

Prednáška 3

Metódy prenosu v prístupových sieťach

Na úvod je potrebné si vymenovať niektoré základné parametre charakterizujúce digitálny prenos, zopakovať si vzťahy medzi nimi, ako aj jednotky, v ktorých sa vyjadrujú. Zavedieme tiež symboliku, ktorú budeme používať.

- *Prenosová rýchlosť* v_p vyjadruje prenos určitého objemu informácie za čas. Ako jednotky sa pre jej vyjadrenie používajú bity za sekundu (bps) alebo ich násobky, pričom predpony kilo, Mega a Giga znamenajú to, na čo sme zvyknutí. Takže:

$$1 \text{ Gbps} = 1000 \text{ Mbps} = 1000 \text{ 000 kbps} = 10^9 \text{ bps}$$

$$1 \text{ Mbps} = 10^6 \text{ bps}$$

$$1 \text{ kbps} = 10^3 \text{ bps}$$

Rýchlosť je vždy limitovaná vlastnosťami prenosového prostredia. Jednou z týchto vlastností pri digitálnom prenose je obmedzená *šírka frekvenčného pásma*. V literatúre si možno všimnúť, že pojmy prenosová rýchlosť alebo *informačná kapacita* (čo nemusí byť to isté, ale vyjadruje sa v rovnakých jednotkách) sa bežne zamieňajú veličinou *šírka pásma*, s jednotkami [bps, kbps a pod.]. Neskôr si uvedieme vzťah, medzi prenosovou rýchlosťou a frekvenčnou šírkou pásma, ktorý poukazuje na to, že ani veľkosťou svojej hodnoty sa tieto veličiny nemusia rovnať.

- *Modulačná rýchlosť* v_m , často nazývaná tiež *symbolová rýchlosť*, predstavuje počet digitálnych symbolov, znakov, prenesených za určitý čas, a vyjadruje sa v symboloch/sek. alebo tiež v [Bd] (Baud; čítaj bód). Keďže digitálny symbol sa vyjadruje určitým počtom elementárnych digitálnych znakov (nóla a jednotiek), čiže bitov, pri danom počte N bitov na symbol môžeme získať až 2^N rôznych symbolov (abeceda symbolov, kódová abeceda, alebo jednoducho kód). Keďže pri digitálnej modulácii sa často jedná o vyjadrenie okamžitej fázy vektora nosnej vlny – stavu nosnej vlny (pri určitej frekvencii), symbol sa nazýva tiež *stav*.

Z uvedeného vyplývajú vzťahy medzi v_p a v_m :

N ... počet bitov na symbol; máme N -miestny kód; M ... maximálny počet symbolov kódovej abecedy, alebo stavov danej nosnej

$$M = 2^N \text{ [symbols]}$$

$$N = \log_2 M \text{ [bits]}$$

$$v_p = v_m \cdot N = v_m \cdot \log_2 M \text{ [bps; Bd]}$$

Prenosová, alebo tiež *bitová* rýchlosť je teda N -krát väčšia ako symbolová rýchlosť.

Pri prenose v základnom pásme (napr. pri prenose hlasu je základné pásmo od 0 do 4 kHz) sa *minimálna frekvenčná šírka pásma* f_m odhaduje tak, že $f_h = v_m$. Avšak vieme už, že kvôli rušeniu je nutné

počet stavov zvoliť menší; je nutné zabezpečiť medzi nimi určitý, aspoň minimálny odstup, aby boli pri prijíme bezchybne rozlíšiteľné. Pri rôznych prenosových prostrediach je potrebné zvoliť vhodnú metódu prenosu, aby spektrum signálu bolo čo najužšie, a pomer S/N (SNR) dodržaný aspoň na minimálnej úrovni.

Rozdelenie metód prenosu digitálneho signálu

Metódy prenosu rozdeľujeme podľa niekoľkých hľadísk. Rozlišujeme prenos:

- v základnom pásme: linkové kódy (AMI, HDB3, 2B1Q)
- v preloženom pásme: modulované signály, resp. digitálne modulácie (PSK, QAM, CAP, DMT)

Využitie dostupnej šírky spektra je možné:

- využitím viacstavového kódu, alebo moduláciou
- použitím viacerých paralelných prenosových ciest (tzv. *inverzný multiplex*)

Zrovnomenenie hustoty výkonového spektra sa dosiahne *scramblovaním* (pomocou pseudonáhodnej postupnosti, čím vznikne nová pseudonáhodná postupnosť).

Pri komunikácii sa spravidla realizuje *duplexný* prenos (súčasne v oboch smeroch), čo v digitálnom okruhu znamená 2 protismerné digitálne kanály. Tento duplexný digitálny prenos môže mať *symetrický* alebo *asymetrický* charakter (pri porovnaní maximálnych dátových priepustností a rýchlostí, čo tiež patrí k dôležitým špecifikáciám prenosovej metódy).

Duplexný prenos možno realizovať rôznymi spôsobmi:

- zvláštnou prenosovou cestou pre každý smer:
 - o 2 optické vlákna
 - o 2 Cu-páry (čo je 4-drôtový prenos)
- spoločnou prenosovou cestou, *zdieľanou* pomocou jednej z metód:
 - o FDM (hovoríme o FDD – frekvenčne delenom duplexe)
 - o TDM (TDD – časovo delený duplex)
 - o WDM (vlnové delenie v optických systémoch).

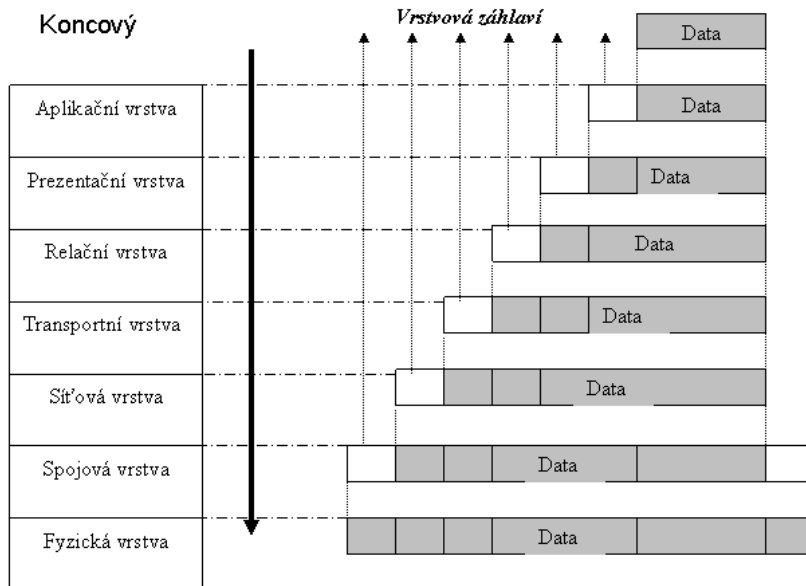
a využitím *vidlice* s potlačením ozvien (EC-hybrid – Echo Cancellation ...) pri medených vedeniach, alebo *polarizáciou vlny* pri rádiových systémoch.

Ďalej k metódam prenosu zaraďujeme aj použitie *obvodov pre zabezpečenie obnovy signálu* na prijímacej strane:

- *adaptívne filtre vo frekvenčnej oblasti*
- *adaptívne filtre v časovej oblasti*
- *kódovanie*
- *zabezpečenie proti chybám pomocou*
 - *detekčných kódov* alebo
 - *opravných mechanizmov*

Linkové kódy

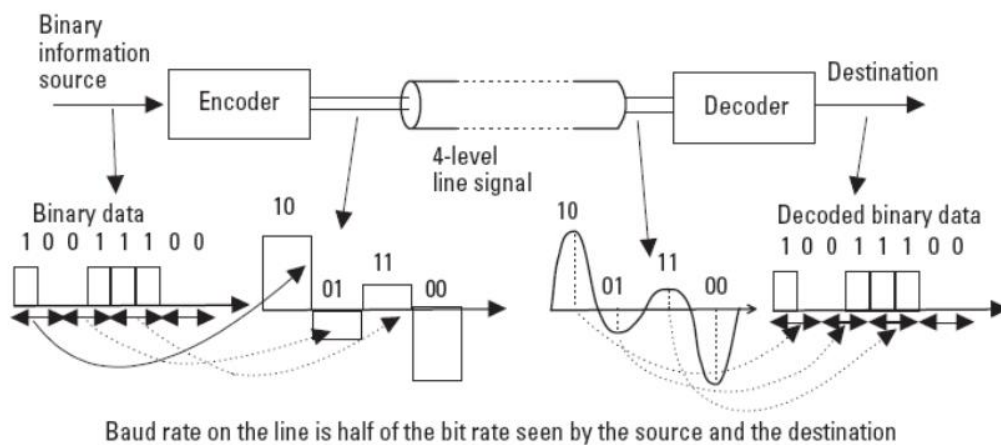
Linkový kód je vyjadrením digitálneho signálu v podobe (Obr. 2), ktorá je vhodná pre prenos v základnom pásme na fyzickej vrstve (najnižšia vrstva ISO/OSI vrstvomého modelu komunikácie; Obr. 1).



