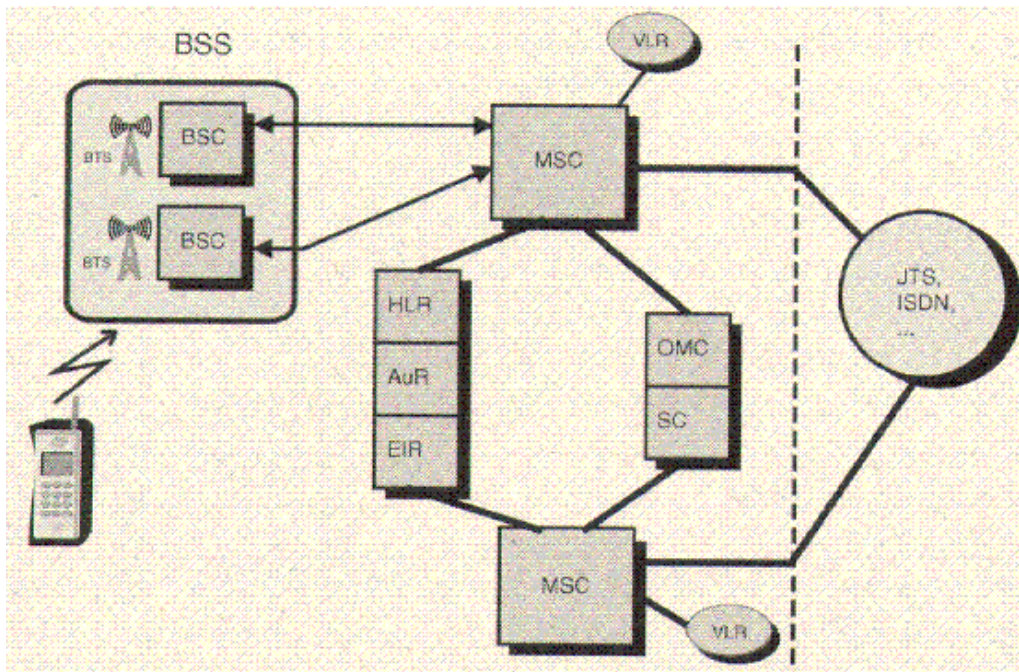


Vývoj GSM začal v roku 1982, keď CEPT (Conference of European Posts and Telegraph) vytvorila výskumnú skupinu Groupe Spécial Mobile. V roku 1989 bola zodpovednosť prevedená na ETSI (European Telecommunication Standards Institute). Komerčný štart siete sa uskutočnil v roku 1991 vo Fínsku.

Architektúra GSM a základné podsystémy

GSM môžeme z architektonického hľadiska rozdeliť na:

- Subsystém základných staníc BSS (Base Station Subsystem)
- Subsystém údržby OMS (Operation and Maintenance Subsystem)
- Sieťový subsystém NSS (prepojenie základných staníc)



Užívateľ prístupuje do siete prostredníctvom mobilnej stanice. Úlohou siete je spojiť užívateľa s iným užívateľom tej istej alebo inej siete. Účinník siete podlieha identifikácii v dvoch rovinách. V prvej rovine sa overí príslušnosť užívateľa k danej sieti pomocou IMSI (International Mobile Subscriber Identity), ktorá je uložená na SIM karte (Subscriber Identity Module). Na autentifikáciu na úrovni mobilnej stanice sa používa PIN (Personal Identification Number) kód, po zadaní ktorého nadobudne SIM karta plnú funkčnosť.

Subsystém základných staníc (BSS – Base Station System) má za úlohu meniť rádiový

signál, ktorým sa komunikuje s mobilnou stanicou na signál pevnej telefónnej siete a opa ne. alej sa stará o synchronizáciu mobilných staníc a alokáciu nosných frekvencií. Základová stanica BSS sa stará súasne o niekoľko buniek siete GSM. Každá bunka siete má pridelenú vlastnú riadiacu jednotku BSC (Base Station Controller) a je obsluhovaná rádiodanicami BTS (Base Transceiver Station). BTS je vysielacia/prijímacia stanica. BSC zabezpečuje manažment pridelenia kanálov pre jednu alebo viac BTS prostredníctvom rozhrania Abis. BSS obsahuje transcoder na prekódovanie 64kbps na 16kbps smerom do siete, resp. opa ne

Sieťový subsystém predstavuje predovšetkým ústredie a GSM siete – MSC (Mobile Services Switching Center), ktorá realizuje všetky prepojujacie funkcie medzi jednotlivými subsystémami základových staníc a verejnej telefónnej siete. MSC obsahuje štyri registre:

- HLR (Home Location Register) obsahuje zoznam všetkých účastníkov siete, ktorý prináležia do oblasti spravovanej týmto registrom, obsahuje informácie na identifikáciu účastníka a jeho polohu (na ktorú BTS je momentálne pripojený)
- VLR (Visitor Location Register) je register návštevníkov siete, teda užívateľov, ktorý spadajú pod inú MSC a v danej oblasti sa vyskytujú iba dočasne. Tieto informácie dostane od príslušného HLR domovskej MSC účastníka. Po opustení oblasti sa záznam o účastníkovi vo VLR vymaže.
- AUR (Authentication centre) je súčasťou HLR a obsahuje údaje pre šifrovanie prenosov.
- EIR (Equipment Identity Register) je register oprávnených mobilných staníc, ktoré sú identifikované pomocou IMEI (International Mobile Equipment Identification). V EIR je napr. blacklist odcudzených staníc, ktorým sa prístup do siete zamietne.

Služby v GSM

Základnou myšlienkou GSM bola komunikácia v sieťach ISDN a preto služby GSM tvoria podmnožinu služieb poskytovaných v ISDN sieťach. Terminál GSM môže byť spojený s PSTN, ISDN, packetovými sieťami (Packet Switched and Circuit Switched Public Data Networks), Internetom a stanicami klient/server. Dáta v GSM sú prenášané rýchlosťou 9,6 kbps. Dáta na vyššej rýchlosti sa prenášajú pomocou HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) ktoré používajú slabší samoopravný kód a viac časových slotov $4 \times 14,4 = 57,6$ kbps. K službám GSM patrí prenos faxových správ (Groupe 3 protokol), videotext a teletext. Zvláštne postavenie má služba SMS (Short Message Service), ktorá nahrádza funkciu pageru s rozšírenými funkciami:

- obojstranný prenos správ (send/receive message point to point)
- uloženie správy a presmerovanie správ (store and forward delivering)

- potvrdenie doručenia zaslaných správ (acknowledgement of successful delivery)

Ďalšou službou je možnosť vysielania správ do jednej bunky alebo skupiny buniek siete GSM. Tak užívateľ získa správy o porušení, dopravnej situácii, servisných službách a pod.. V oblasti klasického telefonovania poskytuje GSM služby digitálnej pobočkovej ústredne (PABX) ako je presmerovanie hovorov, hlasová schránka,... Takéto služby zahŕňajú a odporúčajú GSM Phase 1. GSM Phase 2 ponúka identifikáciu volajúceho, konferenčné hovory a iné.

