

BPC-MKO

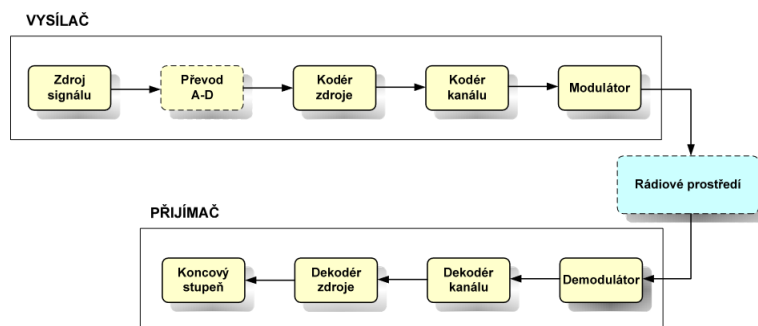
Vypracované otázky k SZZ

Obsah

1	Blokové schéma digitálního radiokomunikačního systému, popis bloků, přenosová kapacita systému.	3
1.1	Přenosová kapacita	4
2	Základní způsoby zpracování signálů v systémech mobilních komunikací (zdrojové kódování, kanálové kódování, prokládání a digitální modulace).	5
2.1	Zdrojové kódování	5
2.1.1	Zdrojové kódování zvukových signálů	6
2.1.2	Zdrojové kódování tvaru vlny	6
2.1.3	Parametrické kódování	7
2.1.4	Hybridní zdrojové kódování	7
2.2	Zdrojové kódování obrazových signálů	7
2.2.1	Zdrojové kódování videosekvencí	8
2.2.2	Zdrojové kódování akustických signálů	9
2.3	Kanálové kódování	9
2.3.1	Detekční kódy	10
2.3.2	Korekční (opravné)	10
2.3.3	Detekční kódy s paritními bity	10
2.3.4	Konvoluční kódy	10
2.3.5	Turbo kódy	11
2.3.6	Blokové kódy	11
2.4	Prokládání	11
2.5	Digitální modulace	13
2.5.1	Konstelační diagramy	13
2.5.2	Základní parametry digitálních modulací	14
3	Systémy s mnohonásobným přístupem a metody multiplexování, výhody a nevýhody jednotlivých přístupů.	16
3.1	Přístup FDMA	16
3.1.1	Kmitočtový multiplex FDM	16
3.2	Přístup TDMA	17
3.2.1	Časový multiplex TDM	17
3.3	Přístup CDMA	18
3.3.1	Kódový multiplex CDM	19
4	Způsoby přenosu (simplex, duplex) a typy spojování (komutované a paketové), diverzitní příjem, diverzitní systémy.	20
5	Struktura obecné buňkové sítě a její hlavní výhody, procedura "handover" a její různé typy.	22
6	Základní architektura systému GSM, GPRS, HSCSD, EDGE, blokové schéma mobilní stanice systému GSM.	24
6.1	GPRS	25
6.2	HSCSD	26
6.3	EDGE	26

7	Systém UMTS, proces rozprostírání signálu, vlastnosti používaných kódů.	27
8	Systém LTE, základní architektura a popis systému LTE, základní popis E-UTRA Downlink a Uplink, rozdíly mezi LTE a LTE-A.	30
8.1	Architektura systému	30
8.2	Přístupová síť E-UTRAN	30
8.3	Downlink E-UTRAN	31
8.4	Uplink E-UTRAN	32
8.5	Uplink E-UTRAN	32
8.6	LTE a LTE-A	33
9	Systémy WLAN (základní popis standardu IEEE 802.11 a definice fyzické vrstvy) a WPAN (základní popis, systém Bluetooth a topologie sítě Bluetooth).	34
9.1	Systémy WLAN	34
9.1.1	IEEE 802.11	34
9.1.2	Fyzické vrstvy	35
9.2	Systémy WPAN	36
9.2.1	systém Bluetooth	36
9.2.2	topologie sítě Bluetooth	36
10	Systémy LPWAN (základní popis, IoT, systémy LoRa a SigFox).	38
10.1	IoT	38
10.2	LoRa	38
10.3	SigFox	38

1 Blokové schéma digitálního radiokomunikačního systému, popis bloků, přenosová kapacita systému.



Obr. 1.4. Blokové schéma digitálního radiokomunikačního systému

Obrázek 1: Blokové schéma digitálního radiokomunikačního systému

Digitální radiokomunikační systém se skládá z vysílače, který obsahuje kodér zdroje, kodér kanálu a modulátoru. Příjemací část je složena z demodulátoru, dekodér kanálu a dekodér zdroje. Signál mezi vysílačem a přijímačem prochází radiovým komunikačním kanálem, který tvoří volné prostředí, v němž je informace přenášena pomocí radiových vln.

Signál z výstupu zdroje je veden do kodéru zdroje, kde je snížena (případně odstraněna) jeho redundance a irelevance, což se projeví ve snížení jeho přenosové rychlosti. V případě analogového signálu je zde blok A – D převodník, který případně převede analogový signál na digitální. Kodér se používá především při přenosu hovorových a obrazových signálů (parametrické zdrojové kódování, zdrojové kódování tvaru vlny, transformační kódování).

Za kodérem zdroje následuje kodér kanálu, ve kterém je signál zabezpečen proti chybám při přenosu, a to záměrným (řízeným) zvýšením redundance, což má za následek nepatrné zvýšení jeho přenosové rychlosti. Stupně ochrany jsou různé: mohou být zabezpečeny jednotlivé bity, ale i celé byty (paritní kódy, konvoluční kódy, Fireho kód, blokový Reedův – Solomonův kód.) Nedílnou součástí bývá také prokládání (interleaving), jehož cílem je zabezpečit signál proti shlukům chyb.

Dále je signál přiveden do modulátoru, kde je vhodnou digitální modulací modulován na nosnou. Nejčastěji se používá fázové a kmitočtové klíčování (PSK, FSK v různých modifikacích (QPSK, Q – PSK, $\pi/4$ QPSK, GMSK), u nejnovějších systémů modulace OFDM. Při použití vícecestavových modulací lze dosáhnout vyšších přenosových rychlostí signálu, ovšem za cenu složitějšího a tím i dražšího demodulátoru. Modulovaný signál je veden do vysokofrekvenčního výkonového stupně, za nímž následuje vysílací anténa, kterou je signál vyzářen do volného prostoru.

Na přijímací straně je signál přicházející z přijímací antény zesílen ve vysokofrekvenčním zesilovači (případně převeden do mezifrekvenční podoby a dále veden do demodulátoru, dekodéru kanálu a dekodéru zdroje. V těchto obvodech se inverzními kroky získá původní signál (je rekonstruován do nejpravděpodobnější podoby s původním signálem), který je přiváděn do koncového stupně.

1.1 Přenosová kapacita

Přenosová kapacita C je množství informace vyjádřené v bitech, jež může být přeneseno komunikačním kanálem daného systému za 1 sekundu. Je určena Shannonovým – Hartleyovým vztahem:

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

kde C je maximální dosažitelná rychlost bezchybného přenosu informace idealizovaným radiokomunikačním systémem při použití optimálního kódování a modulace, B je šířka pásma radiokomunikačního kanálu, S je střední hodnota výkonu signálu na výstupu kanálu, tj. na vstupu přijímače, N je střední hodnota výkonu šumu na výstupu kanálu, tj. na vstupu přijímače.

Skutečná přenosová kapacita reálných systému se hodnotě dané vztahem 1 pouze blíží, a to tím více, čím se použité metody kódování a modulace blíží metodám optimálním. Požadovanou kapacitu C systému lze dosáhnout různými kombinacemi parametrů B , S a N .

Střední hodnotu výkonu šumu N lze vyjádřit pomocí spektrální výkonové hustoty šumu N_0 vztahem:

$$N = B \cdot N_0 \quad (2)$$

Zavedením nové veličiny B_0 můžeme pro střední hodnotu výkonu signálu S psát:

$$S = B_0 \cdot N_0 \quad (3)$$

Vyjádříme-li poměr S/N pomocí vztahů 2 a 3 dostaneme:

$$\frac{S}{N} = \frac{B_0 \cdot N_0}{B \cdot N_0} = \frac{B_0}{B} = \frac{1}{\frac{B}{B_0}} \quad (4)$$

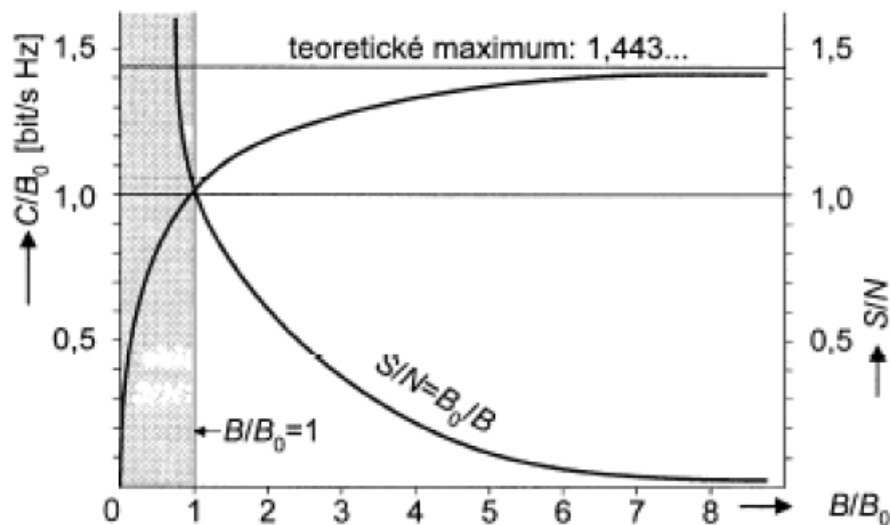
Z uvedeného vzorce vyplývá, že nová veličina B_0 je šířka pásma radiokomunikačního kanálu, při které je střední hodnota výkonu šumu N rovna střední hodnotě výkonu signálu šumu S , tj. poměr signál – šum je roven jedné. Dosazením 4 do 1 a dělením celé rovnice veličinou B_0 dostáváme normovaný tvar Shannonova – Hartleyova vztahu:

$$\frac{C}{B_0} = \frac{B}{B_0} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{B_0}{B}\right) = x \cdot \log_2 \left(1 + \frac{1}{x}\right), \quad (5)$$

kde $\frac{C}{B_0}$ je normovaná přenosová kapacita.

$x = \frac{B}{B_0}$ je normovaná šířka pásma.

Z uvedených průběhů vyplývá, že s poklesem normované šířky pásma B/B_0 pod hodnotu 1 klesá velice rychle i normovaná přenosová kapacita C/B_0 , zatímco poměr signál – šum S/N prudce zvyšuje. Tato oblast (vyznačená v obrázku tmavě) charakterizuje tzv. úzkopásmové radiokomunikační systémy, které pracují s poměrem signál – šum mnohem větším než 1, avšak jejich normovaná přenosová kapacita je hodně vzdálená od dosažitelného maxima $C/B_0 = 1,443 bit/s \cdot Hz$. Pro normovanou šířku pásma větší než 1 se normovaná přenosová kapacita začíná pozvolna blížit teoretickému maximu a poměr signál – šum se zmenšuje pod hodnotu 1. Tato část charakterizuje tzv. širokopásmové radiokomunikační systémy, které se označují jako systémy s rozprostřeným spektrem nebo systémy s kódovým multiplexem CDMA.



Obr. 1.5. Závislost normované přenosové kapacity a poměru signál-šum radiokomunikačního systému na normované šířce pásma

Obrázek 2: Přenosová kapacita

2 Základní způsoby zpracování signálů v systémech mobilních komunikací (zdrojové kódování, kanálové kódování, prokládání a digitální modulace).

2.1 Zdrojové kódování

Úkolem kodéru zdroje signálu (zdrojového kodéru) je redukce redundance a irelevance přenášeného signálu na co nejmenší míru. Proces zdrojového kódování je nutný především při zpracování hovorových, zvukových a obrázkových signálů, které obsahují velké množství redundantních a irrelevantních informací. U digitálních signálů je tento proces zbytečný, neboť jsou u těchto signálů již minimalizovány. Výsledkem zdrojového kódování je snížení přenosové rychlosti signálu, což se projeví v nižších požadavcích na šířku pásma radiového kanálu. Kompresní poměr je dán vztahem:

$$CR = \frac{R_{vst}}{R_{vst}} \quad [-], \quad (6)$$

kde R_{vst} a R_{vst} jsou přenosové rychlosti digitálních signálů na vstupu a výstupu kodéru zdroje, vyjádřen v bit/s . Také udáván v poměru, např 5:1.

2.1.1 Zdrojové kódování zvukových signálů

Zdrojové kódování hovorových signálů je omezeno horním mezním kmitočtem do $f_{max} \approx 4kHz$. Analogový signál (vstup) je převeden pomocí vzorkování, kvantování a kódování na digitální signál. Kodéry dělíme do tří základních skupin:

- Zdrojové kódování tvaru vlny (Waveform Coders)
- Parametrické kódování tvaru vlny (Vocoders, Voice Coders)
- Hybridní zdrojové kódování

2.1.2 Zdrojové kódování tvaru vlny

Impulzová kódovaná modulace PCM (Pulse Code Modulation) realizuje převod analogového signálu na digitální pomocí 3 kroků: vzorkování, kvantování a kódování. S ohledem na vzorkovací teorém volí vzorkovací kmitočet 8 kHz, tj. každou sekundu se vytváří 8000 vzorků signálu. Počet kvantovacích hladin je 256 kvantovacích hladin. Přenosová rychlost signálu je $8000 \cdot 8 = 64kbit/s$. Tuto hodnotu lze považovat za výchozí pro srovnání dalších způsobů zdrojového kódování hovorových signálů.

Diferenční impulzové kódované modulace DPCM (Differential Pulse Code Modulation) Na rozdíl od PCM kde je přenášena informace o velikosti celého vzorku, je u DPCM přenášena informace pouze o rozdílu kvantovaného vzorku a jeho predikované hodnoty, odvozené z jednoho nebo více předchozích vzorků. Rozdílový signál je menší a dá se vyjádřit menším počtem bitů.

Modulace Delta DM zde je rozdíl kvantovaného vzorku a vzorku předchozího kvantován pouze do dvou kvantovacích úrovní, které jsou kódovány pouze jediným bitem. Lze ji považovat za jednoduchou variantu DPCM, kde predikovaná hodnota každého vzorku je rovna hodnotě vzorku předchozího. Nevýhodou je zkreslení přetížením strmosti – rekonstruovaný signál nesleduje prudké změny velikosti vstupního signálu, např. skokové změny a granulační šum – charakter kvantizačního šumu a projevu je se nejvíce při kódování signálu s konstantní úrovní. Jestliže je pro libovolnou úroveň vstupního signálu kvantizační krok konstantní, označuje se modulace lineární DM (LDM).

