

Techniky kódování signálu

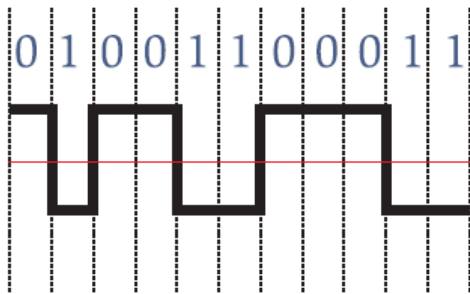
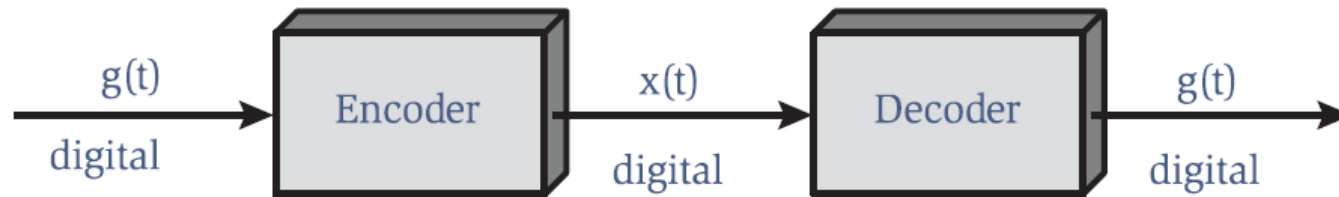
O čem přednáška je?

2

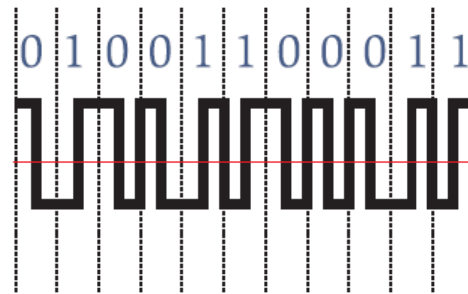
- děje na fyzické vrstvě spoje
 - ▣ kódování digitálních dat do digitálního signálu
 - ▣ kódování digitálních dat do analogového signálu
 - ▣ kódování analogových dat do digitálního signálu
 - ▣ kódování analogových dat do analogového signálu
- jak kódování probíhá?
- kdy lze kterou formu kódování použít?
- jaké mají uvedené formy kódování vlastnosti?

Digitální data na digitální signál

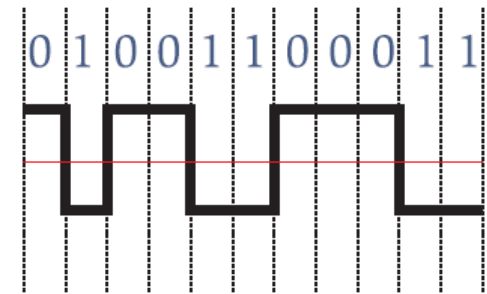
3



NRZ-L
data v počítači



Manchester
přenos Ethernetem



NRZ-L
data v počítači

Digitální data na digitální signál, 2

4

- přijímač musí rozpoznat, kde **signálové prvky**, tvořící kdy digitálních dat, začínají a končí
- přicházející signál musí být možné vzorkovat **prvek** signálu **za prvkem** signálu
- přijímač musí rozpoznat **hodnoty prvků** signálu
 - ▣ ty dekóduje do bitů
- čím **rychleji** se vysílá, tím má přijímač méně času na rozpoznávání
- čím **silněji** se vysílá, tím se také zvyšuje úroveň šumu
 - ▣ rozhodující roli hrají SNR, rychlost přenosu a šířka pásma

Výběr kódování

5

- spektrum signálu
- odstranění složek s vysokou frekvencí
- stejnosměrná složka
- imunita vůči interferenci signálu a šumu
- cena a složitost kódování

