekci.
- Kanál synchronizace **SCH** (Synchronization Channel): Nese informace pro rámcovou signalizaci mobilní stanice (číslo rámce) a identifikaci základnové stanice. Tvořen je synchronizačním burstem.
- Všeobecný rozhlasový kanál **BCCH** (Broadcast Common Channel): Nese informace o aktuálním způsobu mapování signalizačních kanálů, o výzvách k mobilní stanici (korekce výkonu, ...), o lokalizační oblasti apod. Je tvořen normálním burstem a je sledován každou mobilní stanicí.

Kanály všeobecného řízení CCCH (Common Control Channel)

- Návěstní kanál **PCH** (Paging Channel): Slouží k předání informace o příchozím hovoru. Tento kanál je sledován každou mobilní stanicí ve stavu pohotovosti, je tvořen normálním burstem
- Kanál náhodného přístupu **RACH** (Random Access Channel): Jedná se o vzestupný kanál, který slouží pro vyžádání samostatného řídicího kanálu pro další signalizaci. Z důvodu náhodné aktivity požadavků mobilních stanic je komunikace v tomto kanále realizována principem ALOHA. Kanál je tvořen přístupovým burstem.
- Řídicí kanál potvrzení přístupu **AGCH** (Access Grant Control Channel) : Slouží pro přidělení samostatného řídicího kanálu mobilní stanici, která předtím o toto požádala. Tvoří jej normální burst.
- Oznamovací kanál **NCH** (Notification Channel) a Buňkový rozhlasový kanál **CBCH** (Cell Broadcast Channel) byly přidány až do fáze 2+ GSM

Vyhrazené řídicí kanály DCCH (Dedicated Control Channel)

- Samostatný přidělený řídicí kanál **SDCCH** (Stand Alone Dedicated Control Channel): Slouží pro obousměrnou komunikaci mezi mobilní a základnovou stanicí před přidělením provozního kanálu.
- Pomalý přidružený řídicí kanál **SACCH** (Slow Associated Control Channel): Zajišťuje přenos signalizace k existujícímu spojení.
- Rychlý přidružený řídicí kanál **FACCH** (Fast Associated Control Channel): Podobný účel jako SACCH, vzniká a zaniká však podle potřeby.

Přenos dat v systému GSM

Klasický přenos dat

HSCSD

GPRS

EDGE

Klasický přenos dat

Mobilní digitální sítě sice byly vyvinuty pro potřebu přenosu hlasu, nicméně lidský hlas přenášejí v digitálním tvaru. Díky tomu je pro ně relativně snadné přenášet místo hlasu i obecná data. Přesto však existují určitá omezení, týkající se hlavně dosažitelné přenosové rychlosti. V předchozích kapitolách bylo uvedeno, že z principu fungování sítě GSM je pro každý časový interval (hovorový kanál) k dispozici právě 22,8 kbit/s, přestože samotný rádiový kanál nabízí 33,8 kbit/s. Zbylých 11 kbit/s je však použito jako režijní přenosová kapacita, zajišťující funkci sítě GSM. Těchto 22,8 kbit/s však nelze využít výhradně k přenosu samotných uživatelských dat (stejně jako u přenosu hovoru je původní bitová rychlost 13 kbit/s doplněna o další potřebné údaje a vzroste na 22,8 kbit/s), protože i zde je potřeba přidat určitý počet režijních bitů. První cestou, kterou bylo data možno přenášet, bylo použití velmi podobných technik a mechanismů pro zajištění spolehlivosti datových provozů jako u hlasových přenosů. Datové přenosy tak bylo možno realizovat rychlostí 9,6 kbit/s a

zbývajících 13,2 kbit/s bylo využito na zajištění spolehlivosti přenosu, ošetření chyb a výpadků. Tento princip přenosu dat je stále velmi často používán a je označován jako **CSD** (Circuit Switched Data), což znamená, že se jedná o přenos dat na principu přepojování okruhů.