Adaptivní modulace Delta – ADM kvantizační krok se mění podle velikosti signálu (např. Winklerův algoritmus), dle strmosti vstupního analogového signálu. Odstraňuje nevýhodu zkreslení přetížením strmosti.

Adaptivní diferenční pulsní kódová modulace – ADPCM používá adaptivní kvantování (AQ) i adaptivní predikci (AP). Adaptivní algoritmy jsou jednoduché, neboť změny parametrů hovorových signálů jsou pomalé. Kvantizační krok se mění za účelem redukce dynamického rozsahu kvantizačního kroku. Zlepšení poměru signál – kvantizační šum v rozsahu 8 až 12 dB vůči PCM. Používané kodeky jsou z doporučení ITU, G.721, G.726. Používají se hlavně u bezšňůrových telefonů CT2 a DECT. Přenosová rychlost na výstupu dekodéru je 32 kbit/s.

2.1.3 Parametrické kódování

– vokodéry – využívá poznatků o lidském hlasu a hlasovém traktu. Základní parametry lidského hlasu jsou: perioda základního tónu hlasu T_0 a základní hlasový kmitočet v rozsahu 50 až 400 Hz, $f_0 = 1/T_0$. Elektrický model (na základě fyziologického modelu) pro syntézu řeči je základem vokodérů s lineárním prediktivním kódováním – LPC (Linear Predictive Coding). Zpracování signálu je prováděno v časové oblasti. Hovorový signál se vytváří v přijímací části vokodéru (hovorovém syntezeátoru), která se skládá z šumového a impulzového generátoru, filtru, zesilovače a reproduktoru.

Na výstupu impulzového generátoru je impulzový signál s opakovací periodou T_0 , která je typická pro mluvící osobu. Přepínač výstupních signálů generátorů je nastavován podle toho, zda je vytvářena znělá nebo neznělá hláska. Budicí signál přichází do filtru, který v závislosti na nastavení svých parametrů modeluje vlastnosti hlasového traktu mluvící osoby. Výstupní signál je zesílen v zesilovači a přiveden do reproduktoru.

Komunikačním kanálem tedy neprochází hovorový signál, ale jeho nejdůležitější parametry. Ve vysílací části se provádí segmentace signálu (dělení na úseky o délce 10 až 30 ms). Na výstupu kodéru je přenosová rychlost menší než 4 Kbit/s. Reprodukovaná řeš má syntetický charakter (není přirozená).

2.1.4 Hybridní zdrojové kódování

Spojuje přednosti obou předchozích způsobů kódování. Součástí zdrojového kodéru je i dekodér (stejný jako na přijímací straně), který již na vysílací straně vytváří syntetizovaný signál, který se odečítá od signálu vstupního. Vzniklá chyba se minimalizuje na základě smyslového vnímání. Za generátorem jsou zařazeny v kaskádě dva filtry. U prvního jsou parametry vypočítány pouze z několika (8 až 16) předchozích vzorků. Druhý filtr realizuje dlouhodobou predikci LTP, která zjemňuje hovorové spektrum. Podle způsobu buzení se rozlišují následující systémy:

- Multiimpulzní buzení MPE – vzájemná poloha i velikosti budících impulsů se určují po jednom. Dosahovaná přenosová rychlost je v rozmezí 8 až 16 kbit/s.
- Regulární buzení PRE – vzájemná poloha impulsů je přesně stanovena. Dosahovaná přenosová rychlost je v rozmezí 8 až 16 kbit/s.
- Kódové buzení CELP – jednotlivé posloupnosti budících impulsů jsou uloženy v paměti. Na přijímací straně se přenáší pouze adresa příslušné posloupnosti. Dosahuje přenosové rychlosti 4 kbit/s s menší.

2.2 Zdrojové kódování obrazových signálů

Při snímání barevných obrazů v kvalitě odpovídajících běžnému televiznímu vysílání (SD) se vytváří analogový signál Y s kmitočtovým rozsahem 0 až 6 MHz (norma CCIR – D, K) a dva analogové chrominanční signály $Y - R$ a $Y - B$ s kmitočtovými rozsahy 0 až 1,3 MHz. Při digitalizaci těchto signálů pomocí PCM je podle doporučení ITU – R 601 vzorkovací kmitočet pro jasový signál 13,5 MHz a pro chrominanční 6,75 MHz.

Jednotlivé vzorky jsou kvantovány 8 bity, tj. do 256 kvantovacích úrovní. Bitová rychlost jasového signálu je 108 Mbit/s a každý chrominanční signál má bitovou rychlost 54 Mbit/s. Všechny tři signály jsou multiplexovány do jednoho výsledného toku, jehož přenosová rychlost je 216 Mbit/s ($105 + 54 + 54$).

Při redukci bitového toku se používá metody transformačního kódování. U pohyblivých obrazů se navíc využívá tzv. vektorů pohybu a predikce snímků nebo pulsů snímků.

Transformační kódování využito při redukci datového toku signálů statických obrazů např. JPEG. Obraz je rozdělen do bloků. Nejčastěji po 8x8 bodů (celkem 64 obrazových bodů). Rozměry bloků jsou stanoveny jako kompromis mezi výslednou kvalitou rekonstruovaného obrazu a složitostí, respektive dobou výpočtu. Bloky jasového i chrominancního signálů se zpracovávají stejným způsobem, avšak odděleně. Jednotlivé vzorky bloků jsou reprezentovány koeficienty (hodnota jasu nebo chrominance) v časové oblasti, které jsou transformovány na jiné koeficienty v kmitočtové oblasti. Původní vzájemná závislost jednotlivých koeficientů (v důsledku korelace parametrů obrazových bodů) je transformací odstraněna. Kompromisem mezi přijatelným výsledkem a složitostí realizace je dvojrozměrná diskretní kosinová transformace **2D – DCT**. DCT pro blok 8x8:

$$G(u, v) = \frac{1}{4} C(u) C(v) \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 g(x, y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16} \quad (7)$$

Zpětná DCT pro 8x8 bloků:

$$g(x, y) = \frac{1}{4} \sum_{u=0}^7 \sum_{v=0}^7 C(u) C(v) G(u, v) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16} \quad (8)$$

Frekvenční koeficient v pozici (0,0) představuje stejnosměrnou složku (střední hodnotou) transformovaného signálu. Velikost koeficientů se po transformaci upravuje kvantováním na celé číslo, malé koeficienty se zanedbávají. Tato úprava je ztrátová. Kvantizační tabulky pro jasový a chrominancní signál jsou různé a jejich obsahem lze měnit kvalitu rekonstruovaného obrazu resp. komprimační poměr. Matice frekvenčních koeficientů (po kvantování se vyčítá podle úhlopříčky (cik – cak)- Kódují se skupiny skládající se z nenulového koeficientu a počtu předcházejících nul. Skupina je charakterizována dvěma symboly. Používá se Huffmanův kód. (Entropické kódování).

Pro přenos signálu lze použít sekvenční kód (všechny koeficienty jednoho bloku se snímají postupně za sebou) nebo mód progresivního kódování (často užívaný způsob přenosu obrazů na síti internet). Aktuální a budoucí (obrazové) kodeky: JPEG 2000, JPEG XL, HEIC, AVIF.

2.2.1 Zdrojové kódování videosekvencí

Při redukci bitového toku sekvence snímků se používají standardy MPEG. Signál se sestavuje do tzv. makrobloků (16x16 vzorků) – čtyři jasové bloky doplněné jedním blokem každého chrominancního signálu. Plynulý sled snímků na vstupu kodéru MPEG – 1 je rozdělen na skupiny snímků GOP (Group of Pictures), které se opakují obvykle po 12 snímcích (cca 0,5 s).

Na začátku každé skupiny je přenášen referenční snímek **I (Intra frame)** – zpracováván bez predikce (bez DPCM). Ostatní snímky mohou být predikované snímky:

P (Predict frame) – přenos difference právě kódovaného (nebo předchozího) snímku P a předchozího snímku I – jednosměrná predikce (snížení přenosové rychlosti 2x).

B (Bidirectional frame) – přenos difference právě kódovaného snímku B a aritmetického průměru vytvořeného z předchozího snímku (I nebo P) a snímku (I nebo P), který následuje po právě kódovaném snímku B – obousměrná predikce (snížení přenosové rychlosti 8x). Pro vytváření a rekonstrukci snímku B je nutné snímky před a po kódování hodně přemístit.

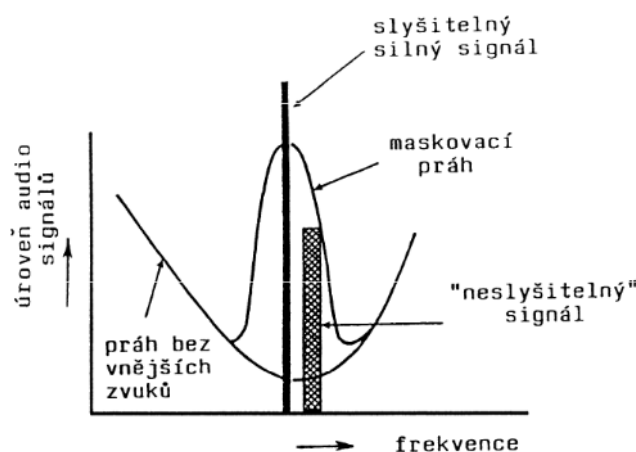
Ještě větší komprimace signálu lze dosáhnout s podporou vektorů pohybu. Aktuální a budoucí video kodeky: HEVC, VP9, VVC, AV1.

2.2.2 Zdrojové kódování akustických signálů

Používá se při kódování akustických signálů v kmitočtovém rozsahu cca 10 Hz až 20 kHz. Využívá maskovacího jevu lidského sluchu, při kterém je užitečným signálem maskován kvantizační šum. Maskování v kmitočtové i časové oblasti. Člověk vnímá zvuky pouze od 16 Hz do cca 16 kHz. Úroveň se udává v dB a je dána vztahem:

$$L = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (9)$$

Maskování v kmitočtové oblasti při současném vnímání několika různých zvukových signálů delších než 200 ms, může jeden signál potlačovat slyšitelnost druhého, i když jsou jejich kmitočty různé. Říkáme, že jej při své určité úrovni akustického tlaku maskuje. **Maskování v časové oblasti** maskovaný krátkodobý signál určité hladiny přichází až



Obr. 2.7. Maskovací efekt lidského sluchu v kmitočtové oblasti

Obrázek 3: Maskování v kmitočtové oblasti

po ukončení maskujícího signálu vyšší hladiny, v době do 10 ms. Při delším intervalu než 10 ms maskování slábne a při intervalu 200 ms již zaniká. Maskování může být rovněž krátký zvukový impulz, následuje – li po něm nejdéle do 5 ms maskující signál. Akustické kódování signálů využívá kódér MPEG.

2.3 Kanálové kódování

Kanálové kódování přizpůsobuje přenášený signál přenosovému kanálu. Obvykle pod tímto pojmem rozumíme protichybové zabezpečovací kódy. Chyby mohou být způsobeny např. šumem, různými druhy rušení, únikem signálu, odrazy, přepnutí signálu při handoveru, atd. Chyby mohou být ojedinělé nebo se mohou vyskytovat ve skupinách (shluky chyb, bursty).

Podstatou zabezpečení signálu je mírné, úmyslné a kontrolované zvýšení jeho redundance (např. přidáním jistého počtu kontrolních bitů) – malé zvýšení přenosové rychlosti a tím i nutné šířky kmitočtového pásma kanálu, při výrazném snížení chybovosti signálu **BER (Bit Error Rate)**. Používají se zabezpečovací neboli bezpečnostní kódy umožňující chybu nejen detekovat, ale i opravit. Při přenosu hovorového signálu je povolena maximální přípustná chybovost $BER = 10^{-3}$ až 10^{-4} , při přenosu televizního obrazového signálu s vysokou rozlišovací schopností HDTV je $BER = 10^{-10}$ a při přenosu dat mezi počítači jsou požadavky přísnější.

2.3.1 Detekční kódy

Při použití detekčního kódu lze chybnou kódovou skupinu nebo blok pouze identifikovat, avšak nelze je opravit. Z přijímané zprávy se většinou odstraní a může dojít ke ztrátě informací. Proto se v takových případech doplňuje systém o tzv. zpětný kanál, ve kterém se přenáší automaticky žádost o opakování přenosu ARQ (Automatic Request Repetition). Podnět k opakování vysílání chybných částí zprávy dává dekodér detekčního kódu.

2.3.2 Korekční (opravné)

Umožňuje chybu nejen zjistit, ale i opravit jednotlivé bity nebo několik bitů. Poněvadž nepotřebují k zabezpečení přenosu nepotřebují zpětný kanál, označují se termínem dopředná korekce chyb FEC (Forward Error Correction). Zabezpečení těmito kódy je složitější, neboť používají větší počet kontrolních bitů. Dělí se na **konvoluční kódy a blokové kódy**.

2.3.3 Detekční kódy s paritními bity

Podstata zabezpečení signálu jednoduchými paritními kódy spočívá v doplnění jednotlivých kódovaných skupin jedním paritním (kontrolním bitem), který může být umístěn na začátku nebo na konci kódové skupiny. Jeho hodnota může být volena tak, aby doplňoval zabezpečovanou skupinu buď na sudý, nebo na lichý počet jedniček.

Kontrola sudé nebo liché parity se na přijímací straně provádí nejčastěji sčítáním modulo 2 (logický součet bez přenosu) jednotlivých bitů kódové skupiny. Pro sudou paritu by měl být výsledek součtu roven 0, pro lichou paritu by měl být roven 1. Správný výsledek však bohužel získáme i v případě, kdy dojde v komunikačním kanálu ke dvěma chybám, obecně k sudému počtu chyb.

2.3.4 Konvoluční kódy

U konvolučních kódů se vkládá do signálu přídatná redundance tím, že se nad původním a zpožděným bitovým tokem provádějí podle známých pravidel jisté matematické operace. Důsledkem je zvýšení přenosové rychlosti signálu, aniž by byly k původnímu signálu přidány nějaké kontrolní bity. Konvoluční kódy je proto možné považovat za konvoluci impulzní odezvy kodérů a vstupního signálu, což se promítlo i do jejich názvu. Konvoluční kodéry se označují symbolem $K(n, m)$, kde n je rámeček výstupních bitů a m je rámeček vstupních bitů, přičemž platí $m < n$. Poměr rámeček vstupních bitů m a rámeček výstupních bitů n udává kódový poměr R (kódovací rychlost), který obvykle bývá $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$ nebo $7/8$.