Orientační klasifikace kódovacích schémat

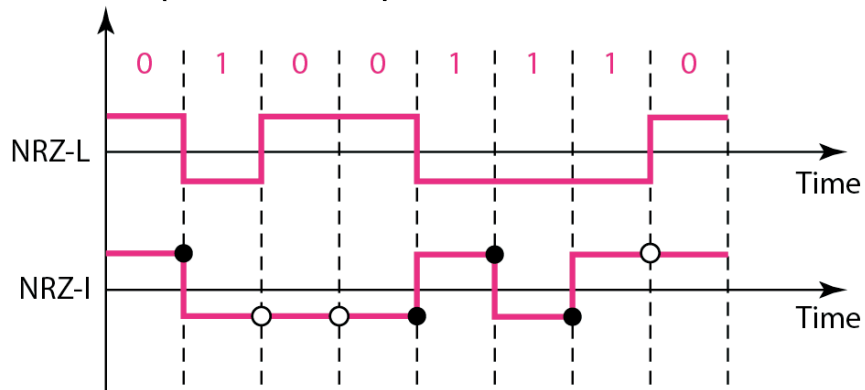
6

- unipolární kódování – NRZ
- polární kódování – NRZ-L, NRZ-I, RZ, dvoufázové (Manchester, diferenciální Manchester)
- bipolární kódování – AMI, pseudoternary
- víceúrovňové (multilevel) kódování – 2B/1Q, 8B/6T, ...
- vícepřechodové (multitransition) kódování – MLT-3
- blokové kódování – 4B/5B, ...

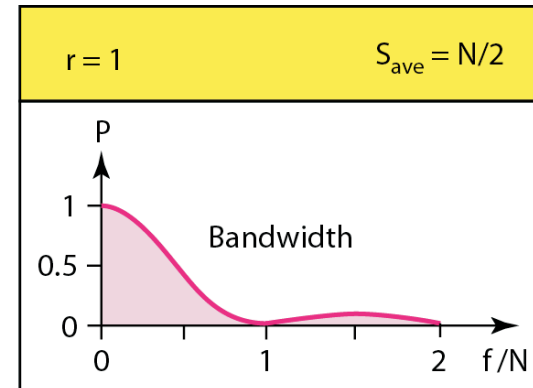
Polární kódování, NRZ kódy

7

- NRZ-L (Level), 1/0 – kladná/záporná amplituda
- NRZ-I (Inverted), 1/0 – změna/žádná změna



○ No inversion: Next bit is 0 ● Inversion: Next bit is 1

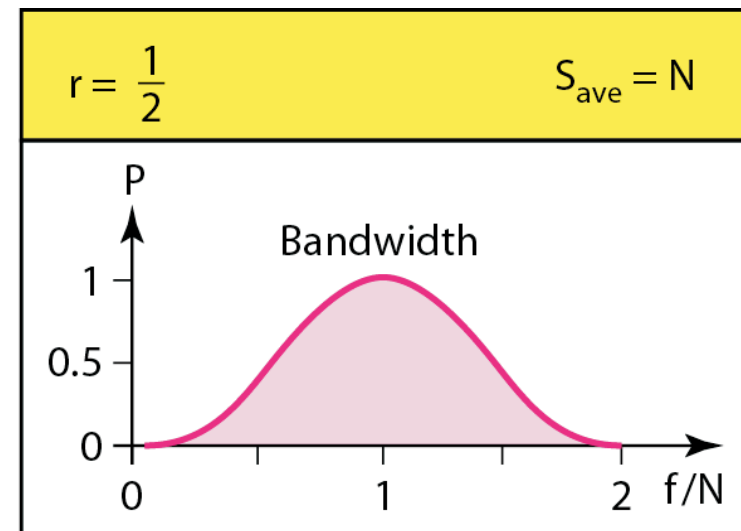
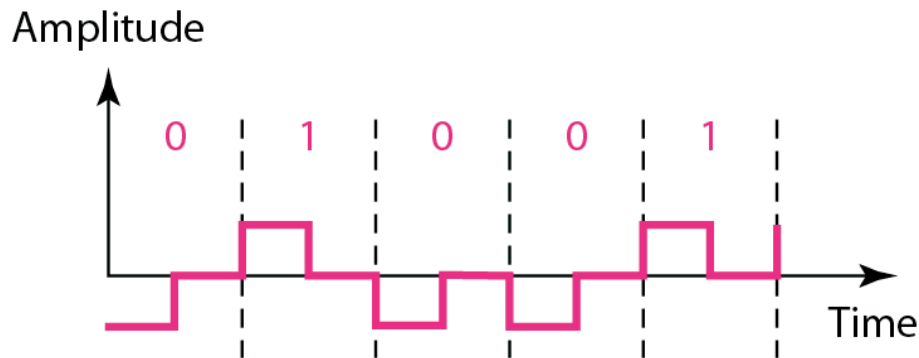