Obr.1 ISO/OSI vrstvomý model sieťovej komunikácie a organizácie dát

Z toho sa odvíjajú základné požiadavky kladené na linkové kódy. Mal by to byť

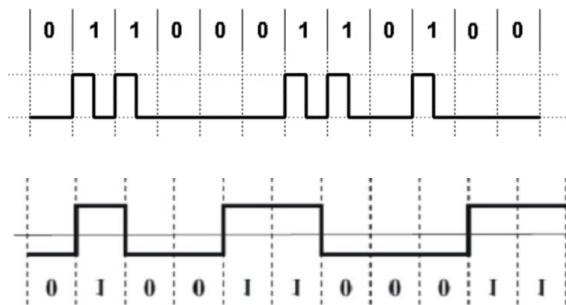
- signál bez jednosmernej zložky (z dôvodu oddeľovacích transformátorov na trase a diaľkového napájania opakovačov; prenos jednosmernej zložky si vyžaduje galvanické spojenie koncových zariadení),
- signál v oblasti nižších frekvencií,
- signál s čo najmenšou chybovosťou detekcie,
- signál s dobre obnoviteľnou taktovacou frekvenciou.



Obr. 2 Ilustrácia linkového kódovania; prenos v základnom pásme (nízke frekvencie, príp. aj jednosmerná zložka) [2].

Klasifikácia linkových kódov:

- podľa počtu úrovní: 2-úrovňové, 3-úrovňové (bipolárne – AMI, trojkové – 4B3T), viacúrovňové (2B1Q)
- podľa použitej polohy signálových prvkov: unipolárne (iba jedna polarita), polárne (2 polarity)
- skupina signálov
 - o *s návratom k nule* - RZ – Return to Zero codes; jedna z logických úrovní je vyjadrená krátkym pulzom a druhá nulovou úrovňou – unipolárny RZ, alebo každý bit je oddelený neutrálnou polohou – bipolárny RZ; ten druhý spôsob nepotrebuje taktovacie hodiny, no zaberá väčšiu šírku pásma napr. oproti NRZ; signálny prvok má šírku menšiu ako T_0
 - o *a bez návratu k nule* (NRZ - Non Return to Zero- okrem polohy pre „1“ a „0“ nemajú žiadnu tretiu, neutrálnu polohu signálu); signálny prvok zaberá celú periódu T_0 (Obr. 3).



Obr.3 Linkový kód s návratom k nule (hore) a bez návratu k nule

Špecifikácie niekoľkých vybraných linkových kódov

AMI - Alternate Mark Inversion

AMI je bipolárny kód, ktorý sa využíval napr. v časovom multiplexnom systéme PCM30/32 (30 dátových + 2 riadiace kanály v základnom časovom rámci). Používa 3 úrovne, a to nasledovným spôsobom: „0“ - 0 V

„1“ - $\pm U_0$ [V] (Obr.4). Napätové úrovne dvoch logických jednotiek nasledujúcich za sebou (aj keď sú medzi nimi nuly) musia byť opačné. Ak nasledujú za sebou 2 impulzy s rovnakou polaritou, je to chyba a systém to ľahko vyhodnotí.

Pri menšom počte núl za sebou takýto kód zabezpečuje synchronizmus bez špeciálneho taktovacieho priebehu. Vyšší počet núl (napr. vyšší ako 3) je však už z tohto pohľadu problém. Ďalšie kódy sa tento problém snažia rôznym spôsobom riešiť.

HDB3 – High Density Bipolar of order 3

Kód HDB3 (Obr.4) je príkladom zlepšenia oproti AMI. Ak sa v signáli nachádza väčší počet núl za sebou ako 3, tie ďalšie sa nahrádzajú tzv. *narušiteľskými bitmi* (*violation bits*). Prvý narušiteľský bit má rovnakú polaritu ako posledná „1“, čo systém rozpozná.

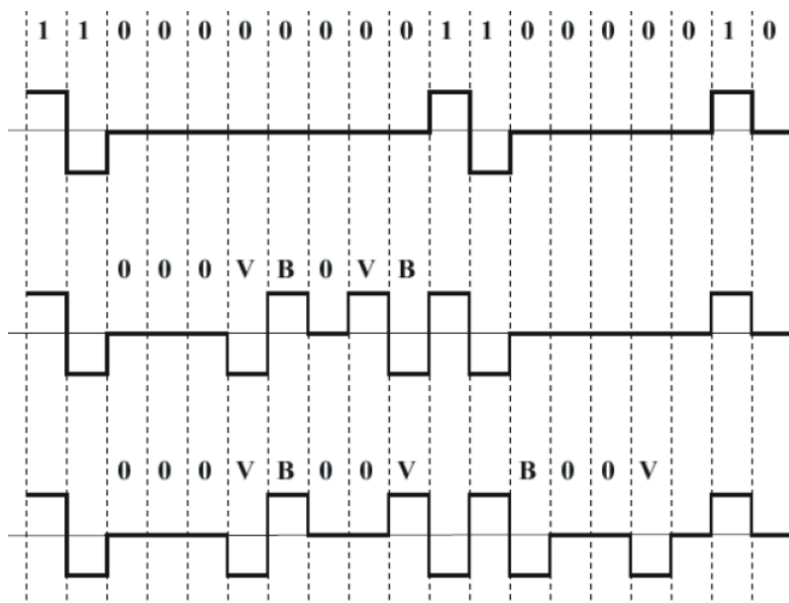
Pri AMI aj HDB3 jeden vstupný prvok predstavuje zároveň 1 symbol kódu, takže môžeme povedať, že $v_m=v_p$. Kód HDB3 je oproti AMI modernejší; dokáže lepšie zachovať synchronizáciu.

Podobným spôsobom ako v HDB3 sa synchronizmus snažia zachovať aj v amerických kódach B6ZS (Bipolar with 6-Zeros Substitution) a B8ZS (Obr.4).

Bipolárny AMI

B8ZS

HDB3



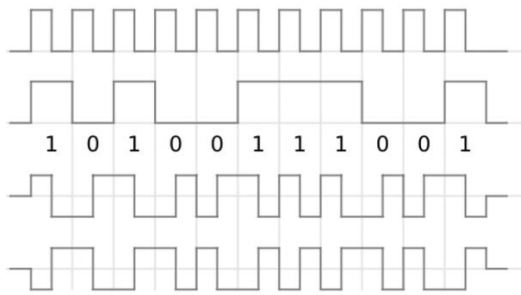
Obr. 4 Ukážky linkových kódov a spôsobu riešenia dlhšej postupnosti núl. (V ... Violation bit)

Dvojúrovňové bipolárne NRZ-kódy sú kódy Manchester a CMI (Coded Mark Inverted).

Sú príkladom, kde $v_m=2 v_p$, pretože 1 dátový symbol je tu vyjadrený dvoma signálovými úrovňami (Obr. 5 a 6), keďže prechod signálu medzi úrovňami $+U_0$ a $-U_0$ sa realizuje uprostred charakteristického intervalu T_0 .



Obr. 5 Kód CMI



Obr. 6 Kód Manchester podľa G.E.Thomasa (tretí priebeh zhora) a podľa IEEE 802.3 (štvrtý priebeh).

Tieto kódy sú však zároveň „samosynchronizovateľné“, neobsahujú jednosmernú zložku, a pri prenose týchto kódov môžu byť oba konce linky galvanicky oddelené.

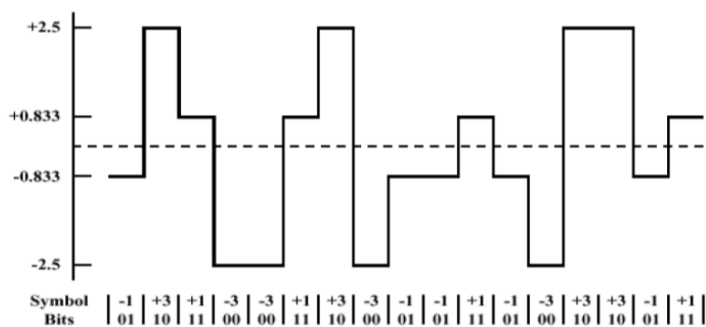
Presnejší opis je ilustrovaný na obrázkoch. Manchester kódy sa využívali na magnetické digitálne záznamy (pásky, bubny), v starších ethernetových štandardoch (10 Base-T LAN), dnes sa používajú ešte v spotrebných IR-protokoloch (IR – Infra Red - diaľkové ovládanie), v RFID (Radio Frequency IDentification – elektronické označovanie a identifikácia tovarov a pod.) a „near-field“ komunikácii (komunikácia zariadení umiestnených v tesnej vzájomnej blízkosti). CMI kód sa využíval v európskom TDMA - hierarchickom systéme PDH na úrovni rámcov 4. rádu (PDH-E4 – Plesiochronous Digital Hierarchy, E4 frame).