2.3.5 Turbo kódy

Pro svoji efektivitu se využívají v nových systémech mobilních komunikací. Jsou vytvářeny jako paralelně zřetěžené konvoluční kódy. Kodér se skládá ze dvou konvolučních kodérů.

2.3.6 Blokové kódy

Vstupní blokový kód se rozděluje do m – bitových kódů a ke každému bloku je přidán (obvykle na konec bloku) podle jistých pravidel určitý počet paritních bitů reprezentujících přidavnou redundanci. Do této skupiny patří:

Fireho kódy informační bity se doplňují určitým počtem paritních bitů, získaných aplikací pravidel exklusivního součtu na bitový informační tok. Používá se v systémech pagingu a pro zabezpečení signalizace v systému GSM.

Hammingovy kódy mohou být binární i nebinární. Často používaný je binární Hammingův kód. Používá se například pro zabezpečení signálu teletextu.

Cyklické kódy umožňují zabezpečit signál proti shlukům chyb, jejichž délka je menší nebo rovna počtu paritních bitů. Využití v GSM.

BCH kódy cyklické kódy, binární i nebinární. Vhodné použití v širokém rozsahu přenosových rychlostí signálu v značném rozsahu kódových poměrů. Jsou vhodné pro korekci skupinových chyb. Používají se v buňkových paketových systémech, u druhé generace DVB a nových standardech bezdrátových technologií IEEE 802.11.

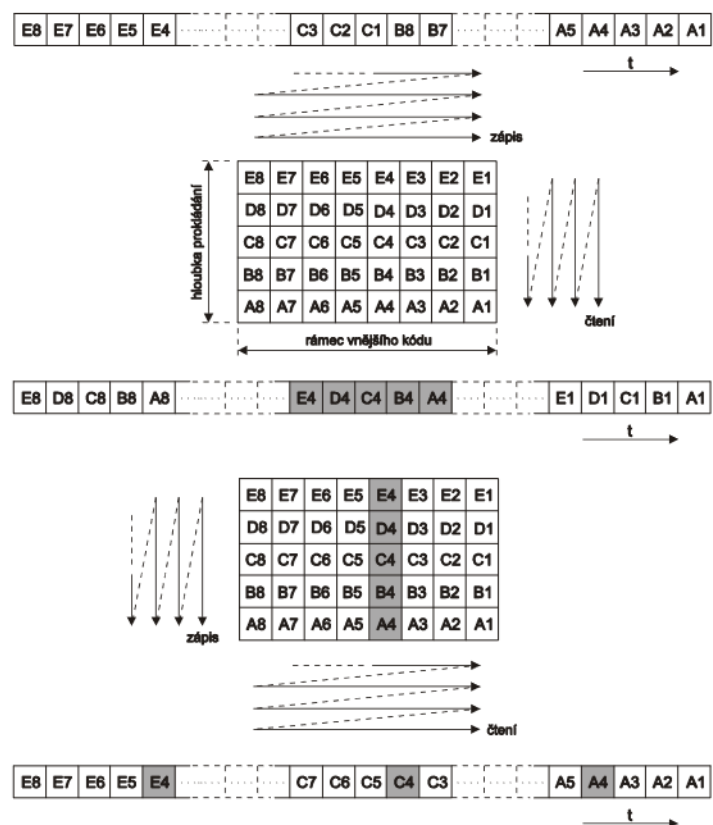
LDPC kódy – binárně lineární blokový kód. Je jedním z nejlepších FEC kódu a využívá se v mnoha moderních telekomunikačních systémech (např. druhá generace DVB, technologie IEEE 802.11 ad/ay) a to i přes vysoké nároky na Hw realizaci dekodéru. LDPC kódy nejsou chráněny patentem.

2.4 Prokládání

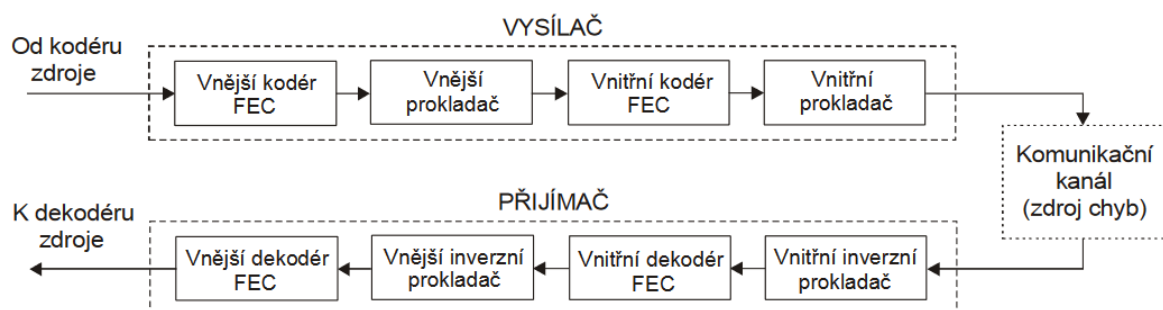
Prokládání je ochrana proti skupinovým chybám (shluky chyb, bursty), tvořící doplněk kanálového kódování. Dělí se na část vysílací (Tx) a přijímací (Rx). Na straně **Tx** jsou symboly ukládány do paměťové matice blokového prokladače řádek za řádkem. Matice je vyčítána z paměti sloupec za sloupcem. Na straně **Rx** je použit inverzní postup. Přijatý signál je do paměti ukládán po sloupcích a vyčítán po řádcích.

Důležité parametry jsou: **Hloubka prokládání** – maximální délka burstové chyby, při které se chyba rozloží na jednotlivé bajty. **Rámec vnějšího kódu** – udává počet bajtů po kterých se budou opakovat rozprostřené chybné bajty.

Prokládání lze použít na úrovni symbolů (bajtů) nebo skupin bitů (GSM). K prokládání se využívá blokový prokladač, případně také konvoluční prokladač, diagonální prokladač nebo interblokový prokladač. **Řetězového kódování** – při řetězovém kódování se použije více protichybových zabezpečovacích kódů, mezi ně se vkládá prokladač.



Obrázek 4: Princip blokového prokládání

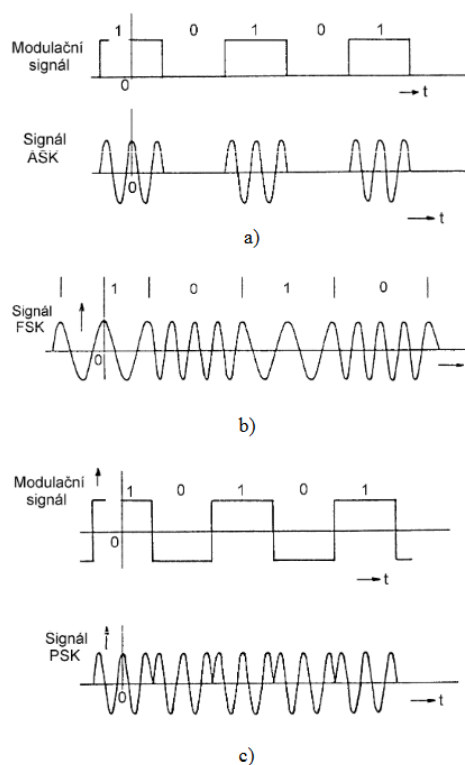


Obrázek 5: Příklad použití řetězového kódování

2.5 Digitální modulace

modulace je proces, při kterém dochází k ovlivňování některého parametru nosné v závislosti na okamžité hodnotě modulačního signálu. U radiokomunikačních systémů je nosná tvořena harmonickým signálem, který má tři parametry: **amplitudu, kmitočet a počáteční fázi**. U digitálních radiokomunikačních systémů je modulačním signálem digitální signál, který může nabývat pouze dvou diskrétních hodnot (log. 0, log. 1) – dle okamžité hodnoty digitálního modulačního signálu se při modulaci ovlivňuje, rozeznáváme tři základní typy modulací:

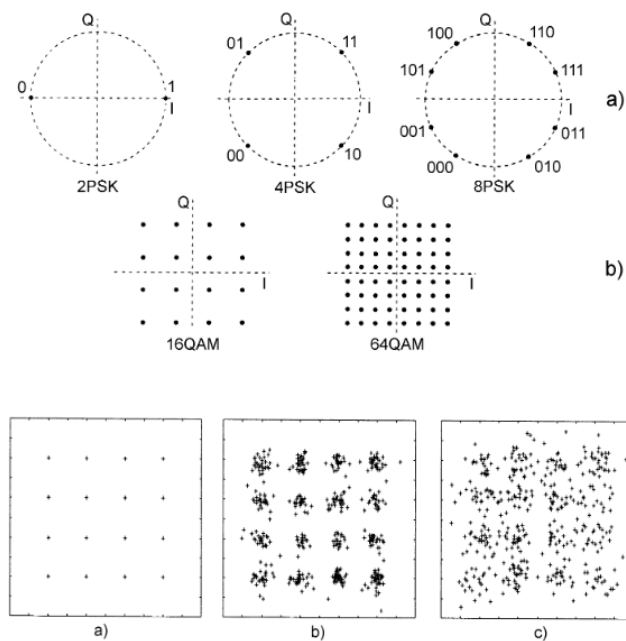
- **ASK** – (Amplitude Shift keying) klíčování amplitudy (v oblasti mobilů se nepoužívá).
- **PSK** – (Phase Shift Keying) klíčování fáze.
- **FSK** – (Frequency Shift Keying) – klíčování kmitočtu.



Obrázek 6: Časové průběhy základních dvoustavových modulací

2.5.1 Konstelační diagramy

Znázorňují modulační stavy v komplexní rovině. Využití konstelačního diagramu je vhodné pro diskrétní kvadraturní modulace – viz obrázek.



Obrázek 7: Konstelační diagramy

2.5.2 Základní parametry digitálních modulací

Přenosová rychlost (bitová rychlost) f_b .. doba trvání jednoho bitu je $T_b = 1/f_b$. Doba trvání jednoho stavu nosné (symbol) je dána vztahem $T_s = n \cdot T_b$.

Symbolová rychlost f_s :

$$f_s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{nT_b} = \frac{f_b}{n} = \frac{f_b}{\log_2 M} \quad [baud] \quad (10)$$

Bitová rychlost – BER (Bit Error Rate, **symbolová chybovost – SER** (Symbol Error Rate)). Obě chybovosti závisí na odstupu úrovně nosné od šumu (**C/N** – Carrier-to-Noise) – vztaženému ke vstupu demodulátoru přijímače – a velikosti vzorku měřeného signálu.

Vektorová chyba EVM (Error Vector Magnitude) – vyjadřuje se v jednotkách % a platí, že menší hodnota EVM znamená menší úroveň šumu v konstelačním diagramu.

Modulační chyba MER (Modulation Error Ratio) – vyjadřuje se v **dB** a platí, že menší hodnota MER znamená vysokou úroveň šumu v konstelačním diagramu.

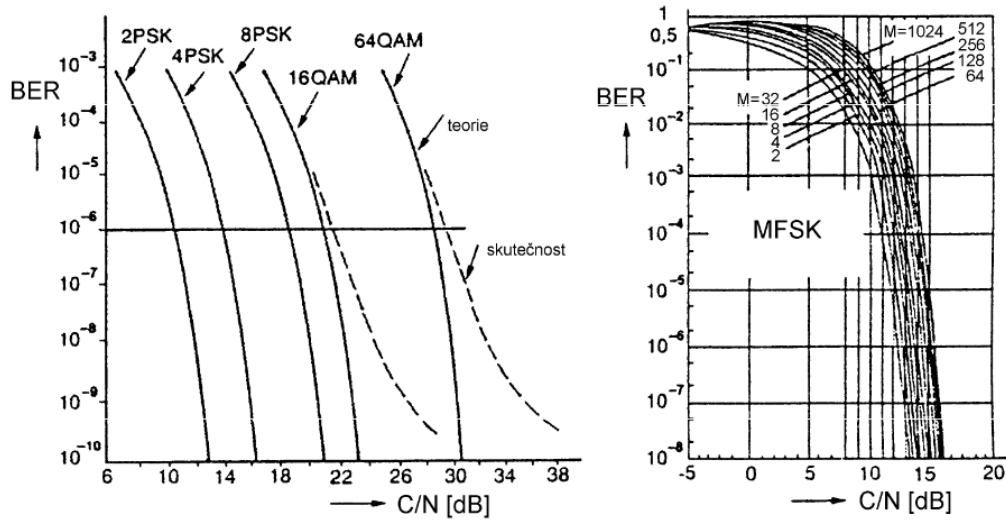
Energetická účinnost (Energetic Efficiency) – definována jako poměr střední energie modulovaného signálu na 1 bit (E_b) ku spektrální výkonové hustotě šumu (N_0) při určité specifikované chybovosti BER (např. pro referenční hodnotu $BER = 10^{-5}$):

$$\nu_u = \frac{E_b}{n_0} \quad [-] \quad (11)$$

$$\nu_{edB} = 10 \log \frac{E_b}{N_0} \quad [-] \quad (12)$$

Spektrální činnost (Spectral Efficiency) – definována jako poměr přenosové rychlosti signálu (f_b) a šířky pásma radiového kanálu ($B_v f$):

$$\nu_s = \frac{f_b}{B_v f} \quad [-] \quad (13)$$



Obrázek 8: Závislost chybovosti BER na poměru C/N

3 Systémy s mnohonásobným přístupem a metody multiplexování, výhody a nevýhody jednotlivých přístupů.

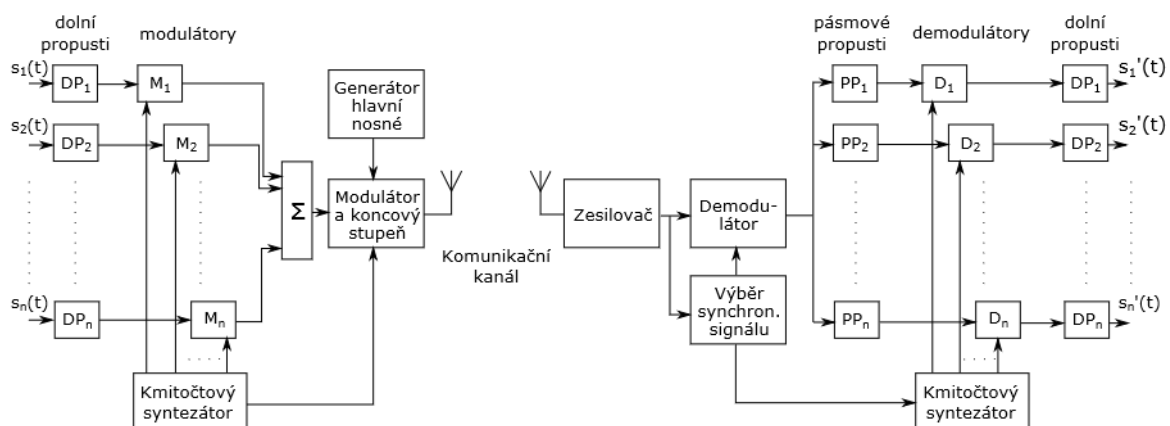
Radiokomunikační systémy, určené pro přenos informace a vzájemnou komunikaci, využívá velký počet účastníků. Pohodlný, bezproblémový a rychlý přístup účastníka ke službám systému je stanoven souborem pravidel a vzájemných dohod, označovaných jako protokol (metoda) mnohonásobného přístupu MAP (Multiple Access Protocol). V současné době existují čtyři metody:

- FDMA (Frequency Division Multiple Access) – mnohonásobný přístup s kmitočtovým dělením.
- TDMA (Time Division Multiple Access) – mnohonásobný přístup s kódovým dělením.
- CDMA (Code Division Multiple Access) – mnohonásobný přístup s kódovým dělením.
- Stochastický neboli náhodný přístup (ALOHA).