- problémem je vymezení časové hranice bitů
- kumulují stejnosměrnou složku
- pro přenos se užívají zřídka a jen na krátké vzdálenosti
- průměrná baudová rychlost je $N/2$, kde N je bitová rychlost

Polární kódování, RZ, Return to Zero

8

- 0/1 – záporná/kladná amplituda v polovině bitového intervalu
- autosynchronizace, eliminace stejnosměrné složky
- baudová rychlost > bitová rychlost



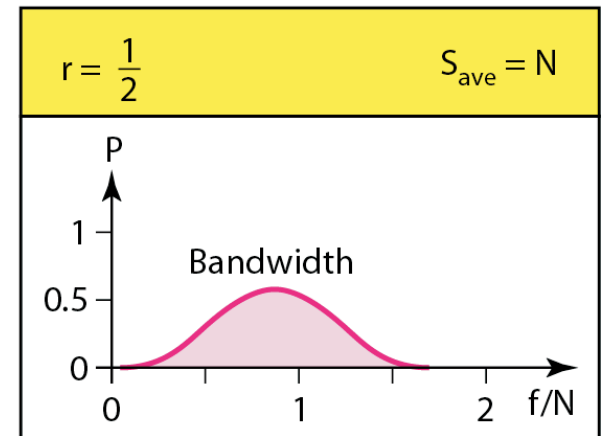
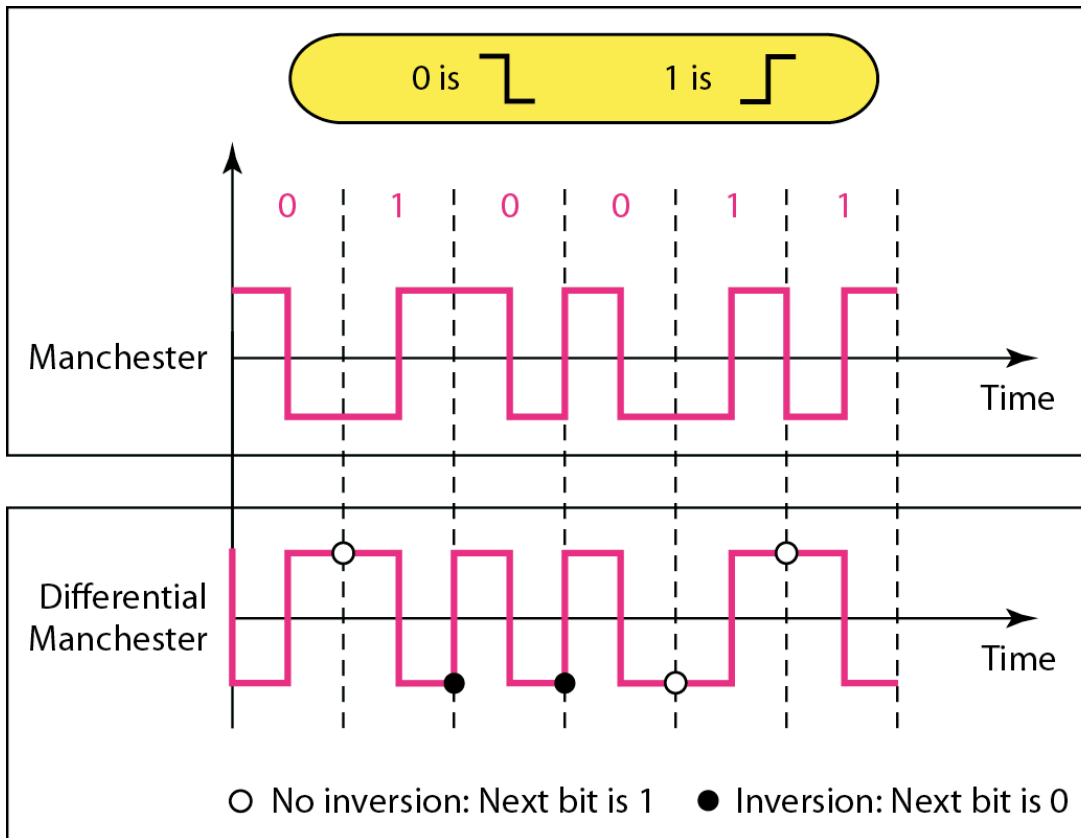
Polární kódování, Manchester