Kód 2B1Q (Two Binary-One Quaternary)

Kód 2B1Q a ďalšie viacstavové kódy vznikli v snahe znížiť modulačnú rýchlosť v_m použitím viacerých stavov. Nižšia modulačná rýchlosť má nižší nárok na šírku frekvenčného pásma (užšie frekvenčné pásmo). Opis kódu vysvetľuje Tab. 1. a Obr. 7.

Tab.1 Opis kódu 2B1Q

Symbol (binárne číslo)	1. bit (polarita)	2. bit (polarita)	Quaternárny symbol (jeden zo štyroch)	Napätie [V]
10	1	0	+3	2.5
11	1	1	+1	0.833
01	0	1	-1	-0.833
00	0	0	-3	-2.5



Obr. 7 Opis kódu 2B1Q. Napríklad quaternárny symbol +3, ktorý môže predstavovať a prenášať dvojicu bitov 1,0, je na fyzickej vrstve reprezentovaný napätím +2,5 V.

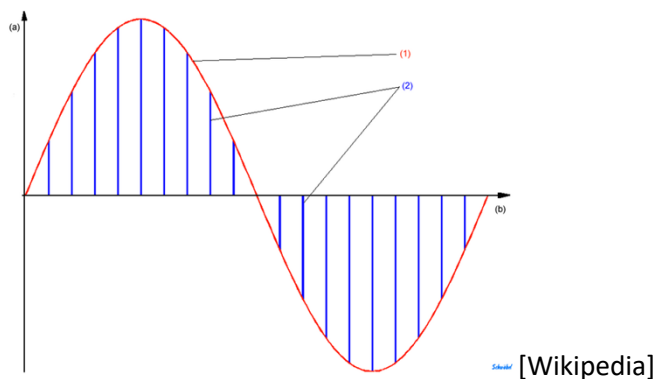
Tento kód je štandardizovaný pre rozhranie U základnej prípojky ISDN (BRA) a prípojky HDSL.

V tomto prípade platí: $M=4$; $v_p=2 v_m$; $v_m=(1/2) v_p$. Šírka pásma oproti AMI je polovičná .

V snahe o ušetrenie šírky pásma, resp. jeho lepšie využitie sa vyvíjali kódy s vyšším počtom stavov elektrickej veličiny. K *viacstavovým metódam prenosu v základnom pásme* patrí modulácia PAM.

PAM (Pulse Amplitude Modulation)

Pulzná amplitúdová modulácia na prenos 5, 8 alebo aj 16 stavov na fyzickej vrstve využíva „vzorky“ nízkofrekvenčnej napäťovej vlny odobraté v presne definovaných fázach (Obr. 8).



Obr. 8 Ilustrácia princípu PAM (vzorky nosnej vlny reprezentujú rôzne, viac-menej ľahko odlíšiteľné stavy elektrickej veličiny na fyzickej vrstve)

Komunikačný štandard Ethernet 100 BASE-T2 využíva 5-úrovňovú PAM-moduláciu pri 25 megapulzoch za sekundu cez 2 páry vodičov. Pre potlačenie medzisymbolovej interferencie medzi netienenými párami sa využíva špeciálna technika. Neskoršie sa prešlo na 4-párový prenos x 125 MB/s (1000 BASE-T, t.j. Gigabit Ethernet, 1 Gbps) stále s 5-stavovou PAM na každom páre.

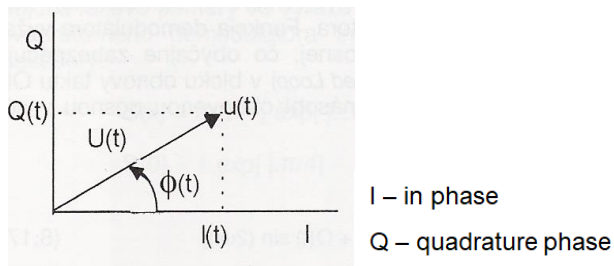
Digitálne modulácie - metódy digitálne prenosu v preloženom pásme

Pre prenos digitálneho signálu v *preloženom pásme* sa používajú digitálne modulácie založené na ovplyvňovaní fázy, frekvencie a amplitúdy *nosnej* (nosnej harmonickej vlny). Keďže ide o moduláciu diskretným signálom zloženým iba zo symbolov „0“ a „1“, hovoríme tiež o „*klúčovaní*“ (*keying*).

Najčastejšie používané digitálne modulácie sú modulácie PSK (*Phase Shift Keying* – fázová modulácia, klúčovanie) a QAM (*Quadrature Amplitude Modulation* – kvadrátúrna AM). Porovnanie niekoľkých používaných variantov PSK a QAM z hľadiska potrebnej šírky pásma pre základnú prenosovú rýchlosť $v_p = 2$ Mbps je uvedené v Tab.2. Týmto moduláciám sa hovorí tiež *vektorové*, alebo *I,Q modulácie*, keďže sa jedná o moduláciu fázy alebo aj amplitúdy zložkových *vektorov I,Q*, ktorých súčet tvorí výsledný signál (Obr. 9).

Tab. 2 Porovnanie niekoľkých používaných variantov PSK a QAM z hľadiska potrebnej šírky pásma pre základnú prenosovú rýchlosť $v_p = 2$ Mbps [Vodr./45...]

označenie	názov	Typická šírka pásma pre dig. tok 2Mbps
BPSK	Bipolárna binárna) PSK	2,8 MHz
QPSK	Quadratúrna PSK	1,4 MHz
DQPSK	Diferenčná (rozdielová) PSK	1,4 MHz
8-PSK	8 stavová PSK	0,8 MHz
4-QAM	4 stavová QAM	1,4 MHz
16-QAM	16 stavová	0,6 MHz
64-QAM	64 stavová	0,4 MHz



Obr. 9 Princíp vzniku vektorového signálu I-Q (tak sa v praxi získava stav $u(t)$ - I,Q-modulácia, kvadratúrna modulácia, vektorová modulácia). Symbol, reprezentovaný polohou $u(t)$, môže mať „ľubovoľnú“ polohu, vyjadriteľnú súradnicami $I(t)$, $Q(t)$.

Keď uvažujeme, že modulujeme amplitúdu A_c a zároveň aj fázu Φ nosnej vlny, získame modulovanú vlnu: $A_c \cos(2\pi f_c t + \Phi)$. Použijeme nasledovné úvahy:

Chceme: $A_c \cos(2\pi f_c t + \Phi)$

Keď použijeme vhodné substitúcie, t.j.

$$\alpha = 2\pi f_c t$$

$$\beta = \Phi(t)$$

a vzorec:

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos(\alpha)\cos(\beta) - \sin(\alpha)\sin(\beta),$$

dostaneme:

$$A_c \cos(2\pi f_c t + \Phi) = A_c \cos(2\pi f_c t)\cos(\Phi) - A_c \sin(2\pi f_c t)\sin(\Phi)$$

Kde použijeme ďalšie substitúcie:

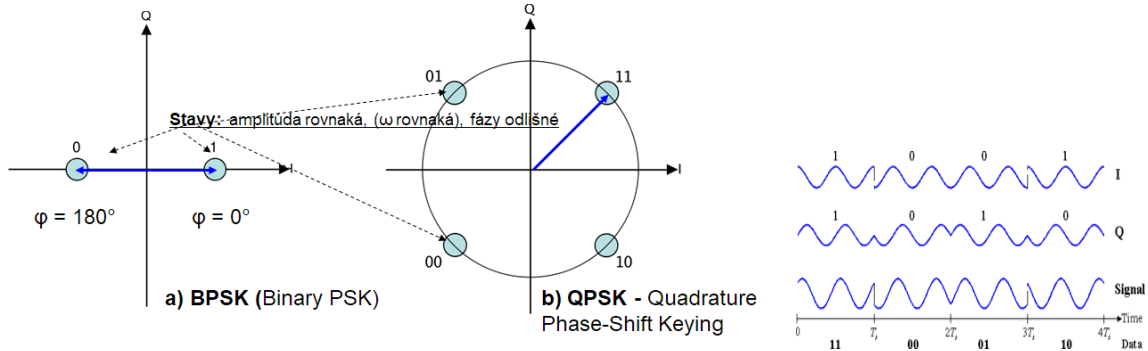
$$A_c \cos\Phi = I$$

$$A_c \sin\Phi = Q.$$

Potom harmonický priebeh môžeme predstaviť v tvare:

$$A_c \cos(2\pi f_c t + \Phi) = I \cdot \cos(2\pi f_c t) - Q \cdot \sin(2\pi f_c t)$$

Princíp PSK; 2- a 4-stavová PSK, QPSK



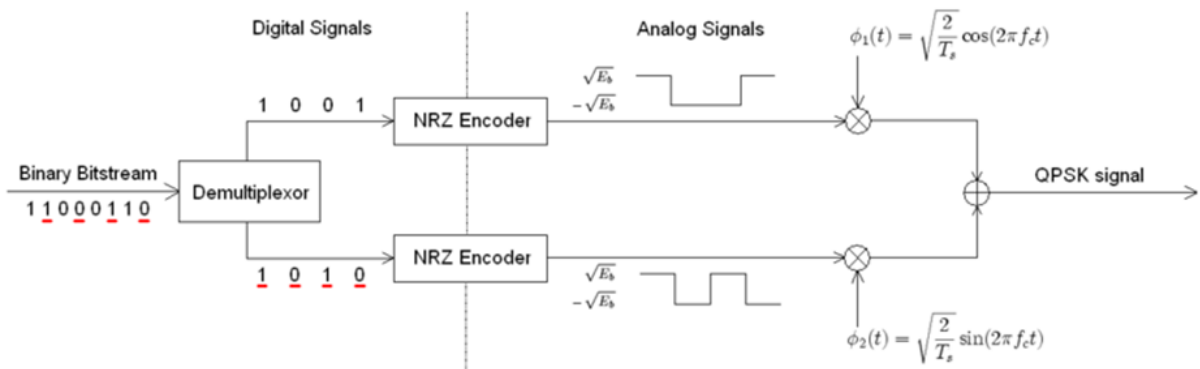
Obr.10 Porovnanie BPSK a QPSK v rovine I,Q, a časové priebehy zložiek I,Q. Dvojbittové stavy sa nazývajú *dibity*.