3.1 Přístup FDMA

Nejstarší používaná metoda v analogových systémech. Každý účastník má vymezené kmitočtové pásmo, které už jiný účastník nemůže využít. Metoda je jednoduchá, nevyžaduje žádnou synchronizaci. Nevýhodou je malé využití přenosové kapacity kanálu. Různí účastníci mohou využívat systém současně, ale každému je přiřazen jiný radiový kanál.

3.1.1 Kmitočtový multiplex FDM



Obrázek 9: Kmitočtový multiplex FDM

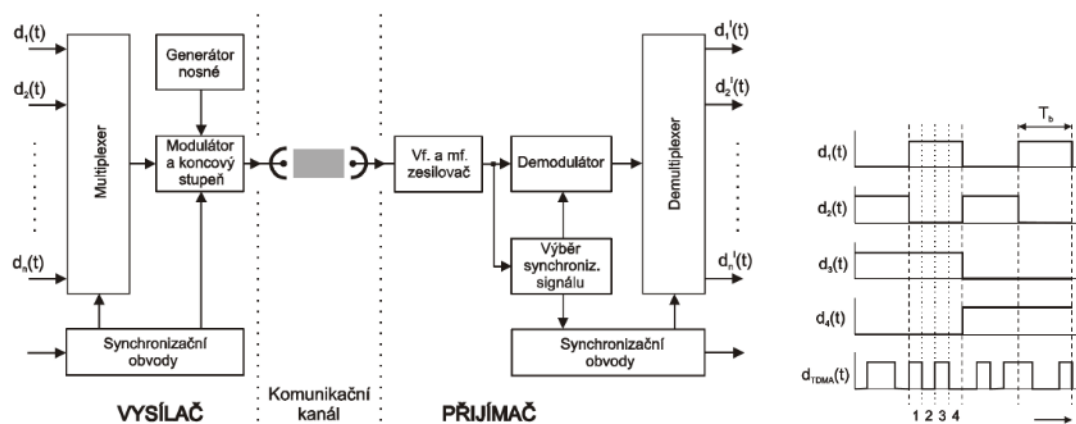
Vstupní signály jsou nejprve filtrovány, aby se omezilo jejich kmitočtové spektrum. Následně jsou modulovány na pomocné nosné (subnosné), které jsou generovány v kmitočtovém syntezátoru tak, aby se jednotlivé rádiové kanály kmitočtově nepřekrývaly a vzájemně nerušily. Každý modulační signál má svoji samostatnou nosnou, proto se systémy označují SCPC (Single Channel Per Carrier). Vytvořený signál se může přenést komunikačním kanálem nebo ještě modulovat na hlavní nosnou. Takový systém se označuje MCPC (Multi Channel Per Carrier).

Na přijímací straně je signál zesílen a ve směšovači transponován do mezifrekvenčního pásma. V případě MCPC hned demodulován. Rozdělení jednotlivých informačních kanálů se provádí pomocí pásmových filtrů laděných na příslušné kmitočty. Druhá demodulace probíhá v synchronních demodulátorech. Potřebné pomocné nosné se generují opět v kmitočtovém syntezátoru, který je synchronizován přenášeným synchronizačním signálem se syntezátorem na vysílací straně. Jako poslední krok je průběh signálu skrze dolní propusti na jejichž výstupech dostáváme n výtupních signálů.

3.2 Přístup TDMA

Účastníkovi je předělen pouze krátký časový úsek (time slot), který je součástí tzv. TDM rámce, který se cyklicky opakuje. Přenos není prováděn v čase spojitě, ale ve stejných dlouhých, pravidelně se opakujících časových úsecích. Na vysílací straně musí být signál časově komprimován a na přijímací straně musí být zpětnou expanzí upraven do původního stavu. Přístup TDM vyžaduje složitější časovou synchronizaci. Různí účastníci využívají tedy stejný rádiový kanál systému, avšak každý v jiném časovém úseku.

3.2.1 Časový multiplex TDM



Obrázek 10: Kmitočtový multiplex TDM

Systémy s časovým multiplexem TDM se převážně používají pro přenos digitálních signálů, lze je však využít i pro přenos analogových signálů. Při přenosu analogových signálů se však musí tyto signály nejprve převést na diskrétní vzorky některou diskrétní modulací (PAM, PCM, aj.) a teprve potom se časově proloží a společně přenášejí komunikačním kanálem.

Vstupní digitální signály přichází do multiplexoru, který je řízen synchronizačním signálem, jehož kmitočet je odvozen z kmitočtu vstupních signálů. Obdobným způsobem pracuje multiplexor v případě, kdy prokládáme časově celé skupiny bitů (bursty), mezi nimiž bývá navíc i malý ochranný interval. Výstupní signál z multiplexoru je přiveden na vhodný digitální modulátor a modulován na nosnou. V koncovém kroku je signál zesílen a vyslán pro přenos.

Na přijímací straně je signál zesílen a transpozici do mezifrekvenční oblasti demodulován. Pro koherentní demodulaci je nezbytné obnovit nosnou, pomocí které je obvykle možné vytvořit synchronizační signál pro demultiplexor. Na jeho výstupu dostáváme původní digitální signály.

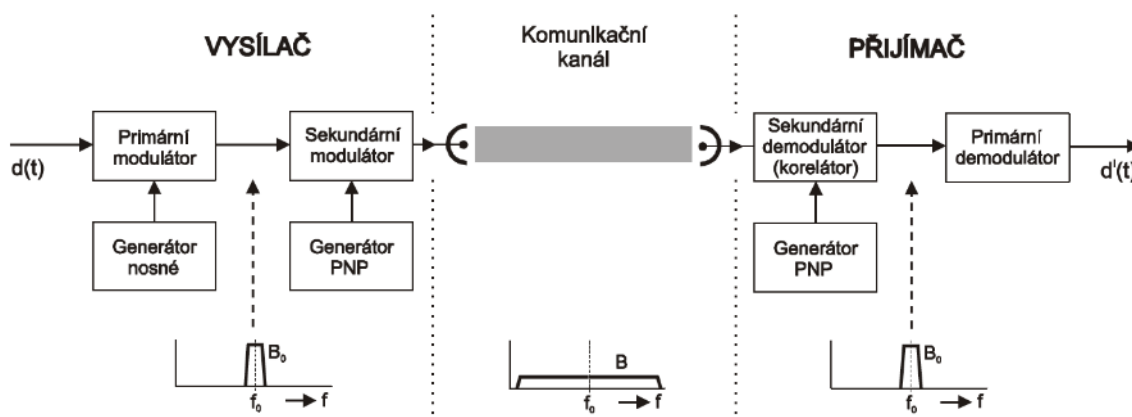
Časový multiplex PCM–TDMA se původně používal především pro přenos digitálních telefonních hovorových signálů. Časové sdružování neboli multiplexování se může provádět až na čtyřech úrovních, lišících se bitovou rychlostí. Podle doporučení CCIR pro Evropu je multiplex první úrovně vytvořen sdružením 32 kanálů, z nichž 30 přenáší informační signály a zbývající dva jsou využity pro signalizaci a rámcovou synchronizaci. U tel. signálů je vzorkovací kmitočet 8 kHz a každý prvek je vyjádřen osmibitovým slovem. Pro přenos 32 kanálů je přenosová rychlost první úrovně 2,038 Mbit/s. Sdružením čtyř takových systémů vznikne multiplexní systém druhé úrovně o rychlosti 8,448 Mbit/s. Podobně vznikne třetí úroveň s rychlostí 34,368 Mbit/s a čtvrtá úroveň s rychlostí 139,264 Mbit/s.

3.3 Přístup CDMA

Jednotliví účastníci jsou rozlišeni individuálním pseudonáhodným kódem, který se ve vysílači používá k rozprostření vysílaného signálu do širokopásmové podoby. Používané kmitočtové pásmo mohou sdílet nejen ostatní účastníci systému, ale i jiné systémy pracující na odlišných principech, a to ve stejném časovém intervalu. Na vstupu přijímače je proto kromě požadovaného signálu i řada signálů jiných. S použitím pseudonáhodného kódu, jaký byl použit ve vysílači, se však ze směsi signálů oddělí signál požadovaný. Přístup CDMA vyžaduje složitou synchronizaci a počet účastníků v kanálu je limitován úrovní interferenčních produktů v místě příjmu. Různí účastníci využívají tedy stejný radiový kanál systému, komunikují současně, avšak jsou rozlišeni individuálními kódy.

Náhodný přístup do systému nezaručuje účastníkovi okamžitý vstup do systému, neboť jeho požadavek může kolidovat s požadavkem jiného účastníka nebo může být systém již obsazen jinými účastníky. Tyto kolise řeší protokol na základě "náhodných zákonitostí". Jsou možné dva základní způsoby řešení. Protokoly s opakovaným náhodným přístupem umožňují všem účastníkům pokusit se opět náhodně vstoupit do systému, což může mít za následek selhání všech následujících pokusů. Vstup do systému je náhodným jevem. U protokolů s náhodným přístupem rezervací je prvotní vstup do systému opět náhodným jevem, avšak je-li pokus úspěšným, následující přenos již bude řízen systémem (rezervuje kanál přesně v stanovené době) a nemůže tedy dojít ke kolizím.

3.3.1 Kódový multiplex CDM



Obrázek 11: Kmitočový multiplex TDM

Digitální modulační signál nesoucí informaci se v primárním modulátoru moduluje na nosnou, např. modulací FSK, PSK aj. Tím se vytvoří signál s určitou šířkou pásma, závislou na druhu modulace, která je řádově shodná s šířkou pásma modulačního signálu. V následujícím sekundárním modulátoru, dochází k další modulaci signálu a to pomocným binárním signálem, generovaným v generátoru **pseudonáhodné posloupnosti PNP**. Bitová rychlost PNP, označována názvem **čipová rychlost** (chip rate), je úmyslně volena o několik řádů vyšší než bitová rychlost signálu modulačního. Proto i šířka pásma výsledného signálu je mnohem větší (až o několik řádů) než šířka pásma původního signálu.

Na přijímací straně se přivádí signál do sekundárního demodulátoru, na jehož druhý vstup se přivádí binární signál z generátoru pseudonáhodné posloupnosti PNP, který pracuje podle stejného algoritmu a v přesném časovém synchronismu s generátorem na vysílací straně. Na výstupu demodulátoru má signál již úzkopásmový charakter a v primárním demodulátoru se běžným způsobem demoduluje.

PBP je binární signál o délce např. 10^7 až 10^8 taktů (čipů). Její generace musí být dlouhá, aby v krátkém časovém intervalu nedošlo k synchronizaci nežádoucího přijímače, a její generace musí být jednoduchá. PNP generátory jsou obecně posuvné registry s lineární nebo nelineární zpětnou vazbou a pamětí. Podle způsobu rozšíření spektra u systémů s kódovým multiplexem rozlišujeme systémy: **s přímou modulací kódovou posloupností DS (direct sequence)** a **s kmitočtovým skákáním nosné FH (frequency hopping)**, kde se kmitočet nosné mění skokem podle PNP.

Uvedené přístupové techniky se v dnešní době velice často používají ve vzájemných kombinacích a vytvářejí se tak kombinované systémy. U systému FDMA–TDMA je kmitočtové pásmo přidělené systému rozděleno technikou FDMA na jednotlivé radiové kanály, které jsou technikou TDMA rozděleny na jednotlivé účastnické kanály (použité v systému GSM). V případě systému FDMA–CDMA je přidělené kmitočtové pásmo opět rozděleno technikou FDMA na jednotlivé radiové kanály, ve kterých jsou technikou CDMA vytvořeny účastnické kanály (použité v systému UMTS).

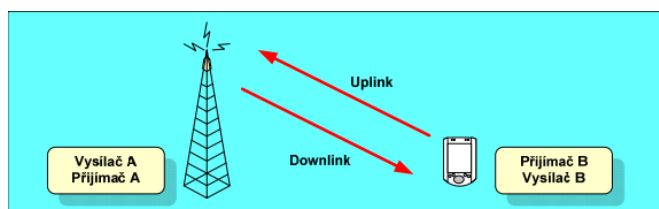
4 Způsoby přenosu (simplex, duplex) a typy spojování (komutované a paketové), diverzitní příjem, diverzitní systémy.