■ Režijní bity připadající na fungování sítě GSM - 11 kbit/s

■ Režijní bity připadající na zajištění datových přenosů při rychlosti 9,6 kbit/s - 13,2 kbit/s

Po určité době bylo úspěšně odzkoušeno, že datové přenosy nepotřebují tak vysoce robustní ochranné mechanismy a je možné tyto procedury oslabit a naopak zvýšit rychlost přenášených uživatelských dat. Konkrétně se rychlost přenášených dat zvýšila na hodnotu 14,4 kbit/s, ovšem za cenu toho, že datové přenosy touto rychlostí vyžadují kvalitnější signál. V okrajových částech buňky a stejně tak v místech se slabým signálem se pak efektivní využitelnost těchto datových přenosů zmenšuje.



■ Režijní bity připadající na fungování sítě GSM - 11 kbit/s

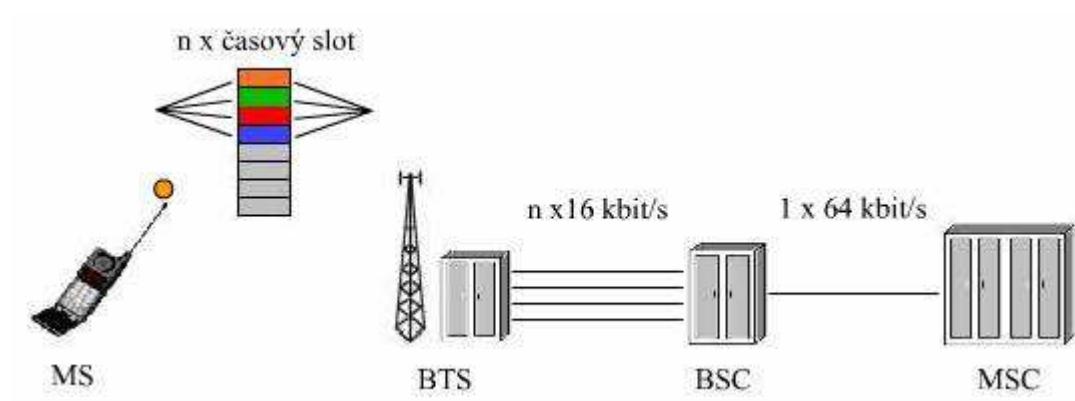
■ Režijní data připadající na zajištění datových přenosů při rychlosti 14,4 kbit/s - 8,4 kbit/s

Při každém přenosu dat je nutností schopnost vyrovnat se s případnými chybami při přenosu - nejinak je tomu u přenosů dat sítí GSM. Při klasickém přenosu hlasu je požito kódování, které z původních 13 kbit/s vytvoří 22,8 kbit/s a přijímající strana je pak schopna provést opravu některých přijatých dat. Podobně je tomu u přenosu obecných dat. Použité mechanismy se sice od přenosu hlasu liší, ale zajišťují také dostatečné zabezpečení proti chybám. Tyto mechanismy, stejně jako u přenosu hlasu, přidávají k přenášeným datům určité doplňující informace, které umožňují opravu přijímaných dat bez nutnosti přenášet tuto poškozenou část znovu. Toto řešení sice nezpůsobuje nepravidelnosti toku dat a zároveň nezpomaluje tok dat, na druhou stranu je náročný na přenosovou kapacitu. Čím více chyb má protokol odstranit, tím více ochranných bitů je třeba k datům přidávat.

Další zvýšení spolehlivosti datových přenosů touto cestou přidávání informací k přenášeným již není vhodné. Místo toho se používá řešení, využívající zpětnou vazbu mezi odesílatelem a příjemcem. Pokud příjemce přijme data poškozená, pošle odesílateli zprávu a ten na tuto žádost data opětovně pošle. Tento proces samozřejmě vyžaduje, aby byly obě strany domluveny na tomto postupu a je tedy nutno definovat protokol. Tento protokol se nazývá **RLP** (Radio Link Protocol) a je odvozený od linkového protokolu HDLC. Bitový tok je zde rozdělen na rámce po 200 bitech a k nim jsou přidány bity pro detekci chyb a číslování rámců. Na přijímací straně je testováno správné přijetí každého rámce a v případě chybného přenosu je požadováno opětovné poslání. Protokol RLP je implementován v koncových bodech sítě GSM - jednak v samotném mobilním terminálu a na straně druhé v ústředně MSC, resp. na ní navazující jednotku spolupráce s externími sítěmi **IWF**, která zajišťuje propojení s ostatními sítěmi. Režim kdy je tento protokol používán se nazývá **netransparentní spojení (přenos)**. Jeho výhodou je nízká chybovost, záporem je větší rozptýl přenosové doby. Jestliže se pro přenos dat nepoužívá protokol RLP, jedná se **transparentní spojení**. Existence tohoto režimu je nutná z toho důvodu, že některé mobilní stanice a jiné koncové zařízení nemusí protokol RLP podporovat.