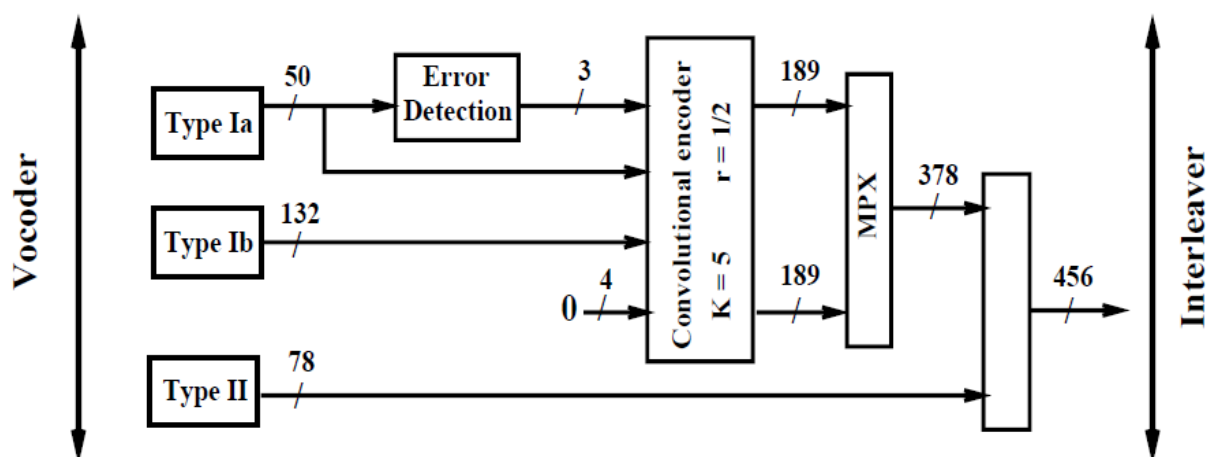
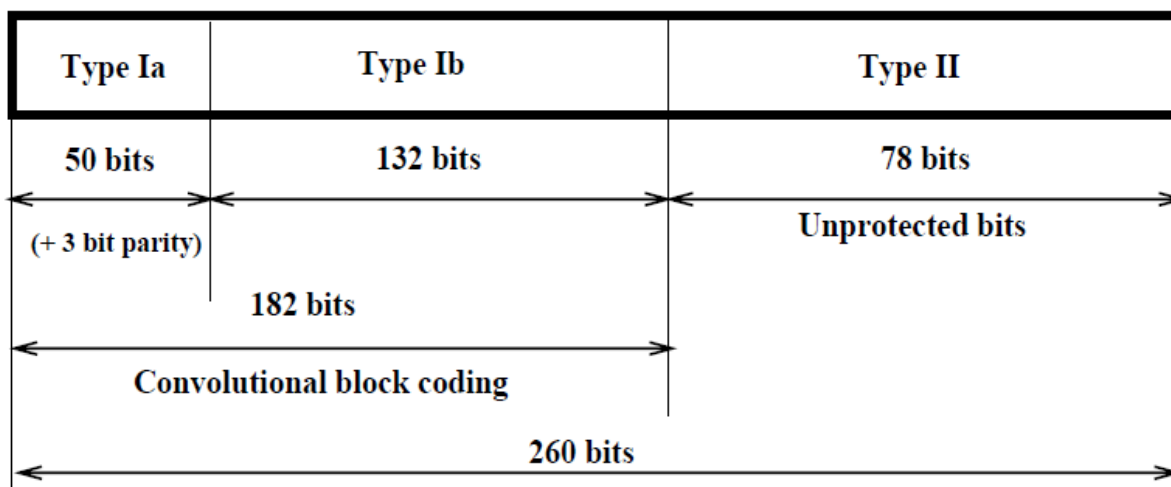
Rádiové rozhranie GSM

GSM komunikuje na frekvenciách 890-915 MHz smerom k základňovým staniciam (uplink) a 935-960 MHz smerom k mobilnému terminálu (downlink). Ďalšia špecifikácia pre pásmo 900 MHz v GSM:

- duplexný odstup 45MHz
- 124 vlnových kanálov
- šírka pásma vlnového kanála 200kHz
- 992 full rate prenosových kanálov a 1984 half rate kanálov
- maximálny kmitočtový zdvih 67.750 Hz
- modulácia GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying)
- GSM 1800 – 374 kanálov
- GSM 1900 – 290 kanálov

Samoopravné kódy v GSM

Kóder hlasu vytvára bloky o veľkosti 260 bitov každých 20ms, t.j. 13 kbps. Týchto 260 bitov sa v kóderi delí na dve skupiny. 78 bitov je klasifikovaných ako Class II bity, ktoré sú považované za menej dôležité a sú nechránené. Zvyšných 182 bitov sú Class I a delia sa tiež na dve skupiny. 50 bitov je Class Ia a 132 bitov je Class Ib. Class Ia je zabezpečená 3 paritnými bitmi. Následne sa k nim pridá Class Ib a spoločne sa zabezpečia 4mi bitmi. Všetky bity Class I sa kódujú konvolučným kódom s pomerom $R = \frac{1}{2}$, čo vytvorí reťazec 378 bitov. Následne sa k nim pridá 78 Class II bitov, čím sa vytvorí konečný rámec 456 bitov.



Najcitlivejším bitom je tak pridelený kontrolný reazec 3 bitov. Ak je jeden z týchto bitov zlý, mohlo by to vyvola hlasné zvuky v 20ms rámci. Ak sa deteguje takáto chyba poškodené bity sa môžu nahradiť menej nepríjemným signálom, napríklad extrapoláciou z prebiehajúcej komunikácie. Polynóm reprezentujúci detekčný kód má tvar $G(x) = x^3 + x + 1$. Na strane prijemcu sa robí ten istý proces a keď sa zistí chyba, rámec sa zahodí.

Konvolučný kód GSM pozostáva v pridaní 4 bitov k základným 185 bitov a potom konvolučnom kódovaní s dvomi rozdielnymi polynómami: $G_1(x) = x^4 + x^3 + 1$ a $G_2(x) = X^4 + X^3 + X + 1$. Výsledok potom pozostáva z dvoch 189 bitových postupností.

Viterbiho algoritmus v GSM

Slúži na dekódovanie konvolučného kódu. Postupne skúma všetky možné postupnosti, ktoré mohli pri kódovaní nastať a rozhoduje sa pre tú najpravdepodobnejšiu. Je to ML (Maximum Likelihood) dekodér. Na výpočtové zjednodušenie dekodér určí postupnosti, ktoré nemôžu k pravdepodobnej ceste patriť a tieto sú vylúčené. Pamäť dekodéra je limitovaná na K bitov a dekodér udržuje len 2^{K-1} ciest. Jeho zložitosť exponenciálne narastá s dĺžkou K .

Kanály v GSM a ich funkcie

- TCH (Traffic Channel) – prevádzkový kanál. Na tomto kanále sa prenášajú bežné dáta (hovory, faxy,...). Má rôznu rýchlosť TCH/F (fullrate), TCH/H (halfrate).
- CBCH (Cell Broadcast Channel)
- SDCCH (Slow Rate Data Control Channel) – prenos užitočných dát, SMS,..
- SACCH (Slow Rate Associated Control Channel) – pridružený riadiaci kanál ku SDCCH. Prenáša výsledky merania MS počas hovoru. Slúži na nastavenie predstihu vo vysielaní.
- BCCH (Broadcast Control Channel) – riadiaci kanál. Je jednosmerný od bázevej stanice k mobilnej stanici. Prenáša informácie o výkone a frekvenciách susedných buniek, parametroch pre zmenu frekvencie a pod. Má vždy konštantný výkon a frekvenciu.
- FCCH (Frequency Correction Channel) – kanál na riadenie frekvencie. Po zachytení kanála BCCH riadi MS s jeho pomocou nastavenie frekvencie kanálov.
- SCH (Synchronization Channel) – riadi synchronizáciu. Po korekcii frekvencie sa MS zosynchronizuje s BTS hodinovými impulzmi z SCH.
- CCCH (Common Control Channel) – spoločný riadiaci kanál. Pracuje na zaisťovanie spojenia obojsmerne medzi BTS a MS.
- FACCH – handover príklady.
- Kanály môžeme deliť na pridelené (SDCCH, SACCH, FACCH) a spoločné – broadcast – iba downlink (FCCH, SCH, BCCH, CBCCH)

Rozhrania GSM

- A-interface – ISDN rozhranie s PCM30: 0. slot synchronizácia, 16. Slot signalizácia. 64kbps na slot.
- A-ter – vkladá 4 ISDN kanály. Obsahuje kompresné algoritmy – halfrate codec, fullrate codec, enganced fullrate codec. Zabezpe uje DTX (discontinuos transmission), ktorá zabezpe uje prerušenie spojenia po as doby v ktorej sa ni nevysiela.
- A-bis – prenáša užito né informácie, synchronizáciu, signalizáciu a chybové hlásenia.