Treba si všimnúť, že pri PSK všetky stavy „ležia“ na tej istej kružnici so stredom v počiatku, ktorú opisuje vektor nosnej f_c uhlovou rýchlosťou $2\pi f_c$. Koncový bod vektora (*symbol*) je výsledkom okamžitej amplitúdy a fázy signálu s konštantnou ω_c :

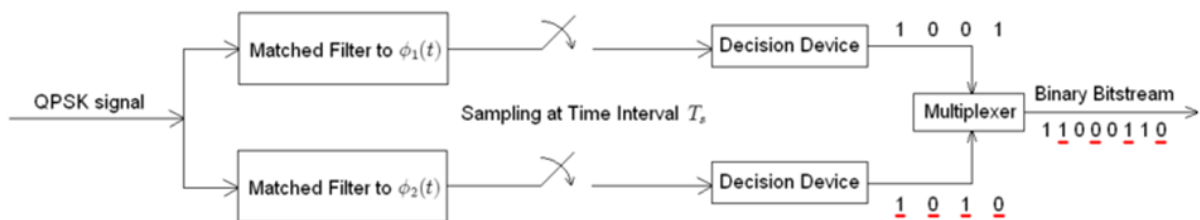
$$u(t) = U(t) \cdot \sin[\omega t + \Phi(t)]$$

Tento bod môžeme dosiahnuť súčtom dvoch zložiek s rovnakou ω , ale vzájomným posunom o $\pi/2$ (pravý uhol, kvadrátne zložky) a s amplitúdami $I(t)$, $Q(t)$:

$$u(t) = I(t) \cdot \sin(\omega t) + Q(t) \cdot \cos(\omega t).$$



Obr. 11 Vysielač QPSK

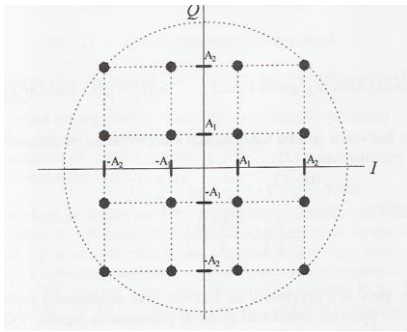


Obr. 12 Prijímač QPSK

QPSK

QPSK pri pohľade na obrázky 11, 12 je modifikáciou 4-PSK. Líši sa od nej pootočením konštelácie stavov o $\pi/4$. Touto konšteláciou je totožná so 4-QAM.

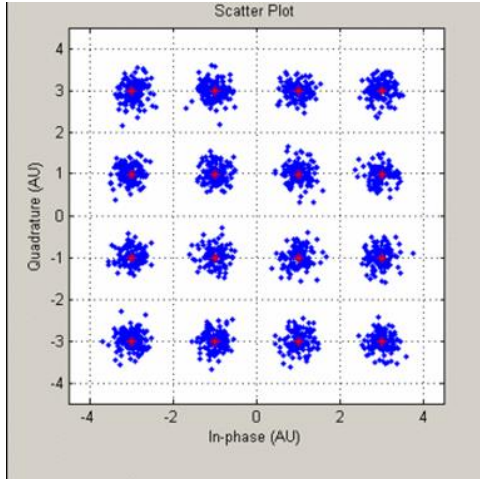
QAM



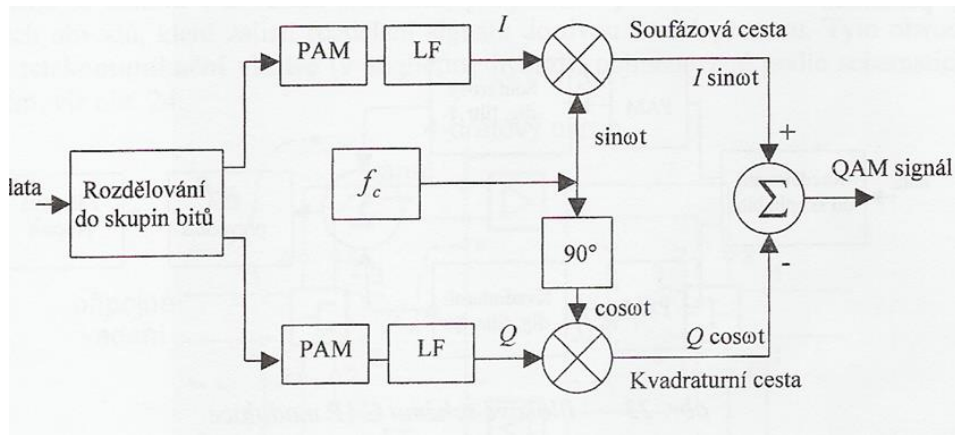
Obr.14 Znárodnenie stavov 16-QAM modulácie (o frekvencii tam nie je reč – všetky vektory „rotujú“ na tej istej frekvencii. Zobrazené bodky vyjadrujú ich stav v jednom okamihu. Pri DMT sa to isté deje na každej z mnohých nosných frekvencií, v každom subkanáli. DMT = Discrete MultiTone.)

QAM – Kvadrátúrna amplitúdová modulácia v praxi používa väčší počet stavov v porovnaní s PSK. Každý zo stavov nosnej vlny má inú amplitúdu (čím sa QAM líši od PSK) aj fázu, vid' Obr. 14. Takto sa dosiahlo ušetrenie frekvenčného spektra a zároveň zvýšenie prenosovej rýchlosti v_p .

Treba si však uvedomiť dôležitý fakt, že pri zväčšovaní počtu stavov sa zvyšuje náchylnosť signálu na rušenie (Obr.15). Je dôležité dodržiavať stanovený odstup SNR (napr. pri 16-QAM je to 21,5 dB pri konkrétnom systéme, a pri každom ďalšom bite na stav je táto požiadavka ešte o 3 dB vyššia). Preto pri voľbe počtu stavov je nutné urobiť kompromis medzi prípustnou chybovosťou (typ kodekov), prenosovou rýchlosťou a šírkou frekvenčného pásma.



Obr. 15 Rozptyl stavov IQ-modulácie v dôsledku šumu, rušení a nelinearít

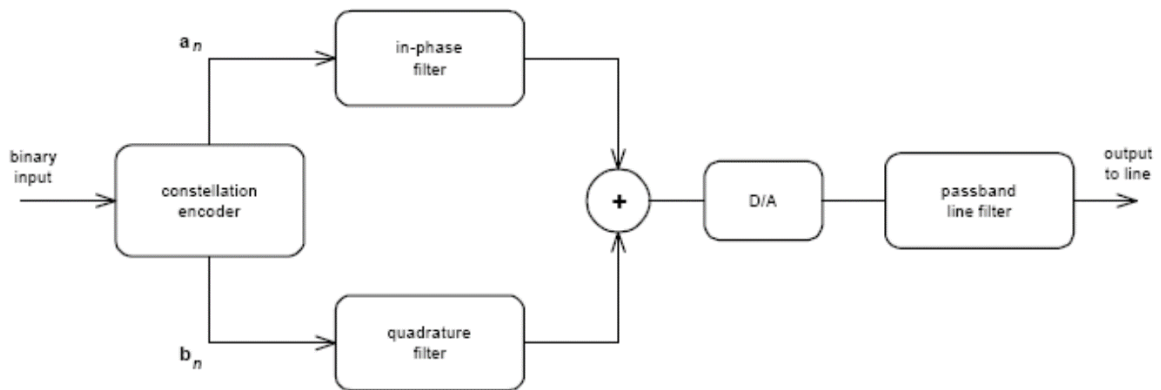


Obr.16 Bloková schéma modulátora QAM

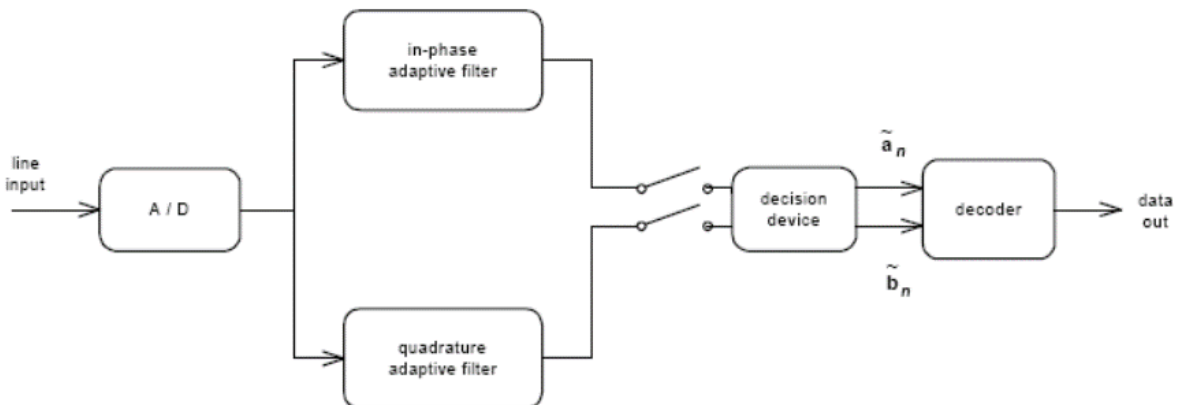
CAP - modulácia - (Carrierless Amplitude and Phase)

Názov modulácie CAP v slovenčine znie: Amplitúdová modulácia bez nosnej.