9

- Manchester
 - ▣ 0 – přechod vysoká-nízká hodnota signálu
 - ▣ 1 – přechod nízká-vysoká hodnota signálu
- diferenciální Manchester
 - ▣ 0 – přechod na začátku bitového intervalu
 - ▣ 1 – absence přechodu na začátku bitového intervalu
- modulační rychlost je dvojnásobná než datová
- přechody uprostřed bitového intervalu zajišťují synchronizaci
- nekumuluje se stejnosměrná složka
- používají se pro ukládání dat na magnetická média a v LAN

Polární kódování, Manchester, 2

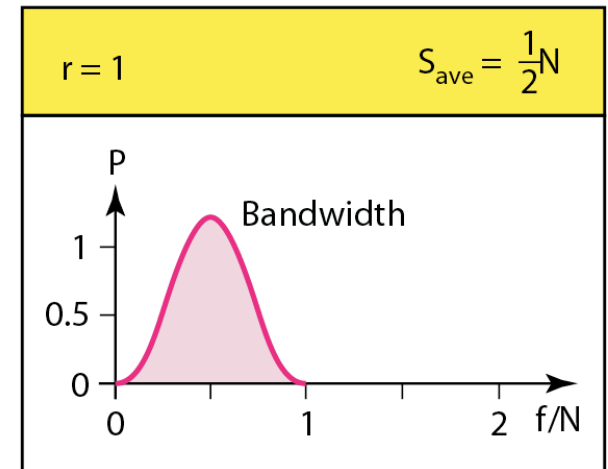
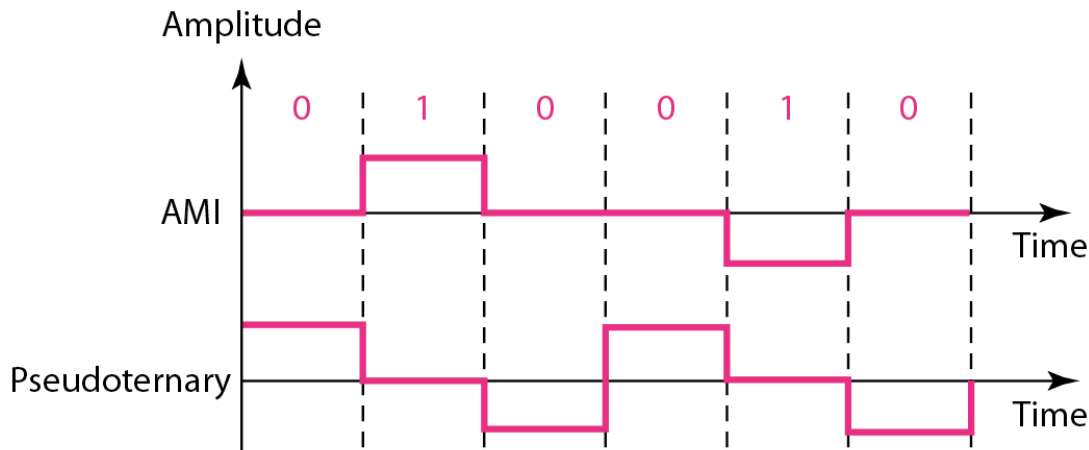
10



Bipolární kódování, AMI

11

- **Bipolar-AMI**, Bipolar Alternate Mark Inversion
 - ▣ 0 – žádný signál, 1 – alternující změna polarizace amplitudy
 - ▣ alternativa k NRZ, většina energie okolo $N/2$
 - ▣ při ztrátě jedniček se neztratí synchronizace
 - ▣ nekumuluje se stejnosměrná složka