BTS

BSC

TC

MSC

A 64kbps

A-ter 16kbps

A-bis

mobil

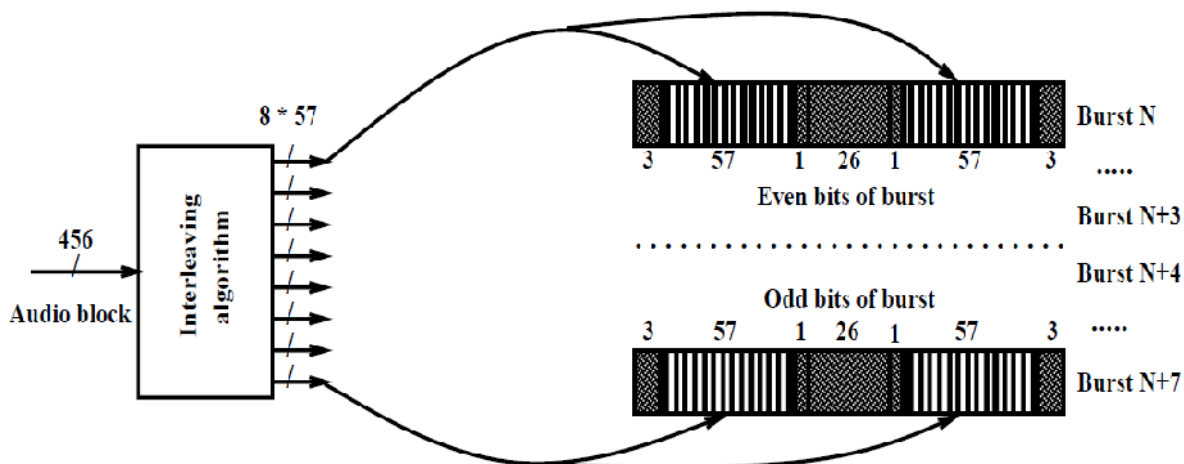
Um - rádiové rozhr.

íslovanie v GSM

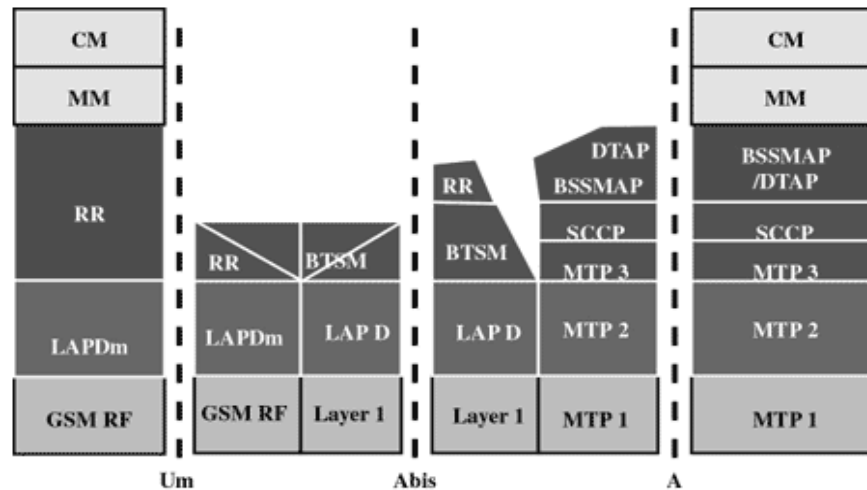
- IMSI (International Mobile Subscriber Identity) – 15 íslic
- MSRN (Mobile Station Roaming Number) – prenáša sa, ak telefonujeme z inej ako domácej siete. Obsahuje íslo krajiny, identifikáciu operátora a ú astníka.
- HON (Handover Number) – slúži na identifikáciu užívate a prechádzajúceho medzi bunkami siete.
- TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity) – náhodne prideli VLR každému mobilu v oblasti, hne ako sa zapne. Musí sa obnovova pri zmene oblasti. Využíva sa na paging.
- LAI (Location Area Identity) – íslo pridelené oblasti.
- CGI (Cell Global Identity) – globálne íslo bunky. Obsahuje identifikáciu krajiny, siete, oblasti a konkrétnej bunky.
- BSIC (Base Station Identity Code) – identifikácia bázovej stanice s ktorou MS komunikuje.

Šifrovanie v GSM

Šifrovanie v GSM zabezpe uje operácia XOR medzi pseudonáhodnou postupnos ou a 114 užito nými bitmi (všetky informa né bity, okrem 2 flag bitov). Pseudonáhodná postupnos je odvodená od ísla rámca a k ú a ur eného po as signalizácie.



Protokoly v GSM



Obrázok zobrazuje schému protokolov GSM. Vrstvový model GSM architektúry zabezpečuje komunikáciu medzi dvoma odlišnými systémami. Spodné vrstvy zabezpečujú služby pre protokoly vyšších vrstiev. Medzi jednotlivými vrstvami sa prenášajú notifikačné správy, ktoré zabezpečujú správne formátovanie, vysielanie a príjem.

Vrstvový model:

- protokoly mobilnej stanice sú delené do troch vrstiev
- prvá vrstva zabezpečuje fyzické spojenie
- druhá vrstva zabezpečuje dátové spojenie. Je to modifikovaný Link Access Protocol pre D kanál (LAP-D) používaný v ISDN. Nazýva sa Link Access Protocol on Dm channel (LAP-Dm). Cez A interfece sa používa MTP (Message Transfer Part) druhej vrstvy SS7.
- tretia vrstva signalizácie v GSM je rozdelená na tri časti – RR (Radio Resource Management), MM (Mobility Management) a CM (Connection Management).

Obvykle sú prvé tri vrstvy zakončené v rovnakom uzle. V GSM je funkcionality rozdelená medzi viac entít spojených štandardizovaným rozhraním. Napríklad RR je rozdelená medzi MS, BTS, BSC a MSC.

CM – riadi zostavenie hovoru na požiadavku užívateľa. Má tri úlohy:

- Call control – manažment spojovo orientovaných služieb
- Supplementary service management – konfigurácia a kontrola služieb
- SMS

MM – udržiava dáta o polohe, riadi autentifikáciu a kryptovanie.

RR – zostavuje a udržiava stabilnú komunikačnú cestu medzi MSC a MS po ktorej sa posiela signalizácia a užívateľské dáta. Tiež sa stará o handover. Väčšina funkcií RR je kontrolovaná BSC, BTS a MS, ale niektoré príkazy sú od MSC (napr. inter-MS handover). Má subsystém RR' manažovaný BTS.

LAPDm – poskytuje rádiový prenos. Je modifikovanou verziou LAPD. Tieto modifikácie vznikli kvôli vysokým nárokom na synchronizáciu v TDMA a kontrole chybovosti.

BTSM (Base Transceiver Station Management) – je zodpovedný za prenos RR informácií do BSC.

LAPD – ISDN LAPD protokol na prenos informácií medzi BSC a MSC.

BSSAP (Base Station System Application Part) – má dve časti BSSMAP a DTAP. Výmena správ je zabezpečená SS7. Správy ktoré nie sú pre BSC sú prenášané Base Station system Management Application Part, ktorý podporuje všetky procedúry medzi MSC a BSS na interpretáciu a spracovanie informácií o hovore a manažment zdrojov. Správy medzi MSC a MS ktoré sú transparentné pre BSC sú vytvárané Direct Transfer Application Part (DTAP).

SCCP (Signalling Connection Control Part) – z SS7.

MTP (Message Transport Part) – tiež z SS7.