HSCSD

HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) je řešení pro rychlejší přenos dat, které ve stávající síti GSM využívá více časových intervalů. Jedná se o přenos dat s přepojováním okruhů a oproti klasickému přenosu přináší výrazné zrychlení. Na jednom časovém slotu jsou data přenášena buď rychlostí 9,6 kbit/s, ale s pomocí zefektivnění zabezpečovacího mechanismu a omezení prostoru pro opravné bity je možno z 22,8 kbit/s, připadajících na jeden interval, využívat 14,4 kbit/s. Toto je maximum, které lze přenášet po jednom slotu. Další směr, kterým je možno zvýšit rychlost přenášených dat tedy vede přes současné použití více časových slotů.



Jak je vidět z obrázku, komunikace mobilního terminálu a základnové stanice BTS probíhá na více časových slotech současně podle toho, kolik je jich stanici přiděleno. Přidělení slotů je závislé na momentálním počtu dostupných kanálů a dále na schopnosti samotné mobilní stanice. Mezi BTS a

základnovou řídicí jednotkou BSC (rozhraní Abis) jsou data přenášena v kanálech s rychlostí 16 kbit/s (v celkové přenosové rychlosti 2 Mbit/s je 32 kanálů rychlých 64 kbit/s, z nichž každý je dále rozdělen na 4 x 16 kbit/s. Těchto 16 kbit/s může být využito k přenosu hovorových dat (13 kbit/s) nebo právě pro přenos dat rychlostí 14,4 kbit/s. Ke sloučení do kanálu s přenosovou rychlostí 64 kbit/s dochází v BSC, případně jednotce **TRAU** (Transcoder and Rate Adaptation Unit). Tato jednotka má za úkol převádět kódovaná hovorová data 13 kbit/s do standardních 64 kbit/s hovorových kanálů (PCM) a dále upravovat rychlost přenášených dat rovněž na 64 bit/s. Odtud také vychází maximální přenosová rychlost 64 kbit/s, které je možno pomocí této technologie dosáhnout.

Přenos tímto způsobem může být (a ve většině případech tomu tak skutečně je) asymetrický, tzn. ve směru od mobilní stanice k síti jsou přiděleny například tři časové intervaly a ve směru k mobilní stanici je přidělen interval jeden. Tento způsob přidělování je velmi často používán a je vhodný například pro připojení k internetu, kdy data směřují převážně směrem od sítě k uživateli. Standard, který HSCSD definuje, rozděluje možné režimy do 18 tříd podle toho, kolik kanálů je možno v jednotlivých směrech použít. Některé třídy jsou uvedeny v tabulce.

Třída HSCSD	Maximální počet slotů		
	Příjem	Vysílání	Celkem
1	1	1	2
2	2	1	3
3	2	2	3
4	3	1	4
5	2	2	4
6	3	2	4
9	3	2	5
10	4	2	5
12	4	4	5
13	3	3	6
18	8	8	16

Tento standard je jednou z nejmladších modifikací systému GSM (únor 1997). V současné době provozuje v České republice službu HSCSD pouze společnost Eurotel pod obchodním jménem HSCSD FAST. Ostatní operátoři tuto technologii nevyužívají a rozhodli se přejít rovnou na rychlé přenosy dat technologií GPRS. V síti Eurotel je možno použít až 4 sloty současně, jedné se tedy o 6. třídu z výše uvedené tabulky. Na uživateli je, aby rozhodl zda použije přenos symetrický (2 + 2 sloty, neboli 22,8 kbit/s v obou směrech) nebo přenos asymetrický (3+1 slot, odpovídající 43,2

kbit/s na příjmu a 14,4 kbit/s pro vysílání). Z uvedeného vyplývá, že Eurotel používá na jednom kanálu přenos dat rychlostí 14,4 kbit/s.