Víceúrovňová kódovací schémata, mBnL

12

- mBnL
 - m – délka binárního vzoru
 - B – Binary
 - L – počet úrovní signálu, L^n signálových prvků
- místo L se často používá písmeno indikující počet úrovní
 - B pro $L=2$, binary
 - T pro $L=3$, ternary
 - Q pro $L=4$, quaternary
- musí platit $2^m \leq L^n$
 - prvky signálu nevyužité pro přenos dat lze využít pro eliminaci stejnosměrné složky

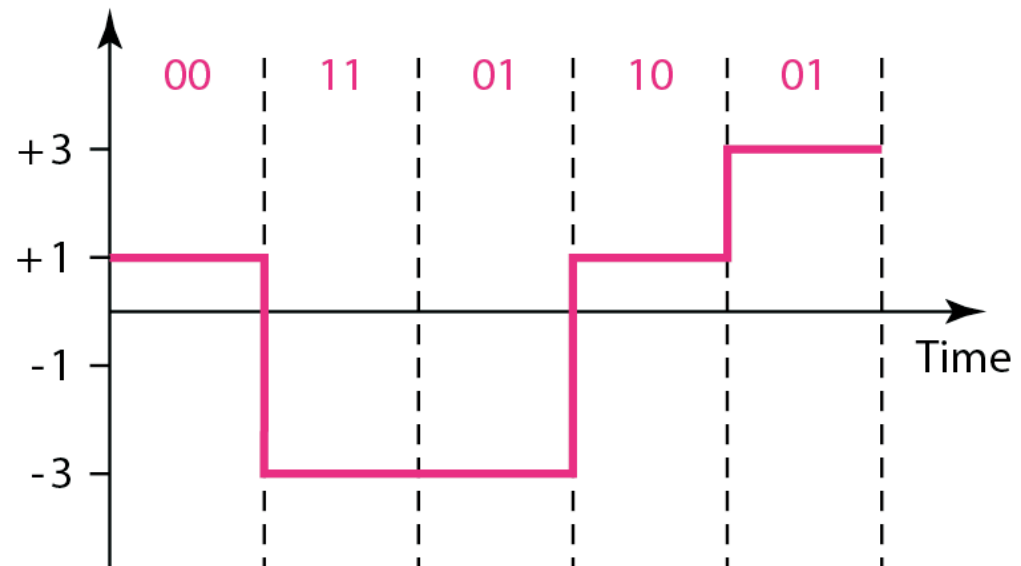
Víceúrovňová kódovací schémata, 2B1Q

13

- 2B1Q, Two Binary, One Quartenary
 - ▣ 4 úrovně napětí, každý puls reprezentuje 2 bity
 - ▣ používá se v sítích ISDN (BRI) a v technologii DSL
 - ▣ bitová rychlost je dvakrát vyšší než baudová, $B=N/4$

Next bits	Previous level: positive	Previous level: negative
	Next level	Next level
00	+1	-1
01	+3	-3
10	-1	+1
11	-3	+3