Základné procedúry v GSM

- Prihlásenie do siete – po zapnutí mobilnej stanice sa táto zosynchronizuje so sieťou pomocou niektorých logických kanálov. MS meria kvalitu všetkých 124 VF kanálov a vytvorí zoznam najkvalitnejších, ktoré tvoria kandidátov na funkciu logických kanálov BCCH. Potom stanica hľadá FCCH na základe ktorého prispôsobí frekvenciu a hrubé nasťovanie. Presná synchronizácia nastáva pomocou SCH a zisťuje sa s ktorou základňovou stanicou MS komunikuje (BSCI – Base Station Identity Code). Potom, ako sa MS zaregistruje do siete odpoľúva kanál CCCH.
- Zostavenie spojenia – v prípade požiadavky na spojenie prijaté z CCCH sa toto transformuje do kanála TCH, na ktorom prebieha komunikácia. V priebehu komunikácie sa na kanály SACCH prenášajú údaje o MS k základňovej stanici.
- Autentifikácia pri prihlásení – overenie identifikácie užívateľa a prebieha pri prihlásení do siete, pri inicializácii hovoru a aktivácií / deaktivácií niektorých služieb. Sieť vyšle náhodné číslo (RAND) z ktorého mobilná stanica vypoľíta pomocou šifrovacieho algoritmu A3 a identifikačného kľúča K_1 odpoveď (SRES). Sieť následne túto odpoveď overí a podľa toho povolí / odoprie užívateľovi prístup. Kľúč K_1 a šifrovacie algoritmy A3 a A8 sú uložené na SIM karte.

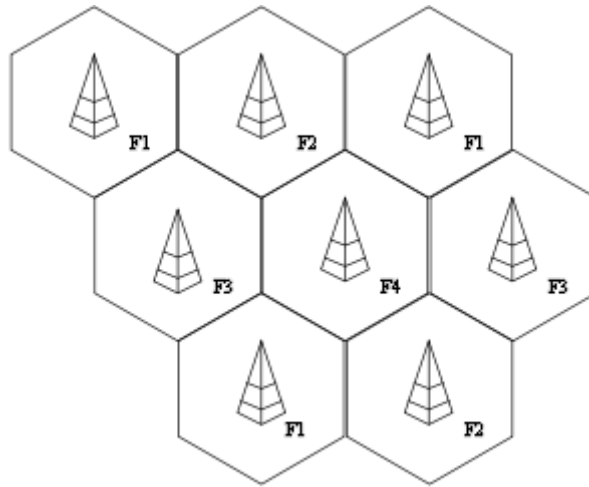
Bunková sie je rádiová sie distribuovaná na územiach nazývaných bunky. Každá bunka je obsluhovaná aspo jedným statickým vysielacom nazývaným základná stanica. Bunkové siete spolu vytvárajú pokrytie veľkého geografického priestoru. Na tomto priestore umožňujú prenosným zariadeniam komunikáciu medzi sebou, ako aj s inými zariadeniami a inými sieťami. Bunková sie poskytuje určité výhody oproti iným riešeniam:

- Zvyšujú kapacitu ústníkov, nakoľko títo sú obsluhovaní rozličnými stanicami a v rozdielnych bunkách môžu využívať rovnaké frekvencie a kódy
- Znižujú energetické nároky nakoľko sa skraca vzdialenosť medzi základnou stanicou a mobilnou stanicou na maximálnu vzdialenosť rovnú polomeru bunky
- Pokrýva rozsiahle územie, ktoré sa môže flexibilne rozširovať pridaním nových buniek
- Znižuje sa rušenie inými signálmi

Jednotlivé bunky sa zvyknú zobrazovať ako šesťuholníky. Každá bunka dostane pridelenú množinu frekvencií na ktorých prebieha komunikácia medzi základnou stanicou a ústníckymi zariadeniami. Tieto frekvencie môžu byť použité aj v ďalších bunkách siete s výnimkou susedných buniek, pretože by zapríčinili kanálovú interferenciu. Z toho vyplýva aj zvýšená kapacita bunkovej siete oproti sieti s jedným vysielacom. V bunkovej sieti môže byť vo viacerých bunkách použitá rovnaká frekvencia na rozdielne prenosy, čo by v prípade jedného vysielateľa bolo možné.

Na rozlíšenie signálu medzi jednotlivými stanicami sa používa frekvenčný (FDMA) a kódový multiplex (CDMA). Pri FDMA susedné bunky využívajú rozdielne množiny frekvencií. V prípade CDMA je systém o niečo zložitejší. Jednotlivé stanice sa od seba líšia pridelenou množinou kódov, ktorá jednoznačne identifikuje vysielateľa s ktorým komunikujeme.

Iné metódy ako PDMA alebo TDMA sa nedajú použiť na rozlíšenie vysielateľov, nakoľko sa efekt u oboch mení v závislosti na polohe, čo neumožňuje správne rozlíšenie signálov. TDMA sa však používa v kombinácii s FDMA alebo CDMA na zvýšenie počtu kanálov v rámci bunky.



Na výpočet možností použitia rovnakej frekvencie vo viacerých bunkách slúži vzdialenosť

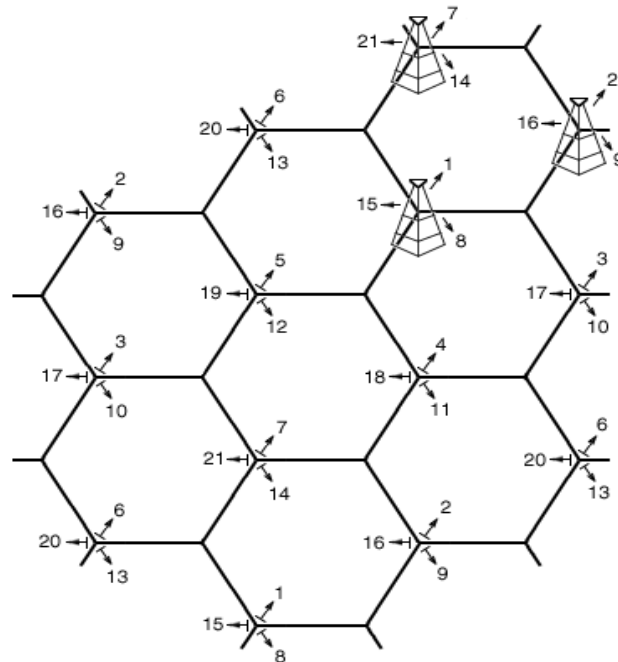
$D = R\sqrt{3N}$, kde R je polomer bunky a N je počet buniek v jednej skupine. Polomer buniek sa

môže meniť (typicky 1km-35km). Hranice buniek sa tiež zvyknú prekrývať a veľké bunky sa zvyknú deliť na niekoľko menších buniek. Na opis siete tiež slúži *reuse factor* vyjadruje pomer s akým sa môžu rovnaké frekvencie v sieti použiť. Je to $1/K$, kde K je počet buniek, v ktorých sa rovnaká frekvencia použiť nemôže. Typické hodnoty sú $1/3$, $1/4$, $1/7$, $1/9$ a $1/12$. V prípade použitia N sektorových antén pre rovnakú základnú stanicu, pričom je každá v inom smere, môže základná stanica obslúžiť N rôznych sektorov. Obvyklá hodnota je $N=3$. Vzor N/K označuje ďalšie delenie frekvencií medzi N antén na rovnakom mieste. Známe vzory sú napríklad $3/7$ (Americká AMPS), $6/4$ (Motorola NAMPS) a $3/4$ (GSM). Pri celkovej šírke pásma B môže každá bunka použiť frekvencie zodpovedajúce pomeru B/K a každý sektor môže použiť frekvencie o celkovej šírke pásma B/NK .