GPRS

GPRS (General Packet Radio System) je zatím nejmodernější používaná technologie přenosu dat prostřednictvím sítě GSM. Celý přenos dat touto technologií spočívá na principu přepojování paketů, což přináší do mobilní komunikace řadu novinek. Přenosové kapacity zde nejsou nikomu trvale vyhražovány, ale jsou k dispozici všem uživatelům zároveň. Takovéto řešení má několik zásadních výhod. První výhodou je maximálně efektivní využití přenosové kapacity těmi uživateli, kteří skutečně potřebují data v daný okamžik přenášet. To je zásadní odlišnost od předchozí varianty s přepojováním okruhů, kdy byla každému uživateli vyčleněna taková přenosová kapacita o kterou požádal, bez ohledu na její skutečné využívání. Další podstatnou výhodou, která vyplývá z principu přepojování paketů, je způsob zpoplatňování. Technologie GPRS umožňuje platbu nikoliv za čas (dobu spojení), ale podle objemu skutečně přenesených dat.

Zavedení technologie GPRS do systému GSM vyžaduje poměrně velký zásah do existující mobilní sítě, protože ta byla budována pouze pro přenos dat na bázi přepojování okruhů. Na následujícím obrázku je znázorněna cesta od klasické sítě GSM po síť s implementovanou technologií GPRS

Celý proces zavedení GPRS do sítě GSM si lze v jednoduchosti představit jako "přeložení" další sítě (fungující na principu přepojování paketů) přes stávající pevnou část sítě GSM a provázání těchto dvou sítí s řídicími prvky. Změny v původní síti se týkají jednak programového vybavení, v některých případech i samotného zařízení. Důležitou změnou je rozšíření základnové řídicí jednotky BSC o blok **PCU** (Packet Controller Unit), který je bodem kde se obě sítě střetávají. Novými prvky v celé architektuře jsou potom především uzly pro podporu GPRS, tzv. **GSN** (GPRS Support Node).

- **SGSN** (Serving GPRS Support Node): Jedná se vlastně o analogii MSC, pracuje však s pakety. Plní především následující funkce:
 - SGSN směřuje v obou směrech datové pakety a obsluhuje všechny uživatele přihlášené do GPRS sítě kteří se nacházejí v jeho dosahu. Ve směru k uživateli je provoz směřován ze SGSN přes BSC na BTS a odtud do mobilní stanice.
 - Provádí autentizaci, šifrování a kontrolu IMEI (v klasické síti probíhá šifrování mezi telefonem a BTS)
 - Funkce mobility managementu (což je součást 3. vrstvy vrstevného modelu GSM, plní funkce autentifikace, lokalizace atd.).
 - Řízení logických kanálů směrem k mobilní stanici.
 - Spojení s HLR, MSC.
- **GGSN** (Gateway GPRS Support Node): Poskytuje rozhraní mezi GPRS sítí a externími sítěmi pracující podle standardu IP nebo X.25, je tedy jakousi branou mezi GSM a vnějšími sítěmi. V GGSN jsou také obsaženy funkce tzv. mobility managementu. Dalšími funkcemi GGSN je např. směřování paketů na správný uzel SGSN, konverze protokolů mezi GPRS a vnějšími sítěmi a může také pracovat jako firewall, tzn. ochrana sítě před nežádoucím vniknutím zvenku. Mezi sebou pak uzly SGSN a GGSN komunikují prostřednictvím protokolu GTP (GPRS Tunneling Protocol), který lze považovat za aplikační protokol

rodiny protokolů TCP/IP - sám využívá ke svému fungování transportní protokoly UDP nebo TCP, pod kterými je provozován protokol IP.

Dalšími jednotkami "překryvné" sítě GPRS jsou :

- **BG** (Border Gateway): Jedná se o bránu mezi GPRS sítěmi různých operátorů, umožňující funkci roamingu.
- **CG** (Charging Gateway): Jednotka, která uchovává a vyhodnocuje zúčtovací data, která přicházejí od SGSN a GGSN. Po příslušném zpracování jsou tato data odeslána do celkového zúčtovacího systému sítě GSM.
- **LIG** (Legal Interception Gateway): Jednotka odposlechu, která v některých zemích musí být dle zákona nainstalována.