Podľa toho, v akom smere prebieha komunikácia medzi dvomi účastníkmi A a B, rozlišujeme nasledujúce spôsoby prenosu:

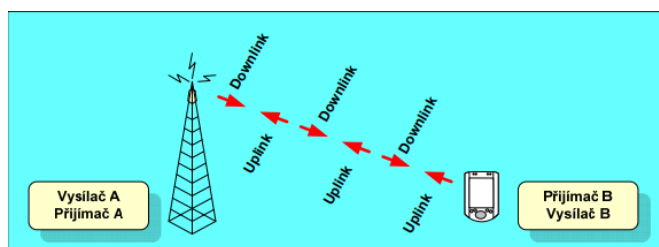
1. simplexný prenos (simplex) – komunikácia medzi účastníkmi prebieha iba v jednom smere a je pre ňu vyhradený len jeden kanál, používa sa napríklad pri distribúcii informácií pri klasickom rozhlasovom a televíznom vysielaní
2. poloduplexný prenos (poloduplex) – jeden kanál je využitý pre komunikáciu oboma smermi, ktoré je však nutné prepínať, využíva sa napríklad v taxislužbách
3. plnoduplexný prenos (duplex) – komunikácia prebieha súčasne oboma smermi, každý smer má vyhradený jeden kanál, používa sa v radiotelefónnych systémoch

Podľa toho, akým spôsobom je riešené oddelenie smeru prenosu rozdeľujeme duplexný prenos na:

1. Kmitočtový duplex FDD – každý smer prenosu má pridelený iný rádiový kanál, obvykle sú rádiové kanály pre každý smer prenosu v inom kmitočtovom pásme a nazývajú sa duplexný pár. Účastnícke stanice obsahujú prijímač a vysielač a majú spoločnú anténu, ktorá je k výstupu pripojená pomocou filtra, nazývaný aj duplexer, ktorého úlohou je oddeliť jednotlivé smery prenosu.
2. Časový duplex TDD – jeden kanál je využitý pre komunikáciu oboma smermi, ktoré je však nutné prepínať, využíva sa napríklad v taxislužbách



Obrázek 12: Kmitočtový duplex FDD



Obrázek 13: Kmitočtový duplex TDD

Pre spojovanie dvoch a viac účastníkov sa používajú dva základne spôsoby:

1. Komutované spojenie – spojovanie s prepojovaním okruhov. Po vytvorení spojenia medzi dvomi účastníkmi je po celú dobu spojenia využívaný jeden prenosový kanál. Výhodou je určitá požadovaná kvalita spojenia, nevýhodou je však nižšia efektivita využitia prenosovej kapacity siete, keďže prenosový kanál je obsadený aj keď účastníci nekomunikujú. Prenosová rýchlosť je daná najpomalším článkom reťazca. V prípade využitia tohto spôsobu pri prenose digitálnych signálov sa používa synchronný prenosový mód, kde je prenosová rýchlosť konštantná.
2. Paketové spojovanie – tok dát je rozdelený na menšie časti, tzv. pakety, ktoré sú opatrené záhlavím s adresou odosielateľa a adresáta, prioritou a ďalšími dôležitými údajmi. V dátovej sieti sa pakety šíria od odosielateľa k adresátovi cez prepojovacie uzly.

Únik (fading): kolísanie úrovne signálu v mieste príjmu (spôsobené terénnymi prekážkami, postupnými zmenami ionosféry, mnohocestným šírením signálu – dôjde v každom bode terénu k vektorovému sčítaniu priamych a odrazených vln: vytvárajú sa lokálne maximá a minimá signálu).

Diverzitný (výberový) príjem: slúži na obmedzenie, prípadne potlačenie uvedených javov. Podstata diverzitého príjmu je vytvorenie niekoľkých nezávislých prenosových kanálov medzi vysielačom a prijímačom, v ktorých je prenášaný rovnaký informačný signál. (Pozn.: dôležitou podmienkou je minimálna vzájomná korelácia únikov v jednotlivých kanáloch — tj, aby úniky mali odlišný charakter.)

Makroskopické diverzitné systémy: používajú sa na obmedzenie vplyvu pomalých únikov, spôsobených zatienením MS relatívne veľkým objektom alebo prekážkou (realizácia MS si vyberie BTS, ktorá bude mať najlepšie spojenie)

Mikroskopické diverzitné systémy: používajú sa na obmedzenie rýchlych (Rayleighových) únikov, spôsobených mnohocestným šírením signálu i pohybom mobilnej stanice - kmitočtové skákanie nosnej (Frequency Hopping)

Spôsoby vytvárania nezávislých rádiových signálov:

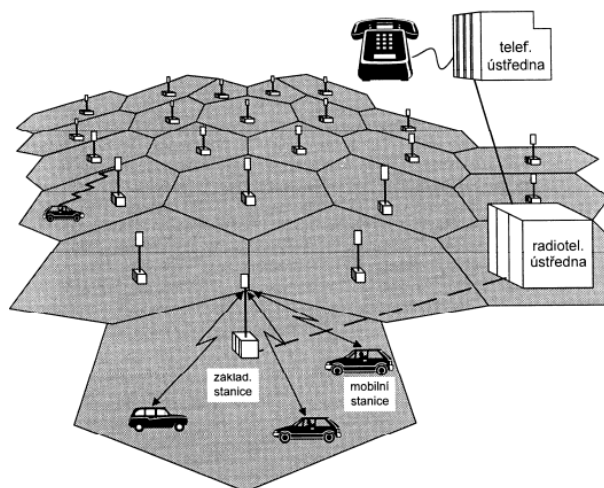
- diverzitný systém s priestorovým výberom – na prijímacej strane je určitý počet samostatných antén, vzájomne vzdialených o niekoľko vlnových dĺžok
- diverzitný systém s polarizačným výberom – vyžaduje úpravu vysielača — dve rôzne antény s horizontálnou a vertikálnou polarizáciou
- diverzitný systém s uhlovým výberom – používajú sa smerové antény, ktoré sú nastavené do rôznych smerov
- diverzitný systém s kmitočtovým výberom – odstup jednotlivých kmitočtov by mal byť 2-4 % kmitočtu nosnej vlny. Tieto systémy môžu používať jednu vysielačiu a jednu prijímaciu anténu, avšak počet vysielačov a prijímačov je daný počtom použitých kmitočtov
- diverzitné systémy s časovým výberom – prakticky systémy s TDM - systémy s časovým multiplexom, kde je vo všetkých účastníckych kanáloch prenášaný rovnaký signál, nevýhodou je dlhá doba prenosu

5 Struktúra obecné buňkovej siete a jej hlavné výhody, procedura "handover" a jej rôzne typy.

Požadované územie je rozdelené na veľký počet malých území, buniek. Uprostred každej bunky je základňová stanica BTS (Base Transceiver Station), ktorá zaisťuje spojenie mobilných účastníkov v danej bunke so systémom. Typy buniek:

- pikobunka – polomer do 50 m, pre miesta s vysokou koncentráciou užívateľov
- mikrobunka – polomer do 1 km, využívajú sa v oblastiach s vyššou prevádzkou
- makrobunky – polomer > 1 km, pre oblasti s malou hustotou prevádzky,
- bunky dáždnikového typu (umbrella cells) — vykrývajú nepokryté časti územia medzi menšími pikobunkami alebo mikrobunkami

Zväzok buniek riadi základňová riadiaca jednotka BSC (Base Station Controller). Jednotlivé BSC sú koordinovane riadené z jedného alebo niekoľkých málo centier, rádiových ústrední MSC (Mobile Switching Centre), ktoré zaisťujú spojenie s inými rádiokomunikačnými sieťami.



Obrázek 14: Štruktúra obcej bunkovej siete

Handover – zaisťuje prepínanie spojenia medzi jednotlivými BTS a MS. Podľa priebehu prepínacieho procesu rozlišujeme tvrdý, seamless a mäkký handover.

Tvrдый handover – systém najprv odpojí mobilnú stanicu z pôvodného kanála a až potom ju pripojí na kanál nový, pričom dochádza ku krátkemu prerušeniu spoja, čo pri prenose digitálnych informácií zo sebou prináša aj stratu informácií.

Seamless handover – najprv sa vytvorí spojenie na novom kanály, takže po určitú krátku dobu existuje paralelné spojenie na dvoch kanáloch, a až potom je pôvodný kanál odpojený.

Mäkký handover – mobilná stanica je spojená na všetky dostupné základňové stanice a spojenie sa uskutočňuje paralelne po všetkých kanáloch, čo so sebou prináša zvýšené nároky na kapacitu siete.

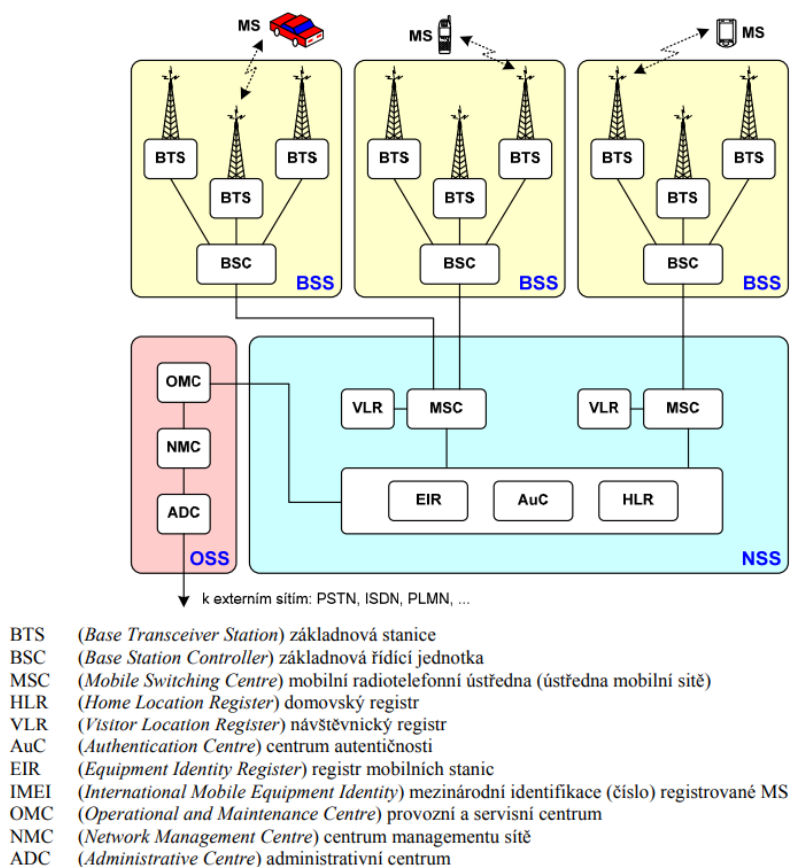
Rozdelenie handoverov podľa toho, ktorá časť systému vykonáva meranie kvality spojenia, rozhoduje o handovere a riadi ho:

- sieťou riadený handover NCHO (Network Controlled Handover) — meranie kvality spojenia, rozhodnutie o handovere a prepojení vykonáva BTS, použitie v analógových systémoch
- handover riadený mobilnou stanicou MCHO (Mobile Controlled Handover) — meranie kvality kanálov (všetkých) vykonáva MS aj BTS. Rozhodnutie o prepnutí vykonáva MS, odovzdá ich do systému a ten zaistí vykonanie prepnutia, použitie v DECT
- sieťou riadený handover s asistenciou mobilnej stanice MAHO (Mobile Assisted Handover) — MS neustále meria veľkosť signálu susedných BTS a výsledky odovzdáva základňovej stanici, ktorá je práve pripojená. Súčasne MS aj BTS vykonáva meranie kvality prebiehajúceho spojenia a podľa nameraných údajov sa systém rozhoduje o prepnutí a uskutočňuje ich

6 Základní architektura systému GSM, GPRS, HSCSD, EDGE, blokové schéma mobilní stanice systému GSM.

Systém GSM je navrhnutý tak, aby nebol autonómny a uzavretý, ale aby umožňoval prístup aj do iných sietí. Možno ho rozdeliť na tri základné subsystemy:

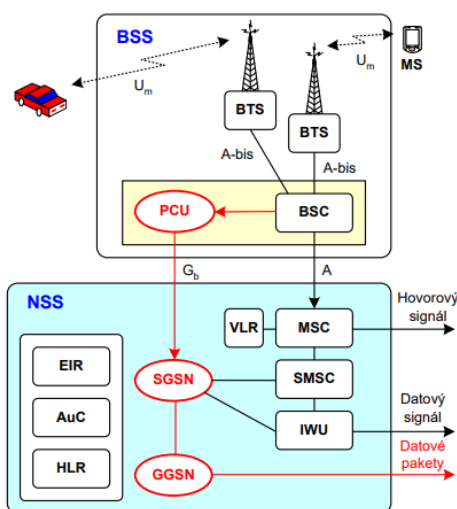
- Subsystem základných staníc BSS (Base Station Sub-System) alebo rádiový subsystem, s ktorým prostredníctvom rádiového rozhrania U_m priamo komunikujú mobilné stanice MS (Mobile Stations).
- Sieťový a spínací (prepojovací) subsystem NSS (Network and Switching Subsystem) označovaný niekedy ako rádiotelefonná ústredňa s rozšírenými úlohami a funkciami.
- Operačný subsystem OSS (Operation Support Subsystem) zaisťuje servis a koordinuje funkcie celého systému (prevádzka, údržba, opravy porúch, atď.).



Obrázek 15: Architektúra systému GSM

6.1 GPRS

Pomocou systému GPRS je súčasný systém GSM rozšírený a umožňuje prenos dátových paketov cez rádiové rozhranie s teoretickou prenosovou rýchlosťou až 171,2 kbit/s. Aplikácia technológie GPRS, založená na paketovom prenose dát pomocou protokolu IP, umožňuje mobilný prístup do siete Internet. Keďže súčasný GSM systém neumožňuje paketový prenos dát, je nutné doplnenie, ako mobilných staníc, tak aj ďalších častí systému GSM, o nové bloky. Prenosová rýchlosť sa má z počiatočnej hodnoty 28,8 kbit/s postupne zvyšovať na 56 kbit/s a ďalej na 112 kbit/s. Náhodný prístup do systému (ALOHA – Research Project of the University of Hawaii). Kolízie paketov môžu byť buď neúplné (odstránime ich synchronizáciou) alebo úplné — opakovanie pokusu o prístup.



Obrázek 16: Architektúra systému GPRS

V prípade paketového prenosu pomocou systému GPRS je spojenie naviazané medzi MS a BTS, avšak v BSC sú pakety vedené do jednotky PCU (Packet Controller Unit) - identifikácia a riadenie paketej prevádzky na rádiovom rozhraní. Cez rozhranie G_b je jednotka PCU spojená s dátovým uzlom SGSN (Serving GPRS Support Node), ktorý je schopný komunikovať s rádiovou časťou siete GPRS a druhým dátovým uzlom GGSN (Gateway GPRS Support Node) – môžu byť prepojené chrbticovou sieťou.

SGSN vykonáva šifrovanie dát a kompresiu podľa odporúčaní RFC 1144 a V.42 bis. S týmto blokom komunikuje MS (handover). Je vyhradený pre obmedzené územie (porovnateľné s územím MSC). GGSN je štandardný smerovač a jeho úlohou je komunikovať s paketovými dátovými sieťami, napr. sieťou Internet.