Kódový multiplex používa širšie pásmo aby dosiahol rovnaký pomer ako FDMA. To však kompenzuje dosahovaním *reuse factor* 1. Inými slovami susedné bunky môžu používať rovnaké frekvencie a rozdielne základné stanice a užívatelia sú od seba rozlíšení použitím rôznych kódov namiesto rôznych frekvencií.

Nové siete ako napríklad LTE používajú novú metódu delenia kanálov – OFDM. V takýchto systémoch je potrebný manažment medzibunkovej interferencie ICIC ako napríklad multiple-site MIMO, multiple-site beam forming, koordinovaný plán,...

Prvé vysielacie boli všesmerové. Za pomoci smerových antén však môžeme pristupovať k návrhu bunkovej siete rozdielne. Namiesto umiestnenia staníc do prostriedku bunky umiestnime tieto do rohov buniek. Každá stanica dostane tri smerové antény, každú pre jednu bunku v jej okolí. Každá bunka tak môže byť obsluhovaná signálom z troch základných staníc.



Dôležitou funkciou v bunkových sieťach je odovzdávanie ústníka medzi základnými (handover) stanicami ak tento prechádza z jednej bunky do inej bunky. V základnej stanici, ktorá bude prichádzajúceho ústníka obsluhovať sa preňho vytvorí kanál na ktorý sa mobilné zariadenie pri prechode medzi bunkami prepne. Konkrétny systém odovzdávania ústníka sa líši v závislosti na použitom systéme.

Základnými typmi modulácií sú amplitúdová modulácia, frekvenná modulácia a fázová modulácia. Pre diskrétny signál je počet symbolov, ktoré potrebujeme prenásť konečný. Z toho vyplýva aj konečný počet stavov pre každú moduláciu.

ASK (Amplitude shift keying) – Amplitúdová modulácia spočíva v úprave amplitúdy nosnej vlny na danej frekvencii pomocou informačného signálu. Počet prípustných hodnôt amplitúdy zodpovedá počtu symbolov, ktoré sme schopní preniesť.

FSK (Frequency shift keying) – Frekvenná modulácia upravuje frekvenciu signálu. Počet prípustných frekvencií zodpovedá počtu symbolov. V tomto prípade máme dve frekvencie. Jedna je frekvencia nosnej vlny a druhá je frekvencia signálu modulovaná na nosnú vlnu, ktorá reprezentuje informačný signál.

PSK (Phase shift keying) – Fázová modulácia ovplyvňuje fázu nosného signálu. Počet fáz zodpovedá počtu symbolov.

QAM (Quadrature amplitude modulation) – vzniká amplitúdovou moduláciou dvoch vln súčasnne. Tieto vlny sú medzi sebou posunuté o 90 stupňov a následne sčítané. Je to zmiešanie ASK a PSK modulácie.

Modulácie môžeme deliť na

- **Koherentné** – je potrebná synchronizácia fázy medzi prijímateľom a vysielačom ($\neq 0$)
- **Nekoherentné** – nie je potrebná fázová synchronizácia ($\neq <0,2$)

Počet bitov reprezentujúci jeden symbol sa označuje k . Z toho vyplýva počet symbolov $M = 2^k$.

ASK

$$s(t) = \sqrt{2P} \cos(2\pi f_c t + \theta)$$

PSK – typicky koherentná modulácia, pretože fázu musíme poznať

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T}} \cos(\omega t + \theta(t))$$

$$\theta(t) = \frac{2\pi}{M} i$$

BPSK – používa dve fázy

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

MPSK – na rovnakej kružnici viacej bodov, ale hustota fáz sa rýchlo zvyšuje.

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \sin\left(\frac{\pi}{2M}\right)\right)$$

Diferenciálna BPSK (**DBPSK**) – nekoherentný typ. Používa sa v kanáli, kde je zmena fázy signálu minimálna. Ako referenčná fáza sa používa fáza predchádzajúceho signálu. Informácia sa mapuje do zmeny vo fáze medzi dvomi po sebe idúcimi signálmi.

$$P_b = \frac{1}{2} e^{-E_b/N_0}$$

Je o 1 dB horšia ako koherentná. Používa sa vo WiFi pretože nevyžaduje synchronizáciu.

DMPSK (nekoherentná)

$$P_b(M) \approx 2Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0} \frac{r}{4M}}\right)$$

BFSK koherentná

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

Koherentná BFSK má o 3dB vyššiu chybovosť ako koherentná BPSK.

Nekoherentná BFSK

$$P_b = \frac{1}{2} e^{-E_b/2N_0}$$

Pre dosiahnutie chybovosti ako koherentná vyžaduje o 1dB nižší pomer EBNO

Koherentná MFSK

$$P_b(M) \approx 10Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

Nekoherentná MFSK

$$P_s(M) \leq \frac{1}{M} e^{-E_b/N_0}$$

Pre ortogonálne modulácie (MFSK)

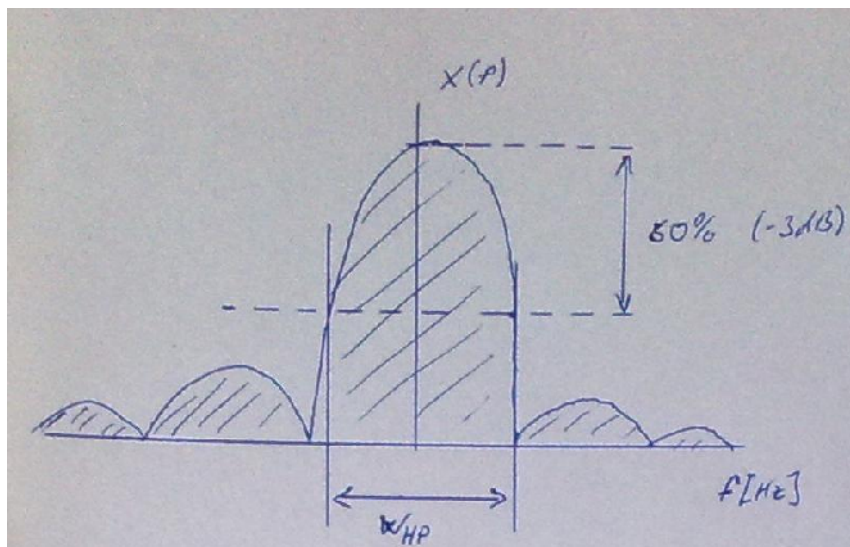
$$P_B = M^2 M^{-1} P_S = 2k - 12k - 1 P_S$$

Pre neortogonálne modulácie (MPSK)

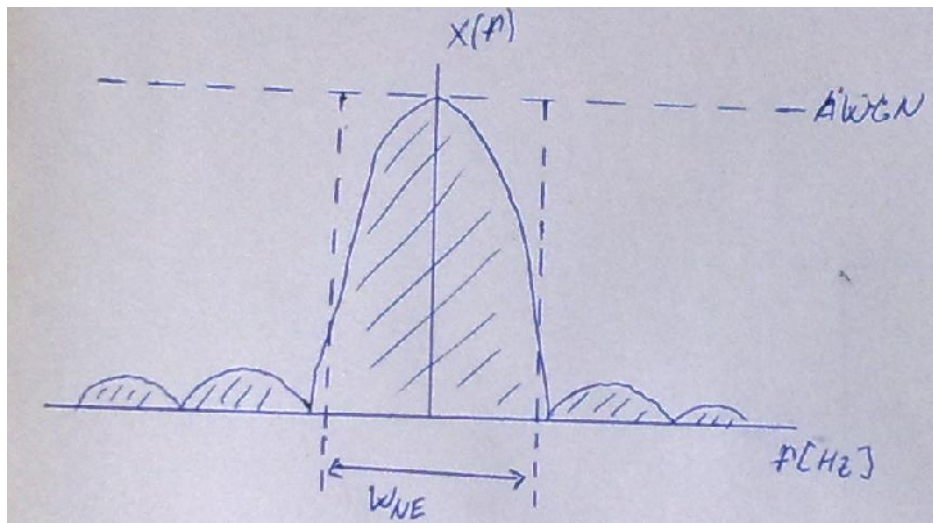
$$P_B = P_S \log_2 M = P_S k$$

Prenášaný signál má obvykle vo frekvennej oblasti zastúpené široké spektrum frekvencií. Pre diskretný signál je toto spektrum prakticky nekonečné. Z dôvodov obmedzení vyplývajúcich z pridelenej šírky pásma, po tu kanálov, ktoré môžeme v tomto pásme vytvoriť, ako aj efektivity prenosu signálu je vhodné obmedziť šírku použitého spektra pre daný signál len na najpodstatnejšiu časť spektra. Praktické definície spektra sú:

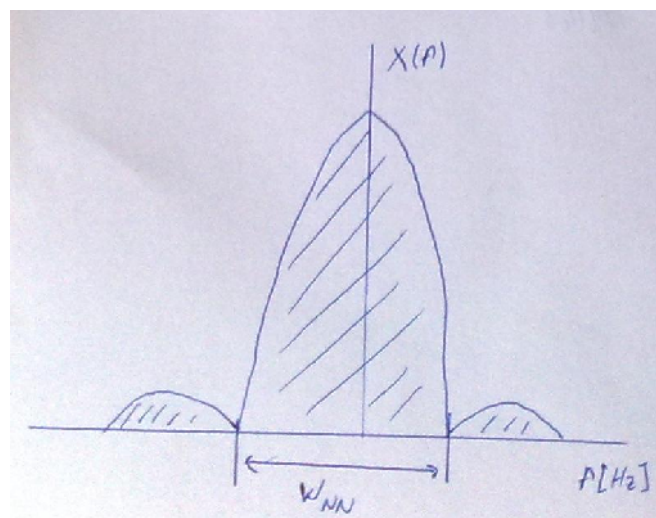
W_{HP} (half power) – od maximálnej hodnoty frekvencie sa odčítajú 3dB (polovica výkonu) a v tejto úrovni sa správi rovnobežka s frekvenčnou osou. Kde rovnobežka pretína spektrálnu funkciu správi kolmice smerom na frekvenčnú os. Tieto kolmice potom ohraničia použité frekvencie.



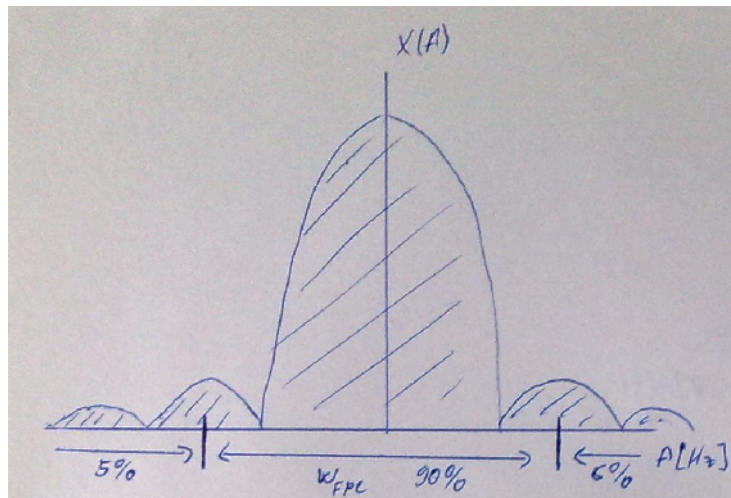
W_{NE} (noise equivalent) – šírka pásma je ohraničená plochou, na ktorej má AWGN šum rovnaký výkon ako signál.



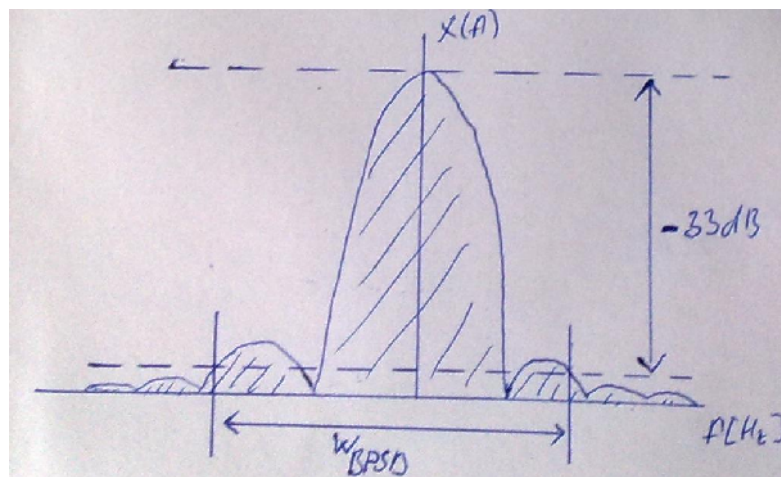
W_{NN} (null to null) – šírka pásma je ohraničená prvými nulami vľavo aj vpravo od vertikálnej osi.



W_{FPC} (fractal power containment) – šírka pásma sa určuje podľa požadovaného pomeru výkonu, ktorý chceme zachovať. Ako príklad požadujeme prenášanie 90% výkonu.



W_{BPSD} (bounded power spectral density) – šírka pásma je určená podobne ako pri W_{HP} , rovnobežku k frekvennej osi však vynášame v poklese o 33dB.



Absolútne pásmo – extrémny prípad. Berieme do úvahy celú šírku pásma, kde sme ešte schopný namerať nejakú úroveň signálu.

GFT (Generalized Fourier Transformation) je zovšeobecnením fourierovej transformácie. V prípade telekomunikácií má význam zovšeobecní vzáhy transformácie pre množinu ortogonálnych signálov.

Majme množinu N bazových signálov indexovaných pomocou indexov i a j. Označme bazové signály ϕ_i resp. ϕ_j . Potom podmienkou ortogonalít je:

$$\int_0^T \phi_i(t) \phi_j(t) dt = K_{ij} \delta_{ij}$$

kde δ_{jk} je kroneckerova delta funkcia a platí

$$K_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

a

Pre bazové funkcie neexistujú žiadne ďalšie obmedzenia okrem podmienky ortogonalít a trvania v čase od 0 do T. Existuje nekonečne veľa spôsobov, ako sa dajú bazové funkcie vybrať. Preto sa volia z hľadiska pohodlia, t.j. čím menej bazových funkcií a o najjednoduchšie vyjadrenie signálov s ich využitím. Cieľom pri hľadanií bazových funkcií je nájsť množinu signálov, ktoré majú maximálnu vzdialenosť a minimálnu energiu.

Vzáhy pre GFT

$$\begin{aligned} 0 &\leq t \leq T \\ t &= \sum_{i=1}^M \phi_i(t) \\ \phi_j &= \sum_{i=1}^M \phi_i(t) \end{aligned}$$

Používa sa aj lineárna báza $\{\phi_j\}$, $j = 1 \dots N$. Snažíme sa dosiahnuť $N = M$. V prípade lineárnej

bázy neplatí $K_j = 1$, ale

$$K_j = \int_0^T \Psi_j^2(t) dt$$

Rozpočet linky na základě předpokladaných strát pořítaný pod a referenční vzdálenosti d_0 .