Modulácia CAP je vhodná pre *plne digitálnu implementáciu pomocou signálových procesorov*. Je podobná QAM (Obr. 18), no namiesto amplitúdy 2 nosných sa tu QAM –signál generuje pomocou kombinácie dvoch PAM signálov (Obr. 17), filtrovaných dvoma filtermi navrhnutými ako *Hilbertov pár* (t.j. ich odozvy sú ortogonálne, čiže posunuté o $\pi/2$).



Obr. 17 Princíp vysielača CAP signálu

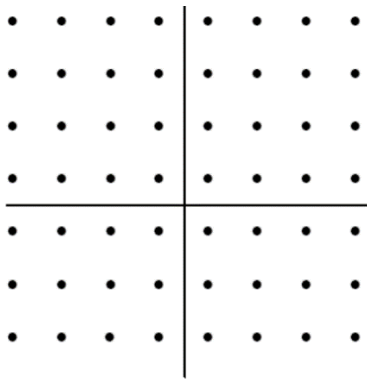


Obr.18 Princíp prijímača CAP signálu

Výstupný signál potom vzniká odčítaním oboch (filtrovaných) priebehov s následným D/A-prevodom. V časovej oblasti je vysielaný signál v tvare:

$$s_{CAP}(t) = \left[\sum_n I_n g(t - nT) \right] \cos(2\pi f_c t) - \left[\sum_n Q_n g(t - nT) \right] \sin(2\pi f_c t)$$

kde: n – číslo stavu, f_c – nosná frekvencia, I_n a $Q_n = \pm 1, 3, 5$ nezávisle na sebe



Obr.19 Typická konštelácia stavov CAP signálu (64-CAP)

Na rozdiel od QAM, tu sa nejedná o moduláciu nosnej, ale o rozdiel 2 signálov PAM v základnom pásme (nemáme prenos mnohých nosných).

Frekvencia pomyselnéj nosnej f_n vo vzťahu k symbolovej rýchlosti v_m spĺňa vzťah:

$f_n \cdot v_m = k$, kde k je celé číslo, konštanta.

Frekvenčné spektrum signálu CAP je symetrické okolo f_n a neobsahuje nízkofrekvenčné zložky.

Na prijímacej strane nie je nutné používať demodulátory. Vstupný tok symbolov prechádza analógovým filtrom DP, prevodníkom A/D, korektorom amplitúdovej a fázovej charakteristiky. Komparátory detekujú úroveň jednotlivých zložiek, a potom sa dvojzložkové symboly premenia na výstupný dátový tok.

Diskrétna multitónová modulácia – DMT

DMT (Discrete MultiTone) – modulácia patrí tiež (ako PSK a QAM) k vektorovým moduláciám (je to QAM aplikovaná na každú zo systému mnohých ortogonálnych nosných).

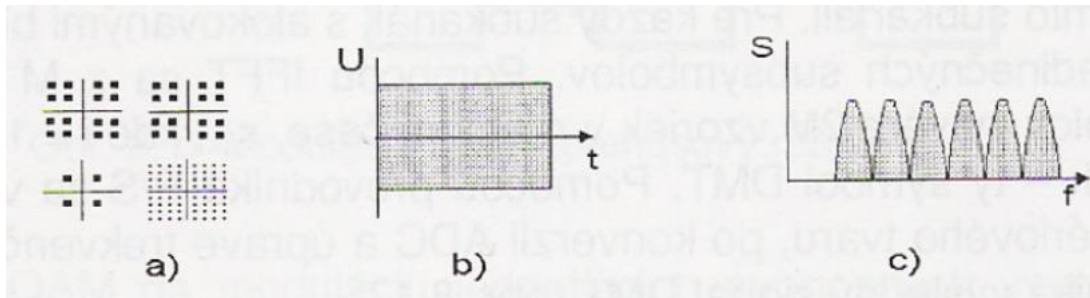
Vlastnosti DMT, a z nich vyplývajúce výhody:

- DMT-signal nezaberá súvislé široké frekvenčné pásmo, ale prenáša sa v mnohých subkanáloch, ktorých šírka nevyžaduje korekciu útlmu pri prenose,
- z rovnakého dôvodu ako vyššie ani šum sa v úzkych subkanáloch nemá možnosť uplatniť, z čoho vyplýva, že sa ľahšie dosiahne vhodný pomer S/N

Princípy: Použiteľné frekvenčné pásmo sa rozdelí na veľký počet subkanálov so šírkou rádovo v jednotkách kHz. Každý subkanál je rozložený okolo subnosnej, ktorá je modulovaná moduláciou QAM.

Keďže subnosných je veľa, každej stačí prenášať menší počet stavov (4 až 64) [3]. Nie je nutné korigovať útlmy (ekvalizáciu) jednotlivých subkanálov pri ich prenose. Pred demoduláciou sa však výkonovo všetky kanály vyrovnávajú.

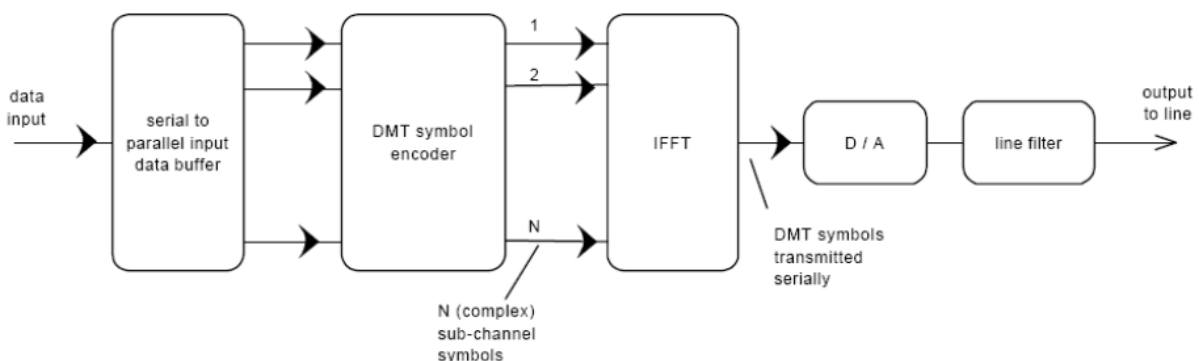
Na Obr.19 je vyobrazenie modulácie DMT v rôznych rovinách – IQ (čiže vo vektorovej rovine), v časovej a v spektrálnej (frekvenčnej). Časový priebeh DMT signálu na prvý pohľad nedáva žiadnu informáciu. Využíva sa však na získanie informácie o dodržaní / nedodržaní obmedzujúcich napäťových podmienok, pri ktorých smú vysielateľ pracovať. Signál nesmie napäťovo vstúpiť do tzv. zakázaného pásma, aby takto nespôsobil rušenie iných systémov.



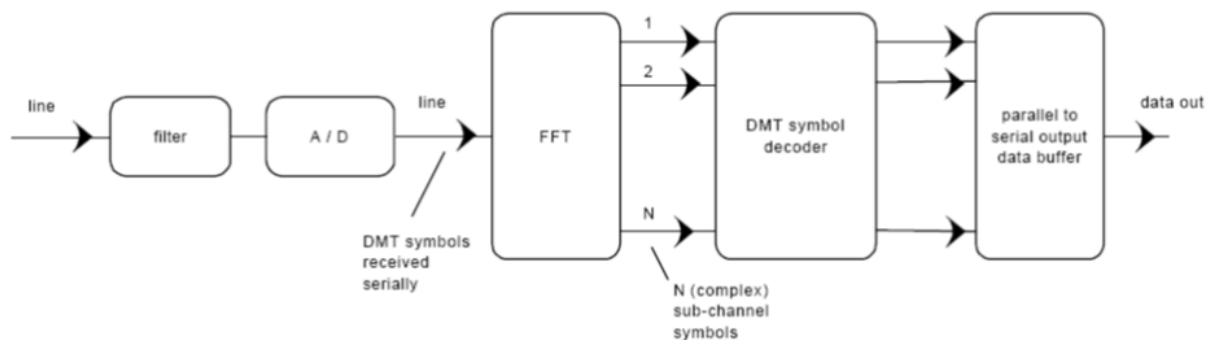
Obr.19 Rôzne formy zobrazenia signálu DMT: a) konštelčné diagramy niektorých nosných v rovine IQ, b) časový priebeh (na podľad nič nehovoriaci - súčet mnohých časových zložkových signálov), c) frekvenčné spektrum – systém mnohých nosných, navzájom ortogonálnych (OFDM) a modulovaných viacstavovou moduláciou QAM – subkanály široké cca 4 kHz alebo 8 kHz.