Transition table

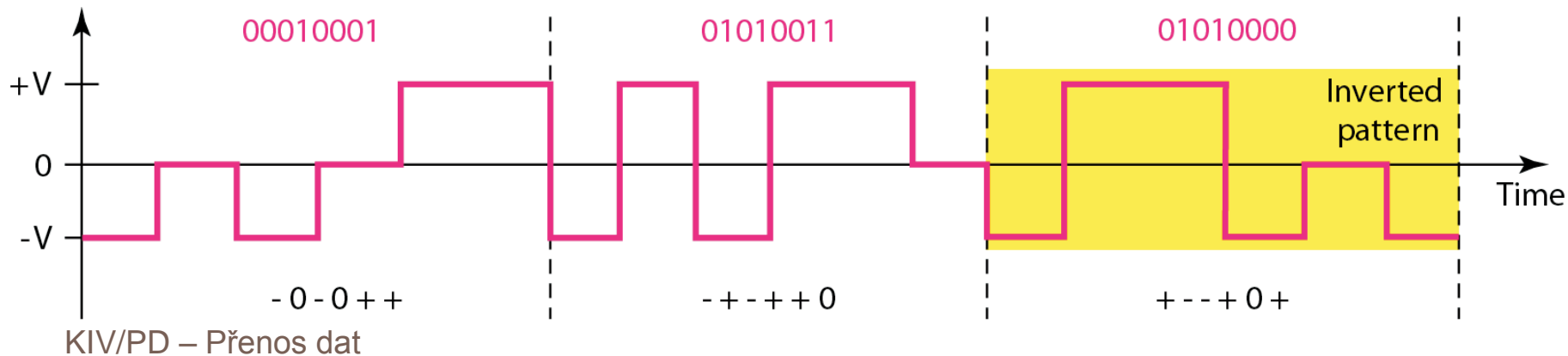


Assuming positive original level

Víceúrovňová kódovací schémata, 8B6T

14

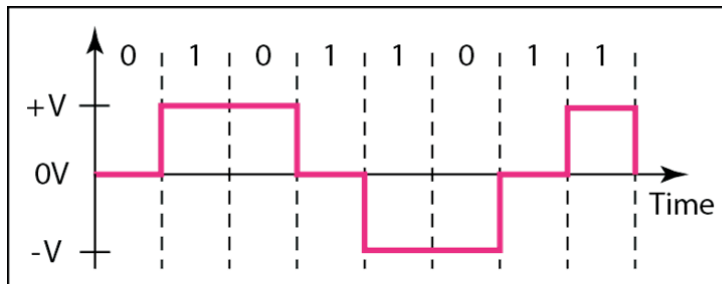
- 8B6T, používá LAN typu 100Base-T4
 - ▣ blok osmi bitů se kóduje do 6 tříhodnotových signálů
 - ▣ redundance (2^8 vs. 3^6) se využívá pro synchronizaci a opravy chyb
 - ▣ eliminuje se stejnosměrná složka
 - prvky mají váhu stejnosměrné složky 0 nebo +1
 - pokud se za sebou vyskytnou prvky s vahou +1, druhý se vyše invertovaný



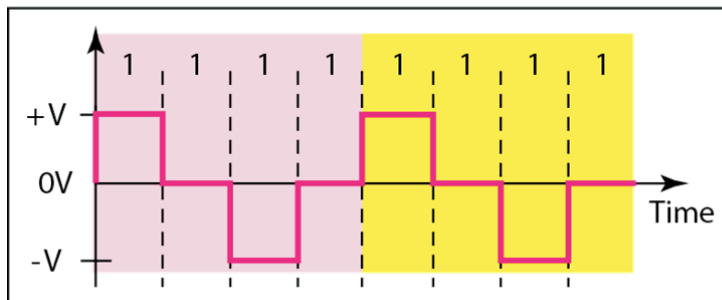
Vícepřechodová kódovací schémata, MLT-3

15

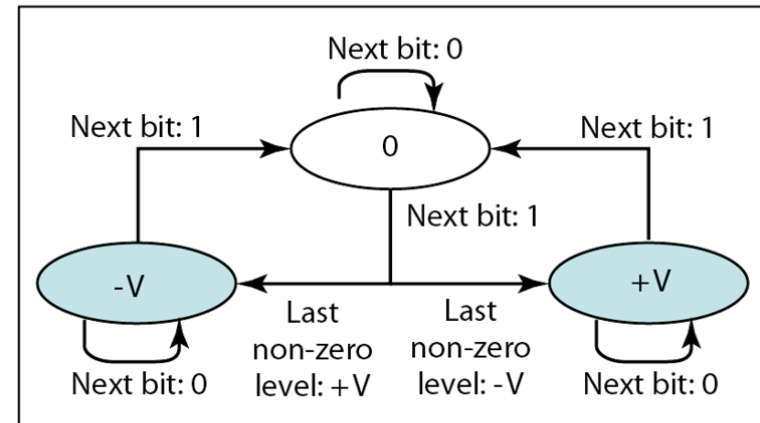
- **MLT-3**, Multilevel Transmit, Three Level
 - ▣ používá jedna z variant 100Mb Ethernetu
 - ▣ přechod mezi úrovněmi na začátku bitu 1
 - ▣ žádný přechod na začátku bitu 0