$P[\text{dB}]$

$L[\text{dB}]$

d

d_0

d_{Rx}

0_{Tx}

$L_s(d_0)$

$L_s(d_0)$

$10n \log$

$L_p(d)$

X

20-30dB

P – výkon

L – straty

d_0 – referenční vzdálenost (makrobunka – 1km, mikrobunka – 100m, indoor – 1m)

d_{Px} – vzdálenost přijímače a

n – parameter prostredia (približne = 2)

X – ve korozsahové úniky (LargeScale Fading margin) pod a modelu Okumura – Hata, necháva sa rezerva 6-10 dB, má log-normálne rozdelenie

20-30 dB rezerva pre malorozsahové úniky (napr. Rayleigho úniky)

Stredná hodnota strát:

$$L_p(d) \approx \left(\frac{d}{d_0} \right)^n$$

$$L_p(d) = L_p(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

kde

$$L_p(d) = L_p(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

Prenosový kanál je prostredie, v ktorom sa signál prenáša. Jeho vlastnosti ovplyvujú prenášaný signál a vytvárajú chyby. Na simuláciu prenosového kanála vznikli modely prenosových kanálov, ktoré simulujú prenosové podmienky pre rôzne druhy spojenia. Sú to napríklad binárny symetrický kanál, binárny kanál s vymazaním alebo Rayleighho kanál s únikmi. Pre mobilné a satelitné systémy má významné postavenie AWGN kanál.

AWGN kanál je model, ktorý reprezentuje šum vzniknutý súčtaním všetkých možných šumov v prostredí, ktorý má konštantnú spektrálnu hustotu. AWGN kanál nepočíta s javmi ako sú úniky, frekvenčná selektivita, interferencia alebo disperzia. Je to však jednoduchý model, ktorý poskytuje predstavu o systéme predtým, ako zhodnotíme tieto ďalšie javy. AWGN kanál poskytuje pomerne realistický simulovaný model pre satelitnú a vesmírnu komunikáciu. Pre pozemné vysielanie treba uvážiť ďalšie, už spomínané, javy. Je to však vhodný model na posúdenie všeobecných vlastností systému.

AWGN:

- Additive – je výsledkom súčtu rôznych šumov ako tepelný, vesmírny,...
- White – pokrýva všetky frekvencie spektra, podobne ako biele svetlo
- Gaussian – jeho amplitúda má gaussovské rozdelenie
- Noise

Model kanála

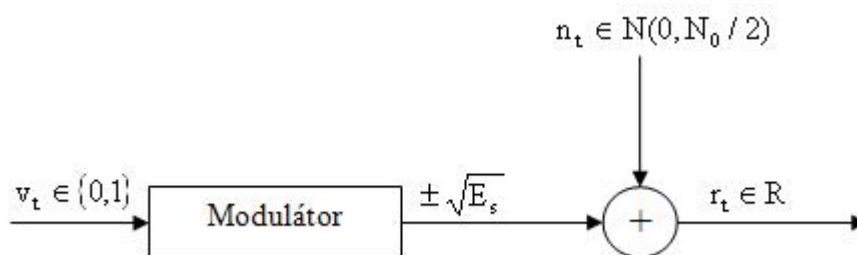
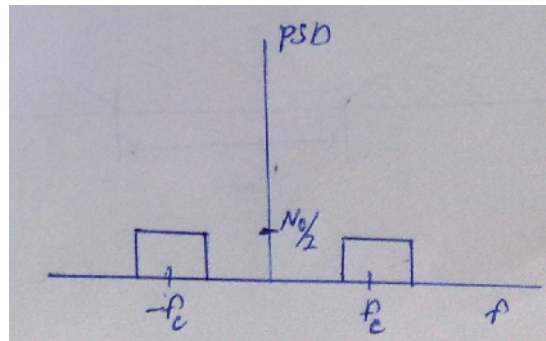
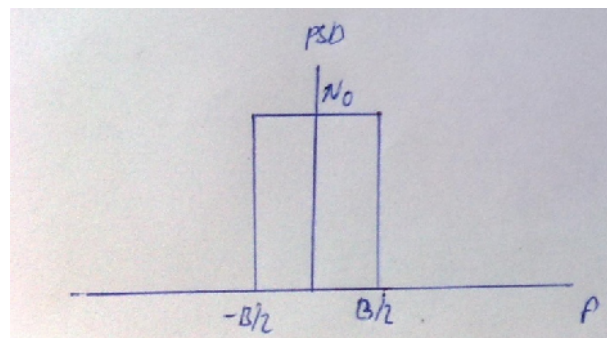


Schéma zobrazuje model AWGN kanála. Modulátor mapuje binárny signál v_t na prenášanú modulovanú postupnosť. K tejto postupnosti sa prídáva šum daný premennou n_t . Výsledkom tohto procesu je prijímaný reálny signál r_t . Tvar signálu sa zachováva, pripočítava sa k nemu šum.



Šum v AWGN kanály je charakterizovaný strednou hodnotou úrovne šumu N_0 . Obvykle sa používa vyjadrenie $PSD = N_0/2$. V niektorých prípadoch sa však uvažuje $PSD = N_0$. Je to v prípadoch, keď neuvažujeme spektrum (-nek., nek.) ale uvažujeme len kladné hodnoty frekvencií (0, nek.). Ilustrácie zobrazujú šum pre komplexný (vľavo) a reálny (vpravo) signál.



Dôležitou vlastnosťou AWGN šumu je jeho nezávislosť. V ubovo ne malom posunutí je jeho podobnosť prakticky nulová. To znamená, že vytvára nezávislé chyby pozdĺž celého vysielaného signálu.

Stredná kvadratická odchýlka AWGN šumu $\sigma^2 = N_0/2$.

Konvolu né kódy sú triedou samoopravných kódov. Patria do skupiny lineárnych stromových kódov. Konvolu ný kód vzniká konvolúciou informa ného signálu s impulzovou odozvou nejakého filtra. Pre diskkrétne signály konvolu ný kód vzniká z informa nej postupnosti na ktorú aplikujeme vnútornú logiku kódera. Prenosový pomer kódu je $R = k/n$, kde k je počet vstupných bitov a n je počet výstupných bitov

Vnútorná logika konvolu ného kódera pre diskkrétne signály sa zvykne modelovať pomocou štruktúry posuvných registrov. Táto zapríči uje, že informa ný bit ovplyv uje nie len výstupné bity kódového slova v danom zábere, kedy prichádza do kódera, ale aj v nasledujúcich záberoch kódera v závislosti od veľkosti vlastnej pamäte.

+

+

Schéma zobrazuje príklad konvolu ného kódera. Vidíme, že vstupný bit prichádzajúci zava priamo ovplyv uje výstupnú hodnotu prvého aj druhého kódového bitu. Tiež vidíme, že po vstupe do kódera sa zapíše do prvého registra. Po prijatí ďalšieho bitu je tento vplyv ovaný hodnotou predchádzajúceho bitu v prvom registri. Zároveň sa hodnota prvého vstupného bitu prepíše do druhého registra, ktorý v ďalšom zábere kódera ovplyvní oba výstupné kódové bity. Každý informa ný bit má teda vplyv na ďalšie dva nasledujúce informa né bity.

Konvolučný kód môže byť definovaný rôzne. Jednou z definícií je spomínaná schéma vnútornej logiky kódera. Inšou možnosťou je stavový diagram, generujúce polynómy alebo mriežkový diagram. Uveďte všetky tieto možnosti pre vyššie charakterizovaný kód pomocou schémy vnútornej logiky.

Uveďte, že registre kódera môžu nadobúdať hodnoty 0 alebo 1 a kombinácie všetkých možných hodnôt nazývame stavy kódera. Uveďte tabuľku pre všetky stavy daného kódera a jeho výstupné hodnoty pre vstupný bit 1 a 0.

Vstup p	Stav	Výstup	Násl. stav
1	00	11	10
0	00	00	00
1	01	00	10
0	01	11	00
1	10	10	11
0	10	01	01
1	11	01	11
0	11	10	01

Stavový diagram potom vyzerá nasledovne (elipsy reprezentujú stavy, údaje nad šípkami hovoria akou vstupnou hodnotou sa do daného stavu dostaneme / aké je výstupné kódové slovo):

00

10

01

11

1/11

0/00

1/00

0/11

0/01

1/10

1/01

0/10

Mriežkový diagram kódu je:

0/10

0/00

00

01

10

11

1/10

0/01

0/00

1/11

1/11

1/11

1/11

0/00

0/00

1/11

0/01

0/00

0/01

0/01

1/00

1/10

1/10

1/10

1/00

1/10

0/11

0/10

0/11

1/10

0/10

1/01

1/01

1/01

Charakteristika generujúcimi polynómami je daná po om generujúcich polynómov, z ktorých každý definuje iný výstupný bit. V našom prípade máme dva výstupné bity, teda budeme mať dva generujúce polynómy a matica generujúcich polynómov bude $G=[x^2+1, x^2+x+1]$. Prenosový pomer kódu je $R = \frac{1}{2}$ nakoľko jeden vstupný bit stimuluje vysielanie dvoch výstupných bitov.