Problémy: Pri QAM –modulácii vznikajú postranné pásma jednotlivých subkanálov, a dochádza k ich vzájomnému rušeniu, čo sa v digitálnej oblasti prejaví a vyhodnocuje v podobe *parametra ISI* (Inter-Symbol-Interference). Ako opravný/protichybový prostriedok sa pre tento prípad dáta dopĺňajú *cyklickým prefixom* (cyklická predpona – nadbytočné bity a zároveň časové oddelenie susedných kanálov) alebo sa využíva *waveletová transformácia* (tzv. vlnková transformácia) namiesto Fourierovej. Waveletová transformácia má rádovo menšie modulačné „splodiny“. Potom hovoríme o DWMT – Discrete Wavelet Multitone.

Vysielač a prijímač DMT sú na Obr. 20 a 21.



Obr.20 Princíp vysielača DMT



Obr. 21 Prijímač DMT [1]

Porovnanie CAP (modulácia, ktorá je konkurenčná pri systémoch ADSL a VDSL):

- zložitost realizácie; vysoká výpočtová náročnosť
- výkonová náročnosť: napájanie stoviek až tisícok vysieláčov, čo predstavuje uvoľňovanie tepla a nutnosť chladenia
- vyššia latencia: z dôvodu úzkych subpásiem žiadny bit nemôže „prebehnúť“ rýchlejšie než dovoľuje 64-QAM – vid' rovnica (informačná kapacita a priepustnosť) nižšie:
- $C_i = \int_0^B \log_2 \left(1 + \frac{S(f)}{N(f)} \right) df$ [bps],

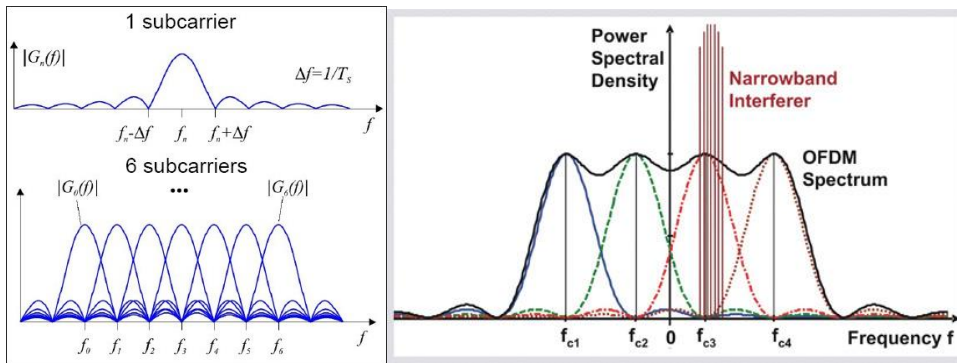
alebo pri vyrovnanom priebehu pomeru S/N (pomer signál-šum) môžeme jednoduchšie napísať (Shannon-Hartleyov vzťah):

$$C_i = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S(f)}{N(f)} \right) \text{ [bps]},$$

kde C_i je informačná kapacita v jednotkách bity za sekundu (bps), B je frekvenčná šírka pásma v Hz, S je výkon užitočného signálu vo Watoch, N je výkon šumu a rušení vo Watoch, f je frekvencia v Hz. Dátová rýchlosť a informačná priepustnosť kanála spolu úzko súvisia, a priamo závisia na frekvenčnej šírke daného kanála.

OFDM

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex - Ortoگونálny frekvenčne delený multilex) je metóda prenosu signálu v podobe FDM-systému nosných, ktoré sú navzájom ortogonálne (Obr. 22). Čiže uplatňuje sa tu Fourierova transformácia a predstava signálu vo frekvenčnej oblasti, t.j. predstava jeho frekvenčného spektra. Jednotlivé frekvenčné zložky (nosné) signálu sú generované a modulované fázovo aj amplitúdovo I-Q moduláciou, čiže QAM. Vo svojej teoretickej podstate je tento systém aj základom modulácie DMT.



Obr. 22 OFDM (zľava: amplitúdové spektrum jednej nosnej, spektrum viacerých nosných navzájom ortogonálnych, spektrálna výkonová hustota systému OFDM).

Ortogonalita signálov (funkcií) je v matematike opísaná nasledovným spôsobom:

Funkcie f, g v priestore L_2 sú ortogonálne na intervale $\langle a, b \rangle$, keď platí:

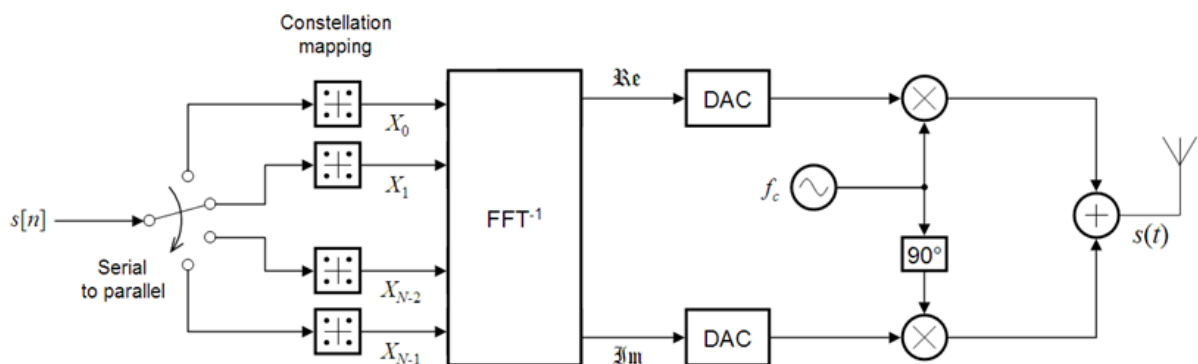
$$f \cdot g = 0$$

(skalárny súčin f, g)

Pričom podmienku pre skalárny súčin vyjadrujeme ako:

$$\int_a^b f(x)g(x) dx = 0$$

OFDM je ortogonálny systém funkcií, kde pre každú jeho dvojicu funkcií platí, že sú ortogonálne. Zjednodušená schéma vysielača OFDM je na Obr. 23.



Obr. 23 Zjednodušený vysielač OFDM

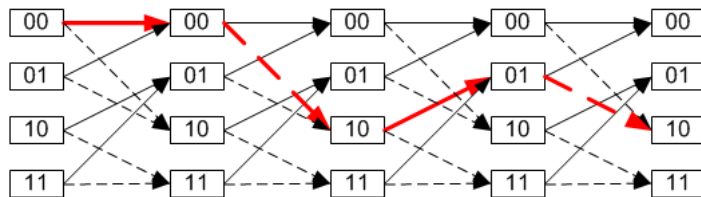
$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kt/T}, \quad 0 \leq t < T,$$

$\{X_k\}$ sú dátové symboly, N je počet subnosných, T je časový interval symbolu OFDM. Vzdialenosť medzi nosnými je $1/T$, a zaručuje ortogonalitu.

Trellisová modulácia

TCM (Trellis-Coded modulation) by sme mohli charakterizovať ako metódu 2 v 1: uskutočňuje sa tu totiž zároveň kódovanie a mapovanie symbolov (modulácia). Je to vysokoefektívna metóda prenosu informácie cez obmedzené frekvenčné pásmo (kanál), čo je aj prípad prenosu cez telefónne linky.

Túto metódu vyvinul Gottfried Ungerboeck (1982). Je vhodná pre počítačové spracovanie, poskytuje digitálny signál s protichybovými vlastnosťami: patrí ku *konvolučným kódom*, ktoré z princípu zaručujú málo chýb. *Trellis* – mriežka – je grafická ilustrácia princípu vytvárania symbolov tohto kódu, *stavový diagram* (Obr.24), a protichybovosť symbolov je tu zabezpečená dodržaním zásady veľkej "kódovej vzdialenosti" (odlišnosti) susedných symbolov kódu. Stav sa potom mapujú na nosné (M-QAM, MPSK, M-ASK).



Obr.24 Trellisový stavový diagram konkrétneho konvolučného kódera. Plná čiara – ak vstup je „0“, prerušovaná – ak vstup je „1“ . [Wikipedia].