Pre GPRS sa mobilné stanice rozdeľujú do troch rôznych tried (kategórií):

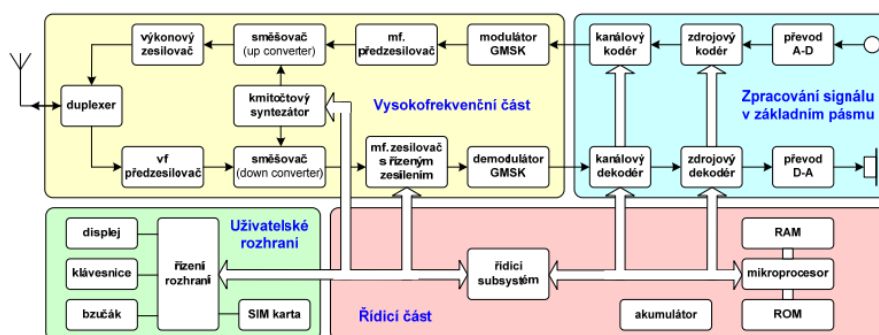
- Trieda A – Mobilná stanica môže súčasne vykonávať komutované spájanie a prenos GPRS
- Trieda B – Mobilná stanica môže sledovať (kontrolovať) komutované spájanie a GPRS služby, ale nemôže s nimi pracovať súčasne
- Trieda C – Mobilná stanica môže vykonávať buď komutované spájanie alebo GPRS prenos

6.2 HSCSD

Táto norma umožňuje komutovaný prenos dát (CSD) s vyššou prenosovou rýchlosťou ako pôvodný systém GSM (2G). Implementácia HSCSD do GSM systému je len softvérová záležitosť a nevyžaduje žiadny zásah do hardvéru štruktúry GSM. Vyššie prenosové rýchlosti sa dosahujú novou metódou kódovania, ktorá umožní zvýšenie prenosovej rýchlosti v jednom kanáli na 14,4 kbit/s. Nasledným zrušením až 4 timeslotov môže byť vytvorený kanál s bitovou rýchlosťou $14,4 \cdot 4 = 57,6$ kbit/s. Pre asymetrickú prevádzku, ktorá je typická napríklad pri komunikácii s internetom sa predpokladá rozdelenie tejto prenosovej rýchlosti tak, že 1 kanál bude vyhradený pre pripojenie v uplinku (MS-BTS) s prenosovou rýchlosťou 14,4 kbit/s, zatiaľ čo pre pripojenie v downlinku (BTS-MS) budú vyhradené 3 kanály (timesloty), ktoré umožňujú dosiahnuť prenosovú rýchlosť 43,2 kbit/s (tzv. 3 + 1 timeslot service). Štandard HSCSD (Nokia) je možné použiť na prenos video signálu, e-mail, prístup na internet a pre ďalšie služby.

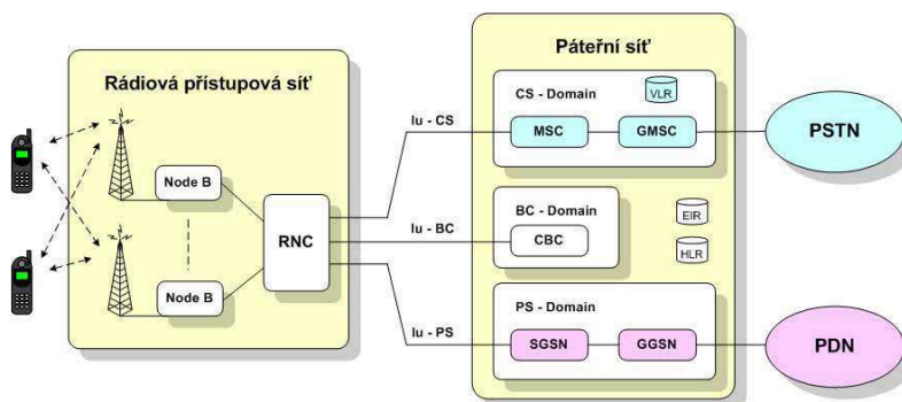
6.3 EDGE

Štandard EDGE (Ericsson) umožňuje zvýšiť prenosovú rýchlosť systému GSM pri alokovaní všetkých 8 timeslotov až na hodnotu 384 kbit/s. Podporuje paketový prenos dát a prenosová rýchlosť signálu v jednom timeslote je 48 kbit/s. Používa moduláciu 8 PSK (Eight Phase Shift Keying) - zásah do hardvérového (novšie iba do softvérového) riešenia BTS aj MS.



Obrázek 17: Blokové schéma mobilnej stanice systému GSM

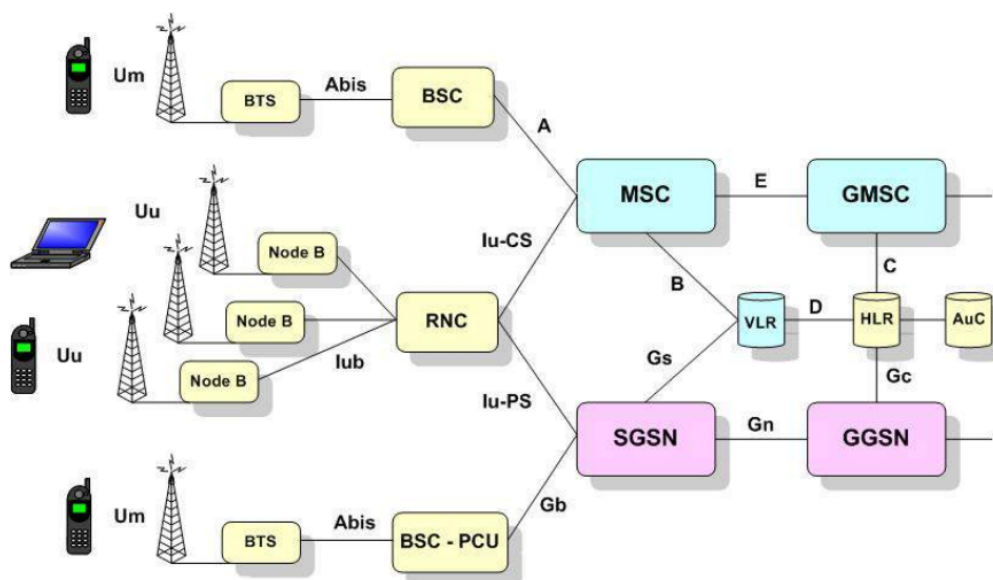
7 Systém UMTS, proces rozprostírání signálu, vlastnosti používaných kódů.



Obrázek 18: Základná architektúra systému UMTS

Základom je pevná **chrbticová sieť CN** (Core Network), ktorá riadi prevádzku a spojenie v systéme. Jej súčasťou je servisná riadiaca sieť SCN (Service Control Network) zaisťujúca riadenie, spracovanie a uchovanie dát a sieť telekomunikačného manažmentu TMN (Telecommunications Management Network). Smerom k účastníkovi nasleduje **rádiová prístupová sieť RNS** (Radio Network System), ktorá plní prenosové a prepožovacie funkcie. Využíva rádiové rozhranie UTRA, ku ktorému majú prístup všetci používatelia. Rádiovú prístupovú sieť tvoria bloky RNS (Radio Network Subsystem) obsahujúce základňové stanice v jednej alebo viacerých bunkách, ktoré sú vzájomne prepojené s **riadiacou jednotkou RNC** (Radio Network Controller). Základňová stanica sa pri systémoch 3G označuje Node B. Medzi RNS a čiastkovými subsystémami (doménami) chrbticovej siete (CS – Domain, BC – Domain, PS – Domain) sú presne definované rozhrania, umožňujúce chrbticovej sieti využívať aj iné rádiové prístupové technológie. Tieto rozhrania sa označujú **Iu-CS** (Circuit Switched), **Iu-BC** (BroadCast) a **Iu-PS** (Packet Switched). Chrbticová sieť má podobnú konfiguráciu ako systém GSM a je zložená z dvoch hlavných prevádzkových častí (subsystémov, domén) určených pre rôzne druhy prevádzky. V subsystéme s označením CS – Domain je sústredená iba komutovaná prevádzka alebo prevádzka s prepínaním okruhov (obdoba hlasovej komunikácie v systéme GSM). Naopak v subsystéme označenom PS – Domain je sústredená iba paketová prevádzka alebo prevádzka s prepínaním paketov (obdoba dátovej komunikácie v systéme GPRS). Obe domény využívajú spoločne ostatné časti systému (HLR, EIR, ai), ktoré sú dôležité pre identifikáciu užívateľa, roaming mobilnej stanice MS (Mobile Station) – všeobecne užívateľského zariadenia UE (User Equipment), a ďalšie služby. **Doména CS** zaisťuje nastavenie všetkých častí chrbticovej siete pre komutovaný prenos vrátane potrebnej signalizácie. Obsahuje MSC, GMSC, VLR a vykonáva aj všetky potrebné funkcie smerom k sieťam PSTN (Public Switched Telephone Network), resp. ISDN (Integrated Services Digital Network). Podobne **doména PS** vykonáva nastavenie všetkých potrebných častí CN pre paketový prenos. Obsahuje SGSN, GGSN a zaisťuje všetky potrebné funkcie smerom k paketovým sieťam PDN (Packet Data Network), napr. k sieti Internet. Okrem uvedených hlavných domén je súčasťou CN aj **doména BC** (BroadCast) obsahujúca centrum pre koordináciu vysielania v jednotlivých bunkách CNC (Cell Broadcast Center).

Pri zavádzaní systému UMTS bolo treba rešpektovať už používaný a veľmi rozšírený systém GSM aj s jeho implementovanými štandardmi GPRS a EDGE. Táto koexistencia „starého“ systému GSM a „nového“ systému UMTS je znázornená modelom nakresleným na obr. 11. Pre lepšiu prehľadnosť obrázku tu nie je nakreslené rozhranie Iu-BC. Všetky rozhrania chrbticovej siete (B, C, D, ... a Gc, Gn ...) sú rovnaké ako rozhranie chrbticovej siete GSM/GPRS.

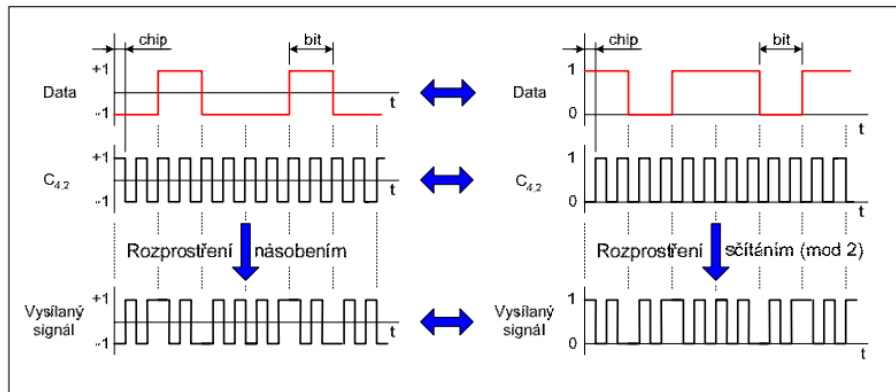


Obrázek 19: Model koexistencie systémov UMTS a GSM

Základné a najdôležitejšie operácie používané pri spracovaní signálov v systéme UMTS sú **kódovanie kanálov** (Channelization) a **skramblovanie** (Scrambling). Pri oboch operáciách sa používajú špeciálne kódy a väčšinou pri nich dochádza k rozprestretiu spektra signálu, čo závisí od vzájomného vzťahu bitovej rýchlosti dátového signálu a chipovej rýchlosti rozprestieracieho kódu. Pri výbere vhodnej skupiny kódov sú dôležité predovšetkým ich korelačné vlastnosti. Pre vzájomné rozlíšenie jednotlivých kódov je potrebné, aby ich vzájomná korelačná funkcia bola čo najmenšia, v ideálnom prípade nulová. Naopak auto-korelačná funkcia by mala mať impulzný priebeh. Obe uvedené vlastnosti však nemožno splniť súčasne.

Na kódovanie kanálov sa preto používajú **ortogonálne rozprestieracie kódy** nazývané Walshove kódy alebo Walshove sekvencie, zatiaľ čo pri skramblovaní sa používajú **pseudonáhodné kódy PN** (Pseudo-Noise codes, Pseudorandom codes) alebo pseudonáhodné sekvencie.

• Příklad použití ortogonálních kódů, SF = 4



• Rozlišovat funkce (-1,1 – násobení) a sekvence (0,1 – exklusivní součet)

+1 \longleftrightarrow log 0
-1 \longleftrightarrow log 1

Obrázek 20: Proces rozprestierania signálu

Pri procese kódovania kanálov (Channelization) sa vstupný dátový signál násobí rozprestieracím kódom a dochádza k jeho rozprestieraniu. Po rozprestretí signálu je každý bit dátového signálu reprezentovaný určitým počtom čipov. Pomer čipovej rýchlosti rozprestieracieho kódu a bitovej rýchlosti dátového signálu je rovný činiteľovi rozprestierania SF alebo zisku rozprestierania. Výstupný rozprestretý signál má rovnakú čipovú rýchlosť ako rozprestierací kód. Pri systéme UMTS je čipová rýchlosť Walshových rozprestieracích kódov 3,84 Mchip/s, a preto výstupný signál bude mať po rozprestretí aj čipovú rýchlosť 3,84 Mchip/s. Pretože vstupný dátový signál (pred rozprestretím) môže mať premennú bitovú rýchlosť, môže sa meniť aj SF v rozsahu od 4 (najnižšia SF) až do 512 (najvyššia SF). Čím nižšia SF, tým je dosiahnutá vyššia užívateľská prenosová rýchlosť signálu.