Přenosové rychlosti jsou opět nejvíce limitovány rádiovým rozhraním GSM, kde na každý slot připadá přenosová rychlost 33,8 kbit/s. Když se do ní započítá režie připadající na fungování sítě, zbývá přenosová rychlost 22,8 kbit/s. Z této rychlosti se pak u standardního přenosu odečítá ještě dalších 13,2 kbit/s připadajících na zajištění samotného přenosu, zejména jeho spolehlivosti (u klasických a HSCSD přenosů rychlostí 14,4 kbit/s je tato režie jen 8,4 kbit/s). I v případě GPRS je možné vyjít opět jen z oněch 22,8 kbit/s a snažit se minimalizovat počet dalších režijních bitů připadajících na zajištění přenosů. Zde velmi záleží na konkrétních podmínkách šíření signálu - při optimálních podmínkách je možné výrazněji oslabit režii na zajištění přenosu, a při horších podmínkách šíření je naopak nutné ji zase zvětšit. GPRS proto zavádí čtyři různé třídy, které označuje jako kódovací schémata (coding scheme), jejichž přehled je uveden v následující tabulce.

Třída	"Užitečná" přenosová rychlost
CS-1	9,05 kbit/s
CS-2	13,4 kbit/s
CS-3	15,6 kbit/s
CS-4	21,4 kbit/s

Pokud by GPRS mohlo využít maximální počet 8 slotů současně, pak by to při optimálních podmínkách šíření signálu (kdy lze použít CS-4) odpovídalo rychlosti 8 x 21,4, neboli 171,2 kbit/s. Je ale třeba zdůraznit, že se jedná skutečně spíše jen o teoretické maximum, protože jde o souběh dvou optimálních případů - optimálních podmínek šíření signálu a možnosti alokovat všech 8 slotů současně. V praxi bude takovýto souběh nastávat jen velmi vzácně, navíc lze počítat s tím že operátoři alespoň z počátku budou sami omezovat maximální dosažitelnou rychlost, zejména kvůli počtu obsazených slotů, takže skutečná nabídka bude s největší pravděpodobností výrazně nižší.

Pro GPRS byly definovány tyto třídy terminálů :

- **A** - terminály této třídy jsou schopny současně ovládat služby na základě spojování okruhů i spojování paketů. Oba druhy služeb jsou ovládány nezávisle na sobě.
- **B** - tyto terminály ovládají v jeden okamžik jen jednu z těchto služeb, ale je možné automaticky přecházet mezi těmito dvěma režimy. Může přerušit přenos paketů při příchozím hovoru a pokračovat později.

- **C** - u těchto terminálů je nutné nastavit režim (paketový nebo okruhový). Při nastavení na spojování okruhů nemůžete využívat GPRS a naopak.

Dále GPRS vychází vstříc skutečnosti, že různé druhy datových přenosů mohou mít různé požadavky na jejich kvalitu, resp. kvalitativní parametry. GPRS nabízí různé úrovně kvality služeb **QoS** (Quality of Service) pokud jde o :

- **Prioritu** - zde jsou definovány tři úrovně priority: vysoká, střední a nízká.
- **Spolehlivost** - zde jsou definovány opět tři varianty, resp. třídy spolehlivosti, které definují určité kombinace pravděpodobnosti toho, že dojde ke ztrátě paketu, k přijetí duplikátu, k poškození paketu či jeho doručení mimo pořadí.
- **Zpoždění** - definovány jsou 4 třídy vztažené k průměrnému zpoždění a ke zpoždění 95% přenášených paketů.
- **Propustnost** - zde je definována maximální (špičková) a střední přenosová rychlost.

GPRS tedy přináší uživatelům mnoho nových možností a nabízí :

- Levnější přístup do datových sítí
- Vyšší přenosové rychlosti
- Kratší doba sestavení spojení
- Nepřetržité spojení s vnější datovou sítí
- Lepší podpora při roamingu
- Lepší podpora přístupu do různých datových sítích Internet, podnikové sítě atd.

Použitá literatura : Tomáš Richtr , ČVUT Praha