Paketový a bunkový spôsob prenosu

Prv, než opíšeme v nadpise spomínané dva princípy prenosu, utrieme si niektoré pojmy a princípy. Vieme už, že spôsoby komunikácie z istého pohľadu môžeme rozdeliť podľa spôsobu vytvárania prenosových ciest a súčasne podľa formy prenášaných informácií. V starých telekomunikačných sieťach sa komutovaním (prepínaním, spínaním) vytvárali pevné elektrické cesty; v digitálnych sieťach dochádza už len ku komutácii „virtuálnej“, ku komutácii správ, alebo prebieha komunikácia *nespojovo orientovaná*.

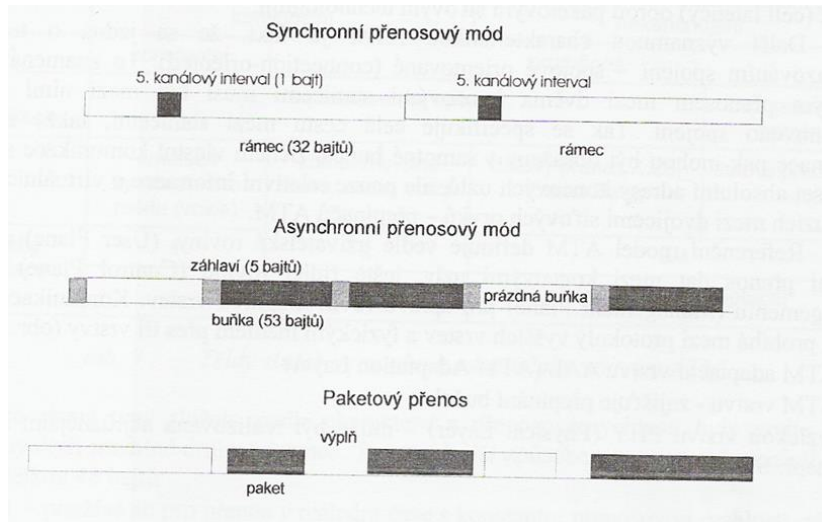
Spojovanie prebieha v 3 fázach: vytvorenie spojenia, vlastná komunikácia, zrušenie spojenia. Spojovať sa môžu rôzne elementy správ: *okruhy* (kanálové intervaly PCM), *pakety* (protokol X.25), *bunky* (ATM), rámce (Frame Relay).

Rozlišujeme, o ktorú vrstvu vrstvomého komunikačného modelu ide (prepojenie na fyzickej úrovni - typické je použitie opakovačov pre spojenie sietí s technológiou Ethernet, prepojenie na linkovej úrovni – zariadenia nazývané bridge – most, spojenie na sieťovej úrovni pomocou routerov - smerovačov paketov, spojenie na aplikačnej úrovni - gateway – brána). Ak vytvorená virtuálna cesta neslúži pre prenos celej správy, ale menšie štandardizované celky digitálnej správy sú prenášané rôznymi fyzickými aj virtuálnymi cestami, tie sú skompletované až v mieste príjmu.

Prenos *bez spojovania* sa uskutočňuje v sieťach IP (*nespojovo orientované siete služby*), teda bez fázy nadviazania spojenia a fázy rozpadu spojenia, teda bez vytvorenia logickej cesty medzi koncovými bodmi. Služby nespojovaných paketových sietí majú len jednu fázu, a to fázu prenosu dát. V nespojovanej službe je každý paket spracovaný nezávisle, a preto musí obsahovať všetky informácie nutné pre jeho vyslanie, prenos a doručenie vrátane cieľovej adresy (siete IP).

Podľa formátu organizovania dát a signalizácie pri prenose rozlišujeme *synchronne* a *asynchronne* prenosové módy. Asynchronne sú *bunkové* (obsadené a prázdne bunky) a *paketové* (pakety dát a medzery, výplň medzi nimi, všetko s rôznou dĺžkou). Asynchronný prenos umožňuje štatistické multiplexovanie, a tým lepšie využitie prenosového média.

Sú možné a známe aj rôzne kombinácie uvedených prenosových módo: SDH s prenosom ATM-buniek, ATM sieť s emuláciou okruhov PCM 30/32.



Obr. 25 Ilustrácia pre porovnanie rôznych módo prenosu

ATM – technológia s prepínaním buniek

ATM (Asynchronous transfer mode) je prenosová technológia využívaná v telekomunikačných sieťach, pri ktorej sa využíva *asynchronne časovo delené multiplexovanie*. Dáta sú rozdelené do malých paketov, zvaných *bunky*, ktoré majú konštantnú veľkosť. Tento fakt odlišuje ATM siete od Ethernetu a Internetu, ktoré používajú pakety s premenlivou dĺžkou alebo rámce. ATM protokol sa používal v sieťach ISDN (Integrated Services Digital Network) a v chrbticových systémoch SDH (Synchronous Digital Hierarchy) typu SONET (Synchronous Optical NETwork). Pokrýva 3 najnižšie vrstvy modelu OSI.

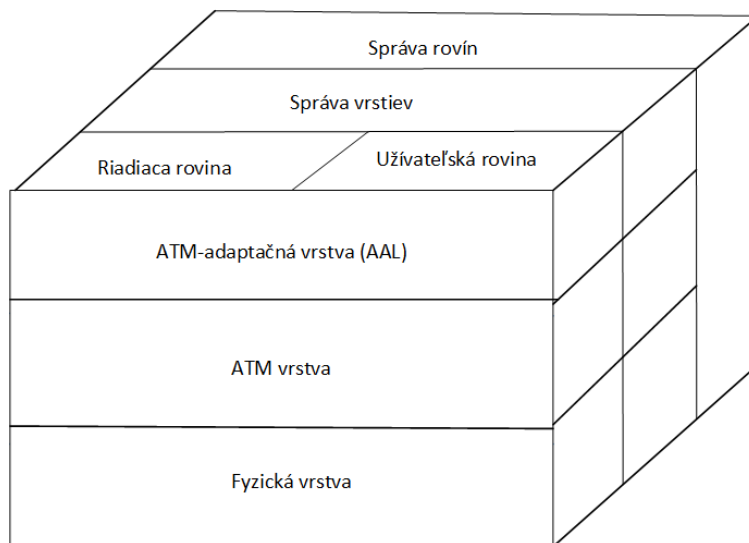
Bunky ATM majú dĺžku 53 B (= 5B záhlavie + 48 B dáta), na rozdiel od IP-paketov (desiatky kilobajtov), a pre ich prenos sa využíva *spojovo orientovaný* model (virtuálny okruh vytvorený pred začiatkom relácie). Záhlavie buniek je tvorené 5 bajtmi, obsahuje identifikáciu, riadenie, smerovanie; za ním je 48 B dát, alebo služobných dátových protokolov nad vrstvou ATM. Obsah záhlavia sa mení pri každom prechode ATM-prepínačom. Pri prenose sa zároveň aplikuje princíp „*best effort*“ (čo najrýchlejšie obsluženie všetkých užívateľov, bez spomaľujúcich procedúr zaisťujúcich spoľahlivosť; „opak“ QoS).

Systém bol zavedený organizáciami ITU + ATM Forum, používal a používa sa pre rôzne typy služieb (služby VBR - Variable-bit-rate - pre dáta, obrazové a textové súbory, a CBR - Constant-bit-rate - pre hlas, video, videokonferencie).

Bol vybraný pre B-ISDN (Broadband – širokopásmová), predstavuje univerzálny prístup k službám v spojitosti s optickými vláknami rýchlosti rádovo do jednotiek Gbps (ATM-PON, využitie WDM). ATM-bunky boli včlenené do SDH-rámcov (Synchronous Digital Hierarchy) STM-1, SONET s využitím metód TDM/TDMA.

Tab.3 Triedy služieb vo vzťahu k adaptačným vrstvám ATM

Trieda	A	B	C	D
v čase	kontinuálny		nekontinuálny	
rýchlosť	konštantná	premenlivá		
druh komunikácie	so zostavením spojenia			bez zostavenia
Typ služby a adaptácia AAL	emulácia synchrónneho módu (voice – hlas)	komprimované video, audio, hlas	dátový prenos X.25, Frame Relay	dátový prenos IP
	1	2	3/4	
			5 (jednoduchšia adaptácia)	



Obr. 26 Vrstvový referenčný model ATM

Ethernet

Ethernet je skupina počítačových technológií pre siete LAN a väčšie. Popísané sú v štandarde IEEE 802.3. Je to konkurenčná technológia ku Token-ring, FDDI (Fiber Distributed Data Interface – prenos cez optické vlákna; štandard), Arcnet (80-te roky) a dnešnej WiFi. Pre prenos v sieťach typu Ethernet sa využívali najprv koaxiálne káble, dnes krútené páry a optické vlákna (medzi switchmi a hubmi).

Dáta sú rozdelené do rámcov: užitočné dáta + adresy zdroja a cieľa, kontrola chýb (pre príp. opakovanie).