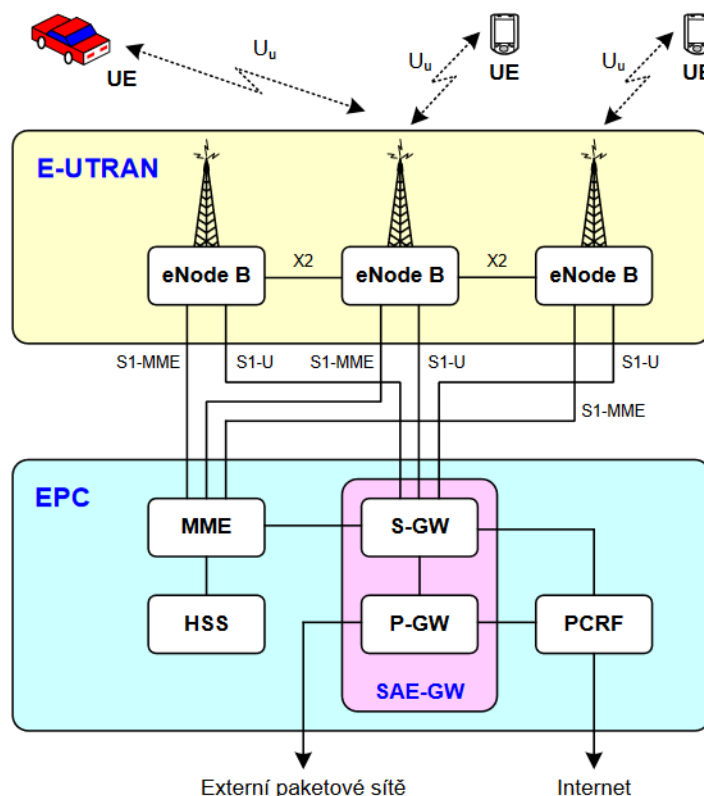
Kódy používané v systémoch CDMA a teda aj v systéme UMTS musia mať dve základné vlastnosti. Pre minimalizáciu interferencií na rádiovom rozhraní musia mať kódy jednotlivých užívateľov nízku vzájomnú koreláciu (najlepšie nulovú). Naopak pre zaistenie dobrej synchronizácie, musí mať kódy dobré autokorelačné vlastnosti (autokorelačná funkcia musí mať impulzný charakter). Vzájomne korelačné funkcie a autokorelačné funkcie uvedených kódov však neumožňujú dosiahnutie nízkej vzájomnej korelácie a súčasne aj dobrej autokorelácie. Kódy s dobrými autokorelačnými vlastnosťami majú náhodný charakter, a preto sa nazývajú pseudonáhodné kódy PN (Pseudo-Noise). V porovnaní s ortogonálnymi kódmi však majú horšie vzájomne korelačné vlastnosti. Naopak ortogonálne kódy (Walshovy) vynikajú nulovou vzájomnou koreláciou, avšak majú nevyhovujúce autokorelačné vlastnosti.

8 Systém LTE, základní architektura a popis systému LTE, základní popis E-UTRA Downlink a Uplink, rozdíly mezi LTE a LTE-A.

Systém LTE je jedním z posledních kroků ve vývoji mobilního systému UMTS. Systém je ryze paketový, založený na protokolu IP, přesněji MIP (Mobile IP). Výhodou je malá odezva na rádiovém rozhraní (< 10 ms), spektrální účinnost (3–4x vyšší než HSPA) a především vyšší přenosová rychlost signálu, dosahující hodnot až stovky Mbit/s.

8.1 Architektura systému

Struktura se skládá ze základních částí: páteřní sítě EPC (Evolved Packet Core) a přístupové sítě E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network). Ve struktuře systému dochází k výrazné změně, a to směrem k vyšší inteligenci základnové stanice, která je označována eNode B (evolved Node B).



Obrázek 21: Architektura sítě LTE

8.2 Přístupová síť E-UTRAN

Rádiová přístupová síť E-UTRAN zajišťuje propojení mezi paketovou sítí EPC a jednotlivými UEs. Obsahuje základnové stanice **eNode B**, které zajišťují komunikaci s UEs přes rádiové rozhraní označené U_u . Propojení eNode B s EPC může být provedeno metalickými nebo optickými kabely, případně mikrovlnnými spoji. Každý eNode B plní funkci

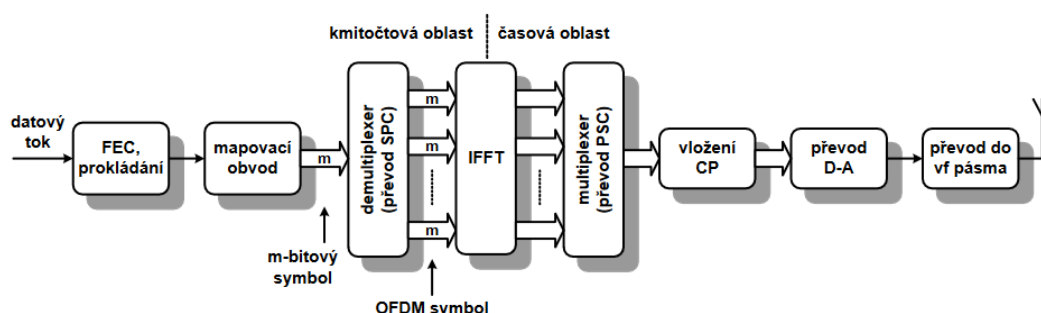
základnové stanice i řídicí jednotky rádiové sítě. Zajišťuje rádiové zdroje, pokrytí dané oblasti rádiovým signálem a přiděluje rádiové prostředky podle požadavků kvality služeb QoS. Provádí měření úrovně signálu a interferencí a na základě těchto údajů a obdobných údajů z UE rozhoduje o provedení handoveru.

Každý eNode B může obsluhovat několik UEs, přičemž jeden UE může být obsluhován pouze jedním eNode B. Terminál UE je tedy vždy propojen s jedním blokem MME (Mobility Management Entity) a servisní bránou S-GW (Serving Gateway).

8.3 Downlink E-UTRAN

Pro downlink se v systému LTE používá různé způsoby multiplexování (přístupové techniky). Využívá se OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) s konstantním rozestupem subnosných 15 kHz, který nezávisí na šířce pásma radiového kanálu. Důvodem pro použití přístupu OFDMA v downlinku je vyšší spektrální účinnost, odolnost při průchodu únikovým rádiovým kanálem, škálovatelnost pásma, jednodušší implementace MIMO, koordinace subnosných, apod. Díky trojdimenzionální struktuře (časová, kmitočtová a výkonová osa) má rádiové rozhraní E-UTRAN vysokou flexibilitu přidělování rádiových zdrojů, především v možnosti využití radiového kanálu a kmitočtové koordinaci (snížení rušení z okolních eNBs).

Datový signál, podrobený kanálovému kódování FEC a prokládání, je mapován do m -bitových symbolů podle použité digitální modulace (QPSK, 16QAM, 64QAM). V sériově paralelním převodníku SPC se vytvoří OFDM symboly, které jsou přiváděny na vstupy procesoru, realizujícího transformaci IFFT (inverse Fast Fourier Transform). Každý OFDM tvoří N vzorků (každý vzorek je vyjádřen m bity), které reprezentují uvažovaný signál v kmitočtové oblasti. Výsledkem transformace je opět N vzorků, které reprezentují uvažovaný signál v časové oblasti. Po paralelně sériovém převodu PSC je do signálu vkládán CP (Cyclic Prefix), který omezuje vliv ISI (Inter Symbol Interference) a ICI (Inter Carrier Interference). Po diagonálně analogovém převodu D-A je signál OFDM v základním pásmu (Base Band). Následuje konverze signálu do vysokofrekvenčního pásma (obvykle přes mezifrekvenční pásmo), jeho výkonové zesílení a vyzáření anténou do rádiového prostředí.



Obrázek 22: Zpracování signálu LTE v downlinku (OFDMA)

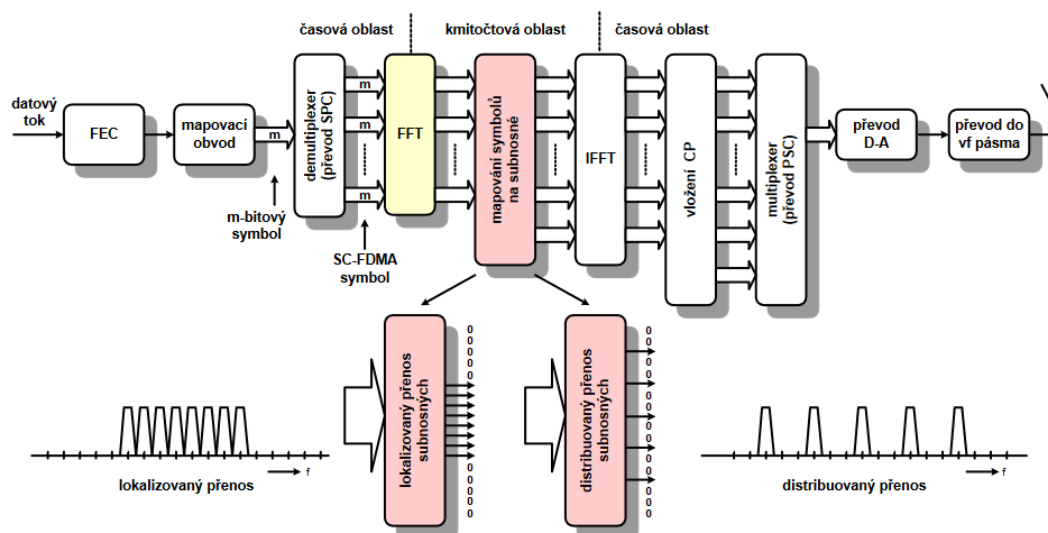
8.4 Uplink E-UTRAN

V uplinku využívá systém LTE přístupu SC-FDMA. Důvodem byl prioritní požadavek na nízký odběr UE a s tím spojené nízké provozní náklady. Při použití OFDMA by se v důsledku velkého PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) nemohly být uvedené požadavky splněny. Velká hodnota PAPR klade také zvýšené požadavky na vysokofrekvenční výkonové zesilovače, které musejí být lineární, což by navíc způsobilo komplikace při konstrukci UE. Výhodou přístupu SC-FDMA jsou tedy nízký PAPR, lepší účinnost vysokofrekvenčního výkonového zesilovače a nižší odběr UE.

8.5 Uplink E-UTRAN

V uplinku využívá systém LTE přístupu SC-FDMA. Důvodem byl prioritní požadavek na nízký odběr UE a s tím spojené nízké provozní náklady. Při použití OFDMA by se v důsledku velkého PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) nemohly být uvedené požadavky splněny. Velká hodnota PAPR klade také zvýšené požadavky na vysokofrekvenční výkonové zesilovače, které musejí být lineární, což by navíc způsobilo komplikace při konstrukci UE. Výhodou přístupu SC-FDMA jsou tedy nízký PAPR, lepší účinnost vysokofrekvenčního výkonového zesilovače a nižší odběr UE.

Při vytváření signálu se využívá modulace OFDM s rozprostíráním signálu pomocí diskrétní Fourierovy transformace DFT-S-OFDM (Discrete Fourier Transform Spread OFDM). Úprava blokového schématu modulátoru spočívá tedy v zařazení signálového procesoru (před blok IFFT), který provádí diskrétní Fourierovu transformaci DFT, nejčastěji FFT. Každý datový symbol je tak rozprostřen na všechny subnosné, a tím je zamezeno zvyšování PAPR. Hodnota PAPR se tedy blíží hodnotě při použití jedné nosné.



Obrázek 23: Zpracování signálu LTE v uplinku (SC-FDMA)

Po kanálovém kódování FEC je datový signál mapován do m -bitových symbolů podle použité digitální modulace (pro FEC je datový signál mapován do m -bitových symbolů podle použité digitální modulace (pro QPSK je $m = 2$, pro 16 QAM je $m = 4$, pro 64QAM je $m = 6$). V sériově paralelním převodníku SPC se vytvoří SC-FDMA symboly, které jsou přiváděny na vstupy procesoru, realizujícího transformaci FFT. Po transformaci je

signál rozprostřen tak, že každá subnosná přenáší informace odpovídající všem vstupním datovým symbolům. Následuje blok mapování symbolů na subnosné, který umožňuje tzv. lokalizovaný nebo distribuovaný přenos. Při lokalizovaném přenosu (soustředěný, koncentrovaný) každý uživatel vysílá v přiděleném kmitočtovém pásmu, které může být flexibilně adaptováno. Druhou možností je distribuovaný přenos (rozdělený, rozložený), kdy každý uživatel vysílá v celém kmitočtovém pásmu, avšak na subnosných, které nejsou vedle sebe. Přenos je citlivý na změnu kmitočtu. Poslední možností je kombinovaný lokalizovaný a distribuovaný přenos, kdy uživatelé mají přidělené kmitočtové pásmo různým způsobem. Po transformaci IFFT se do signálu vkládá CP. Potom je signál převeden z digitálního do analogového tvaru a zpracován obdobným způsobem jako v downlinku, tedy transponován do analogového tvaru a zpracován obdobným způsobem jako v downlinku, tedy transponován do vř. pásma, výkonově zesílen a vyzářen anténou do rádiového prostředí.

8.6 LTE a LTE-A

LTE-Advanced je standart pro čtvrtou generaci mobilních systémů (4G), který vyhovoval požadavkům IMT-Advanced. Systém LTE a LTE-A jsou plně kompatibilní. Oproti LTE má LTE-A 3x vyšší spektrální účinnost, která je v downlinku 30 bit/s/Hz, v uplinku 15 bit/s/Hz. Latence se snížila na hodnotu 5 ms.

LTE-A opět využívá techniky OFDMA a SC-FDMA při zachování flexibilní šířky pásma. Technika MIMO se v downlinku rozšiřuje na MIMO 8x8 s využitím MU-MIMO (Multi User MIMO), kde jsou paralelní datové toky přenášeny k různým UEs prostorově odděleny. V uplinku je technologie MIMO rozdělena na MIMO 4x4 s využitím SU-MIMO (Single User MIMO), kde jsou všechny paralelní toky vysílány k jednomu eNB. V systému LTE-Advanced lze docílit downlinku kolem 1 Gbit/s a uplinku 0,5 Gbit/s, při pohybu UE do 15 km/h. Maximální rychlost pohybu UE je 500 km/hod.

Pro dosažení vysokých přenosových rychlostí signálu je nezbytná dostatečná šířka kmitočtového pásma. LTE-Advanced ji zajišťuje metodou sdružování nosných, která se označuje také názvem kanálové sdružování. Sdružování probíhá na fyzické vrstvě, kde jsou jednotlivá kmitočtová pásma sloučena do jednoho výsledného pásma. Využívají se i ne-sousední pásma, avšak s omezením na vybrané kombinace. Pro Evropu byla stanovena kombinace pásem v okolí 1,8 GHz a 2,6 GHz.

Systém LTE-A využívá reléové stanice RN (Relay Node) neboli opakovače s více skoky MR (Multihop Relay). Použití těchto stanic je výhodné, protože dochází ke zvětšení pokrytí území, zvýšení kapacity sítě i zlepšení kvality spojení mezi eNB a UE.

Také využívá k rozšíření pokrytí území i femtobuňky označované také Home eNode B. Jsou to buňky s poloměrem maximálně několik desítek metrů, které mohou být umístěny i ve větší buňce. Pro spojení eNB se sítí se využívá pevné internetové přípojky, například ADSL, přes bránu HeNB GW (Home eNode B Gateway).