Dekódovanie konvolučných kódov

Na dekódovanie konvolučných kódov sa používajú algoritmy, ktoré porovnávajú jednotlivé stavy, ktoré mohli nastať v priebehu kódovania. Tieto stavy sú vyhodnotené na základe postupnosti prijatých kódových bitov. Pre jednotlivé stavy sa počítajú pravdepodobnosti s akými mohli nastať a na základe porovnania týchto pravdepodobností sa určí prípad, ktorý pravdepodobne nastal. Z toho sa potom vyhodnotia prijaté informačné bity. Takýmito algoritmami sú napríklad BCJR algoritmus (pomenovaný podľa jeho autorov – Bahl, Cocke, Jelinek, Raviv) alebo SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm).

Viterbiho algoritmus

Je to dynamický algoritmus na nájdenie najpravdepodobnejšej postupnosti skrytých stavov, tiež nazývaných Viterbiho cesta, ktoré sú najkratšie výsledkom skrytého Markovovho modelu.

Charakteristika algoritmu:

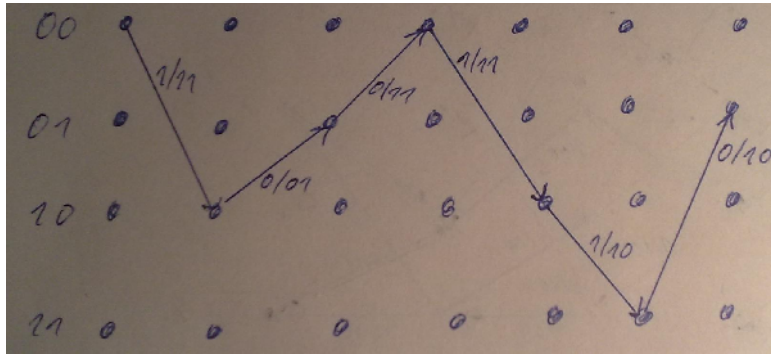
- Algoritmus pracuje na mriežke pozostávajúcej z konečnej množiny stavov.
- Do každého uzla v čase t vstupujú aspoň dva z uzlov v čase $t-1$.
- Pre každý časový okamih sa určí metrika všetkých možných sledov.
- Pre každý uzol sa vyberie sled s lepšou metrikou.
- Dekódovania končí vybratím sledu s najlepšou metrikou s pomedzi sledov, ktoré sme v procese dekódovania nevyhlídli.

V procese dekódovania sa na základe prijatých bitov vytvára model stavov, v ktorých sa kóder mohol nachádzať a stavov, do ktorých sa v ďalšom zábere mohol dostať. Každý prechod medzi predchádzajúcim a nasledujúcim stavom dostane priradenú hodnotu pravdepodobnosti (cenu prechodu) na základe toho, do akej miery je výsledok tohto procesu podobný prijatej postupnosti. Ako výsledok dekódovania je potom určená cesta s najväčšou pravdepodobnosťou (najnižšou cenou) a podľa toho sa určí výsledná dekódovaná postupnosť. Cesta sa v každom kroku dekódovania môže meniť.

Príklad:

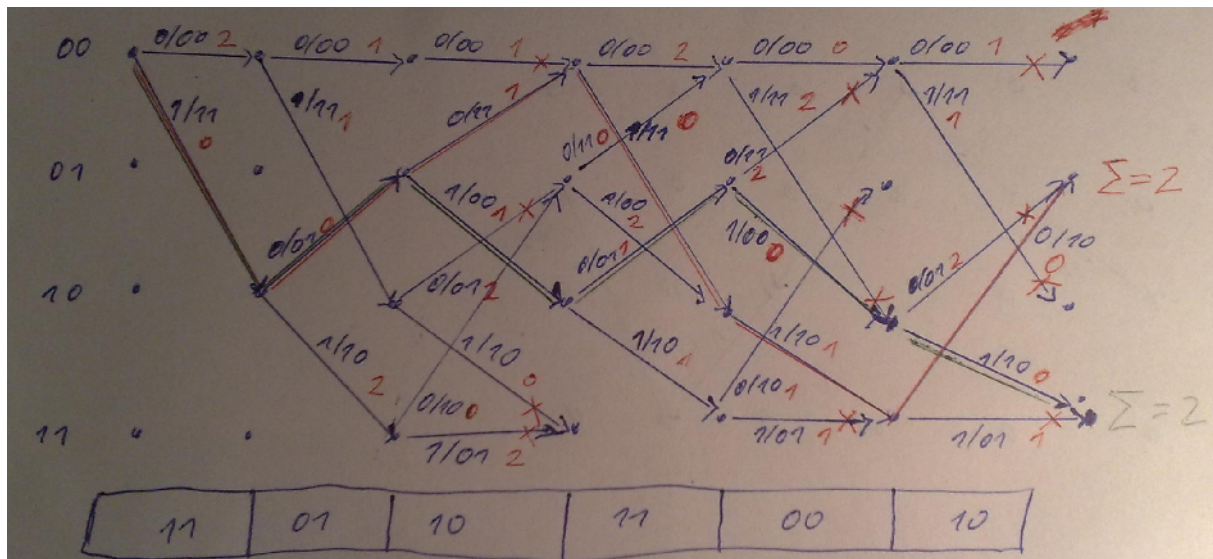
Majme informačný vektor $v = [100\ 110]$. Zakódujme ho daným kódom pomocou nakreslenej

mriežky. Dostaneme cestu v mriežkovom grafe pod a nasledujúceho obrázku.



Kódové slovo môžeme od íta z ísel za lomítkom. Dostaneme postupnos reprezentujúcu vyslané kódové slovo $w = [11\ 01\ 11\ 11\ 10\ 10]$.

Predpokladajme, že sa kódové slovo pokazilo a vznikli dve chyby. Prijíma prijal pokazenú kódovú postupnos $w = [11\ 01\ 10\ 11\ 00\ 10]$. Chyba teda nastala na 6. a 9. mieste. Skúsme tieto chyby opraviť pomocou Viterbiho algoritmu. Proces dekódovania je zobrazený na nasledujúcom obrázku.



červené čísla za dvojicou reprezentujúcou vstupný bit a výstupnú postupnosť označujú cenu

danej cesty. Je to počet bitov v ktorých sa výstupná postupnosť líši od prijatej postupnosti (tá je zobrazená dole pod obrázkom). Predpokladajme, že maximálne nastali tri chyby. Každú cestu, ktorá je drahšia alebo rovná trom teda škrtneme. Takýmto procesom sa dopracujeme k dvom možným výsledným postupnostiam zobrazeným červenou (správna cesta) a zelenou (alternatívna cesta) farbou. Tieto cesty majú rovnakú cenu a to 2. Môžeme teda usúdiť, že nastali dve chyby, nevieme ale presne dekodovať prijatú postupnosť. Na presné dekodovanie by sme potrebovali ďalšie prijaté bity, na základe ktorých by sme sa rozhodli, ktorá cesta je lepšia.

Dekódovanú postupnosť vieme odčítať ako postupnosť čísel pred lomítkom. Z červenej cesty dostaneme postupnosť $v = [100 \ 110]$ a zo zelenej cesty dostaneme $v = [101 \ 011]$. Vidíme, že prvá postupnosť je tá, ktorú sme odoslali.