Tab. 4 Typy (rády) ethernetových technológií s použitím krútených párov [2]

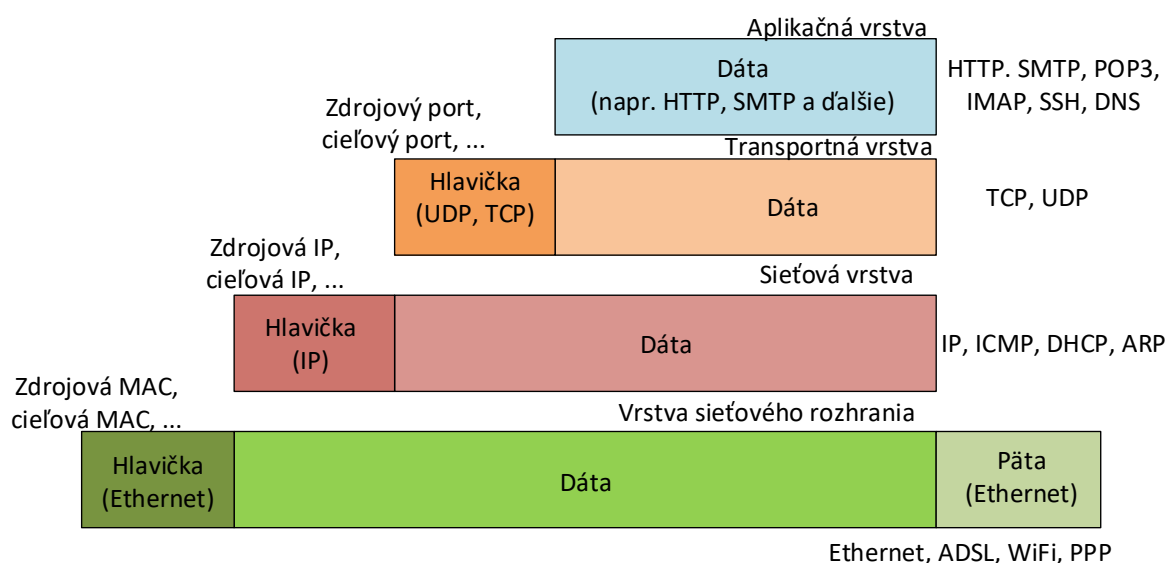
Technológia	Mód	Priepustnosť/pripojenie	Médium
1000BaseTX	Full duplex	2 x 1 Gbps	4p UTP 5
1000BaseTX	Half duplex	1 Gbps	4p UTP 5
100BaseTX	Full duplex	2 x 100 Mbps	2p UTP 5/STP
100BaseT2	Half duplex	100 Mbps	2p UTP 3/4/5
100BaseT4	Half duplex	100 Mbps	4p UTP 3/4/ 5
100BaseTX	Half duplex	100 Mbps	2p UTP 5/STP
10BaseT	Full duplex	2 x 10 Mbps	2p UTP 3/4/5

10BaseT	Half duplex	10 Mbps	2p UTP 3/4/5
---------	-------------	---------	--------------

TCP/IP siete

TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) je základná sada protokolov pre prístup k Internetu a spojenie end-to-end (paketovanie, adresovanie, vysielanie, smerovanie, prijímanie). Využíva sa tiež ako komunikačný protokol v privátnych intranetových a extranetových sieťach.

TCP/IP je organizovaný do 4 vrstiev (Obr. 27), nie celkom zhodných s vrstvami ISO/OSI, je považovaný za praktickejší a menej teoretický/vedecký než ISO/OSI.

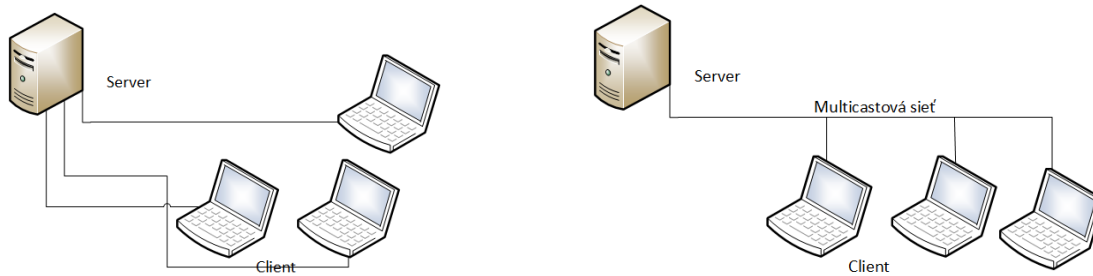


Obr. 27 Vrstvy a zapúzdrenie dát v sieti TCP/IP

Media streaming

Media streaming je metóda zdieľania a prenosu videa a/alebo hlasu v prístupovej sieti.

V počítačových sieťach je multimediálny obsah, poskytovaný v reálnom čase bez nutnosti jeho kompletného stiahnutia na zákazníckovo úložisko (streaming), zdieľaný v zásade tromi spôsobmi, ktoré sa líšia viacerými parametrami, možnosťami siete, zariadením poskytovateľa (serverom), atď. (viac na špecializovanom predmete, venovanom len technológiám počítačových sietí). Sú to: technológia unicast (Obr. 28), multicast a broadcast. Posledná zo spomínaných je používaná najväčším počtom klientov, bez možnosti spätnej väzby. Broadcastové šírenie signálu sa používalo aj v analógových špecializovaných sieťach, ako sú rozhlasové a televízne siete, ktoré zatiaľ ešte pretrvávajú v istom rozsahu aj pri poskytovaní digitálneho signálu. Pri rýchlom napredovaní vývoja sieťových technológií a zariadení ako sieťových tak klientskych však špecializované siete vo svojej pôvodnej podobe a funkcii počítačovým sieťam značne ustúpili, a tento trend stále pokračuje.



Obr. 28 Media streaming (strímovanie multimédií – hudby, videí, a pod.); vľavo unicast, vpravo – multicast.

Kandidátske metódy prenosu pre 5G komunikáciu:

V mobilnom prístupe k širokopásmovým službám sa aktuálne (r. 2018) využíva technológia LTE-Advanced (pokročilá LTE – Long Time Evolution – „pomalý vývoj“), označovaná ako generácia 4G. Označenie 4G zodpovedá pritom ITU-štandardu, definovanému pomocou hraničných parametrov ešte predtým, než bola táto technológia technicky realizovaná a spustená v praxi.

Na generáciu 5G sa ešte len čaká, pričom sa, samozrejme skúmajú a vyvíjajú viaceré možnosti, ktoré by napríklad efektívnejšie využili dostupnú frekvenčnú šírku pásma, poskytli vyššie dátové rýchlosti aj pri vysokej mobilite účastníkov, pri vyššej bezpečnosti dát a efektívnejšej spotrebe energie, atď. Medzi spomínané viaceré smery vývoja môžeme zaradiť nižšie uvedené technológie, ktoré sa snažia naplniť aspoň jeden, skôr však súčasne viacero z vytýčených cieľov. Sú to technológie:

- a) FBMC – Filter Bank based Multi Carrier – banka filtrov subnosných vln modulovaných QAM
- b) BFDM – Biorthogonal Frequency Division Multiplexing – dlhé symboly; vhodné pre náhodný prístup
- c) FMC – Universal Filtered Multi-Carrier – kombinácia OFDM a FBMC – ortogonalita v rámci frekvenčných blokov, nie však medzi nimi; filtrácia blokov alebo subpásiem
- d) GFDM – Generalized Frequency Division Multiplexing – tiež systém subnosných, ale bez ortogonalita; banka filtrov v digitálnej implementácii (slabé vyžarovanie mimo pásma), menší PAPR (parameter: pomer špičkového a stredného výkonu), kratší CP (Cyclic Prefix)

Ďalšie uvažované špecifikácie 5G:

- využitie bielych pásiem – uvoľnených televíziou (približne od 470 do 800 MHz)
- využitie mm-vln (až do 100 a viac GHz, v súčasnosti do cca. 30 GHz) – nárok na LOS (Line-of-Sight – priama viditeľnosť), avšak lepšia smerovosť antén (vyšší zisk) a priestorové potlačenie interferencií
- možnosť využiť systémy viacerých antén (malých rozmerov; antenna array) s elektronickým riadením vyžarovacieho zväzku (beamforming)
- MIMO – diverzitné vysielanie a príjem (systém Multiple Input – Multiple Output – viac prijímacích a vysielacích antén aj obvodov; a rôzne variácie: MISO, SIMO, ...)
- kooperatívne režimy činnosti

DOPLNKOVÁ A REFERENČNÁ LITERATÚRA

- [1] http://www.nextep.com.au/upload/DSL_Modulation_Techniques.pdf
- [2] T. Anttalainen: Introduction to Telecom. Network Engineering, Norwood (USA - MA), 2003.
- [3] Vaculík: Prístupové siete. ŽU v Žiline, 2000.
- [4] J. Vodrážka: Přenosové systémy v přístupové síti. ČVUT, 2003.
- [5] www.ktl.elf.stuba.sk/~oravec/foлие/Linkove%20kody.pdf
- [6] V. Žalud: Rádiové komunikační systémy 5G. Sdělovací technika 09,10,11/2014.