Femtobuňky mohou být využity pro pokrytí signálem v rodinných domech, ve venkovských oblastech nebo v místech se špatnou kvalitou signálu. Další možností je využití v hustě osídlených oblastech k dosažení vysokých přenosových rychlostí a zvýšení kapacity.

9 Systémy WLAN (základní popis standardu IEEE 802.11 a definice fyzické vrstvy) a WPAN (základní popis, systém Bluetooth a topologie sítě Bluetooth).

9.1 Systémy WLAN

9.1.1 IEEE 802.11

Wi-Fi je rodina standardu realizujících síť WLAN (Wireless Local Area Network). Původní standard IEEE 802.11 (1997) byl vypracován jako bezdrátová alternativa Ethernetu pro pásmo 2,4 GHz: Max. přenosová rychlost 2 Mbit/s, fyzická vrstva DSSS a FHSS.

IEEE 802.11a (1999) <i>WiFi5</i>	IEEE 802.11b (1999) <i>WiFi (Wireless Fidelity)</i>	IEEE 802.11g (2003)
5,15 – 5,35 GHz 5,725 – 5,825 GHz (USA, 12 kanálů, 8 se nepřekrývají)	2,4 – 2,4835 GHz (Evropa) 2,4465 – 2,4835 GHz (Francie) 2,445 – 2,475 GHz (Španělsko) (14 kanálů, 3 se nepřekrývají)	2,4 – 2,4835 GHz (14 kanálů, 3 se nepřekrývají)
CSMA/CA, TDD	CSMA/CA, TDD	CSMA/CA, TDD
B = 20 MHz	B = 20 MHz	B = 20 MHz
OFDM, BPSK (6 Mbit/s, 9 Mbit/s) OFDM, QPSK (12 Mbit/s, 18 Mbit/s) OFDM, 16QAM (24 Mbit/s, 36 Mbit/s) OFDM, 64QAM (48 Mbit/s, 54 Mbit/s)	DSSS - BPSK, QPSK, CCK 1 Mbit/s, 2 Mbit/s 5,5 Mbit/s, 11 Mbit/s	OFDM - BPSK, QPSK, 16 – 64 QAM, CCK, PBCC 1 Mbit/s - 54 Mbit/s
DFS, TPC		

- IEEE 802.11d (2001) – upravuje 802.11b pro jiné kmitočty, aby systémy mohly být nasazeny i tam, kde pásmo 2,4 GHz není dostupné (není volné)
- IEEE 802.11e – přidává podporu QoS s využitím TDMA a opravu chyb do podvrstvy MAC na podporu všech fyzických vrstev používaných v sítích 802.11 kromě ad-hoc sítě
- IEEE 802.11f – vylepšuje postup při změně radiového kanálu a při změně přístupového bodu při přechodu z jedné sítě do jiné (roaming)
- IEEE 802.11h – je možné používat v pásmu 5 GHz, které je využíváno pro komunikaci se satelity a pro síť HiperLAN. Možným interferencím je zabráněno dynamickou volbou kanálu DFS (Dynamic Frequency Selection) a řízením výškového výkonu TPC (Transmit Power Control)
- IEEE 802.11s – umožňuje, aby přístupový bod byl schopen navázat přímo bezdrátové spojení se sousedním přístupovým bodem a tím vytvořit infrastrukturu uzlové sítě, aniž by se musel každý AP připojovat do pevné sítě
- IEEE 802.11n (2009) – používá MIMO (4x4, 3x3, 2x2) a OFDM s vnitřní modulací BPSK až 64QAM, maximální přenosová rychlost 600 Mbit/s (reálně 100 Mbit/s)

- IEEE 802.11ac (2013) – pro pásma 2,4 GHz a 5 GHz opět využívá šířku pásma 80 MHz a 160 MHz, používá OFDM a kromě vnitřních modulací BPSK až 64 QAM podporuje i modulaci 256 QAM. Pro její použití je nutné dostatečné kvalitní přenosové prostředi. Rovněž využívá technologii MIMO (4x4, 3x3, 2x2), včetně MU-MIMO, nové i 8x8. Maximální přenosová rychlost je 1 Gbit/s.
- IEEE 802.11y (2008) – určený pro licencované kmitočtové pásmo 3,7 GHz, maximální přenosová rychlost 54 Mbit/s
- IEEE 802.11ad (2012) – pro pásmo 60 GHz. Maximální přenosová rychlost je 7 Gbit/s
- IEEE 802.11ax (2018) – pro pásma 2,4 GHz a 5 GHz. MIMO, OFDM. Maximální přenosová rychlost je 10 Gbit/s.

9.1.2 Fyzické vrstvy

První specifikace standardu 802.11 (1997) definovala tři fyzické vrstvy:

- FH-SS – rozprostřené spektrum s využitím kmitočtového skákání
- DS-SS – rozprostřené spektrum pomocí primární sekvence
- IR – Infracervené záření (300 – 428 THz), rychlost 1 Mbit/s a 2 Mbit/s

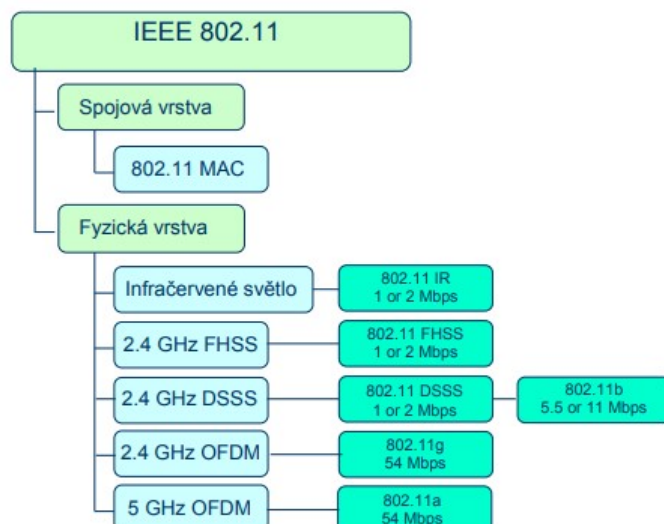
Při revizi standardu v roce 1999 a v roce 2003 byly tyto fyzické vrstvy doplněny o:

- OFDM (802.11a, 802.11g)
- HR/DS-SS – High Rate Direct Sequence Spread Spectrum (802.11b)

FH-SS – Podle pseudonahodné sekvence se mění nosná vysílaného signálu. Šířka pásma radiového kanálu je obvykle 1 MHz. Doba vysílání na jedné nosné je max. 400 ms (za 30 s se vystřídá 75 nosných). Výhodou je větší počet systému pracujících současně v pásmu 2,4 GHz (teoreticky 26, prakticky 15 přístupových bodů AP). Metoda FH-SS byla z novějších standardů vyřazena.

DS-SS – Primární rozptěření signálu pseudonahodnou sekvencí na šířku pásma 20 MHz. Původní standard 802.11 definuje fyzickou vrstvu DS-SS o rychlosti 2 Mbit/s, standard 802.11b přináší zvýšení rychlosti až do 11 Mbit/s (HR / DS-SS).

OFDM – Spektrum přenosového je rozděleno na velké množství subnosných, na kterých se informace přenáší paralelně. Používá IEEE 802.11a (5 GHz) a od roku 2003 i 802.11g (rychlost až 54 Mbit/s).



9.2 Systémy WPAN

Systémy WPAN (Wireless Personal Area Network) zahrnují technologie obecně kratšího dosahu, než WLAN. Rodina standardu IEEE 802.15:

IEEE 802.15.1 <i>Bluetooth 1.0</i>	IEEE 802.15.3	IEEE 802.15.3a <i>UWB</i>	IEEE 802.15.4 <i>ZIGBEE</i>
2,402 – 2,480 GHz	2,4 – 2,4835 GHz	3,168 – 4,752 GHz nebo 3,1 – 5,15 GHz	2,4 – 2,4835 GHz (svět) 868,3 MHz (Evropa)
GFSK	QPSK, DQPSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM	OFDM, QPSK, BPSK	OQPSK (svět) BPSK (Evropa)
FHSS, TDD		DS/FH CDMA FDMA	CSMA
B = 1 MHz	B = 15 MHz	B = 503,25 MHz (B = 2,736 GHz)	B = 5 MHz
79 rád. kanálů	4 rád. kanály		6 rád. k. (svět) 1 rád. k. (Evropa)
732,2 kbit/s	55 Mbit/s	480 Mbit/s (600 Mbit/s)	250 kbit/s (svět) 20 kbit/s (Evropa)

9.2.1 systém Bluetooth

Systém Bluetooth je určen pro bezdrátový přenos signálu na kratší vzdálenosti. Jeho typickými aplikacemi jsou bezdrátová propojení PC, PDA nebo mobilního telefonu s různými periferiemi, např. tiskárnou, klávesnicí, skenerem, myší, sluchátkem apod. Výhodami systému jsou nízký vysílaný výkon, bezpečnost a robustnost přenosu a nízká spotřeba energie.

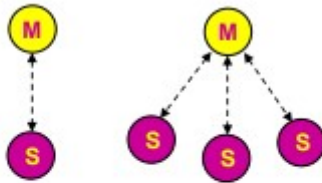
9.2.2 topologie sítě Bluetooth

Systém Bluetooth vytváří malé síťové struktury označované názvem pikonet (pikosíť) — v základní verzi max. 8 vzájemně komunikujících zařízení (Master a Slaves).

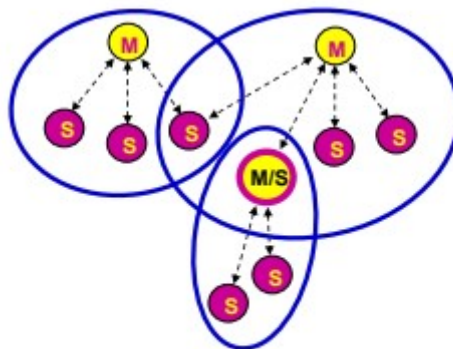
Využívá tzv. topologie "ad hoc" - komunikace bod-bod (point to point), komunikace bod-více bodů (point to multipoint).

Jednotlivé terminály jsou si rovnocenné a neexistuje mezi nimi žádná hierarchie. Avšak terminál, který první iniciuje sestavení sítě, se stává řídicí jednotkou (master) a plní řídicí funkci spočívající v identifikaci účastníku, zajištění jejich vzájemné synchronizace atd. Ostatní terminály (účastníci) se stávají podřízenými jednotkami (slave).

Tyto funkce jsou však dočasné a zanikají s ukončením spojení. Při následující komunikaci může funkci řídicí jednotky plnit jiný terminál.



Obrázek: Topologie ad hoc.



Obrázek: Topologie scatter ad hoc.

10 Systémy LPWAN (základní popis, IoT, systémy LoRa a SigFox).

10.1 IoT

10.2 LoRa

Lora = Long Range Systém LoRa je určen pro spojení na relativně velké vzdálenosti, ve volném prostředí do 30 km, v městském prostředí do 5 km. Používá bezlicenční pásmo 868 MHz. Používá techniku rozprostřeného spektra s šířkou rádiového kanálu 125 kHz nebo 250 kHz. Přenosová rychlost signálu se může měnit od 55 kbit/s do 300 bit/s. Pro SF = 12 je přenosová rychlost 300 bit/s (šířka rádiového kanálu 125 kHz) Pro SF = 7 je přenosová rychlost 11 kbit/s (šířka rádiového kanálu 250 kHz) Pro modulaci FSK je přenosová rychlost 55 kbit/s V Evropě bylo pro systém LoRa vyhrazeno pásmo 863 – 870 MHz. Využívá se 9 kanálů, z toho 8 pro uplink a 1 pro downlink. Maximální délka zprávy je 255 bytu. Na jeden přístupový bod může být připojen až 1 milion koncových zařízení. Využívá FDD a je tedy vhodná především pro chytré rozvodné sítě SG (Smart Grid), ale i jiné použití. Pro zabezpečenou komunikaci mezi koncovými zařízeními a aplikací na internetu se používá protokol LoRaWAN. Každý koncový bod má přidělený jedinečný 64-bitový identifikátor a dva 128-bitové klíče, kterými jsou data zašifrována. Jeden klíč se používá v rámci sítě (při použití více sítí), druhý k zabezpečení dat mezi sítí a aplikací.

10.3 SigFox

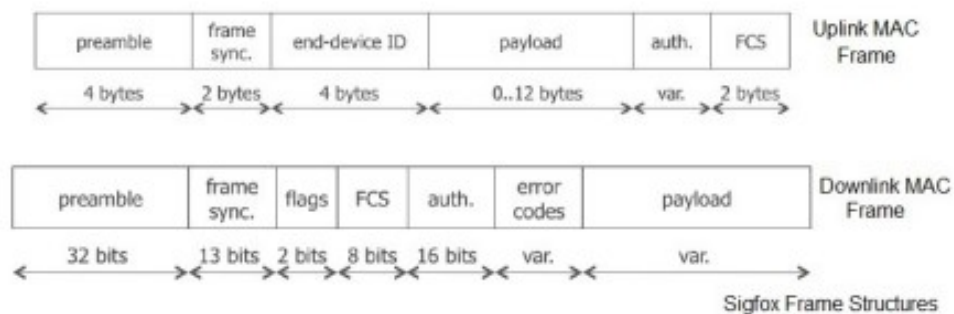
Systém Sigfox využívá buňkovou strukturu se základnovými stanicemi. Po přijetí zprávy ze zákaznického zařízení (modemu) zasílá základnová stanice zprávu do Sigfox cloudu přes TCP/IP. Zprávy se dále řídí a zasílají k cílovému zařízení dle potřeby (přes TCP/IP). Používá bezlicenční pásmo 868 MHz, DBPSK, přenosová rychlost 100 až 600 b/s, velikost zprávy max 12 bajtu. Vysílaný výkon 14 dBm, dosah v terénu až 50 km, ve městě 10 km. Provoz na baterie 5 až 15 rok.



Obrázek: Architektura sítě Sigfox [zdroj]

Přenosový protokol Sigfox:

Přenosový rámec tvoří pouze 26 bytu, z nichž 0 až 12 bytu tvoří uživatelská data. Zpětný kanál je omezen na 0 až 8 bytu užitečných dat (s časovým omezením 4 zprávy denně). Odesílaná data do sítě nemají žádnou konkrétně definovanou strukturu. Je pouze na odesílateli a příjemci, jaký formát dat zvolí. K adresování jednotlivých zařízení se nepoužívají SIM karty ani IP adresy. Zařízení jsou identifikována interními identifikátory, což jsou jejich sériová výrobní čísla.



Obrázek: Protokol Sigfox [zdroj]

V ČR provozuje síť Sigfox společnost SimpleCell ve spolupráci s T-Mobile.