a. Typical case



b. Worse case

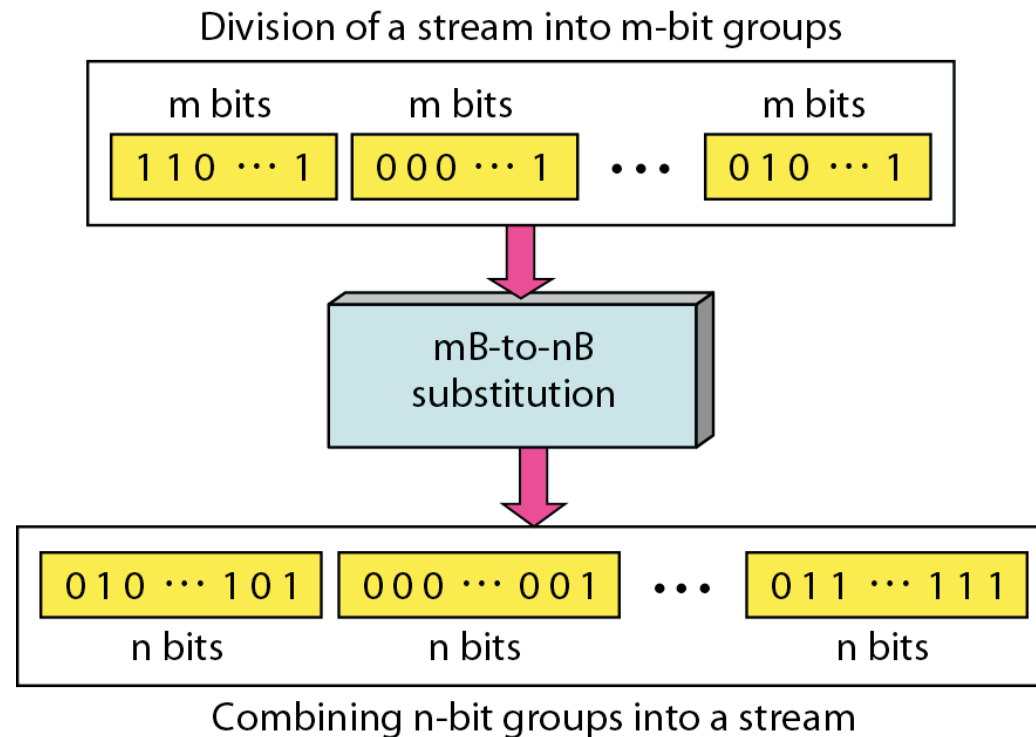


c. Transition states

Blokové kódy, mB/nB

16

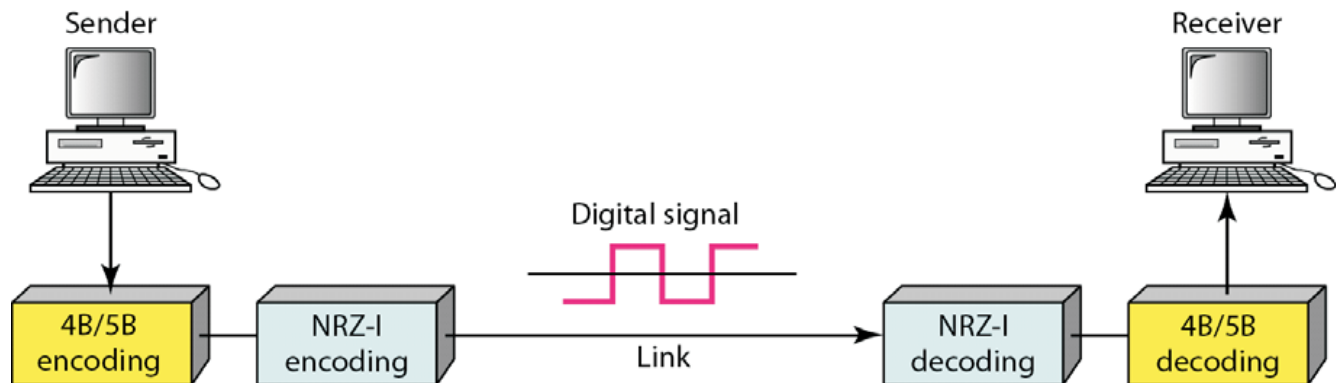
- do kódování lze zabudovat redundanci
 - ▣ posloupnost m bitů dat se mění na vysílaný blok n bitů, $n > m$
 - ▣ přínos pro synchronizaci a detekci chyb



Blokové kódy, 4B/5B

17

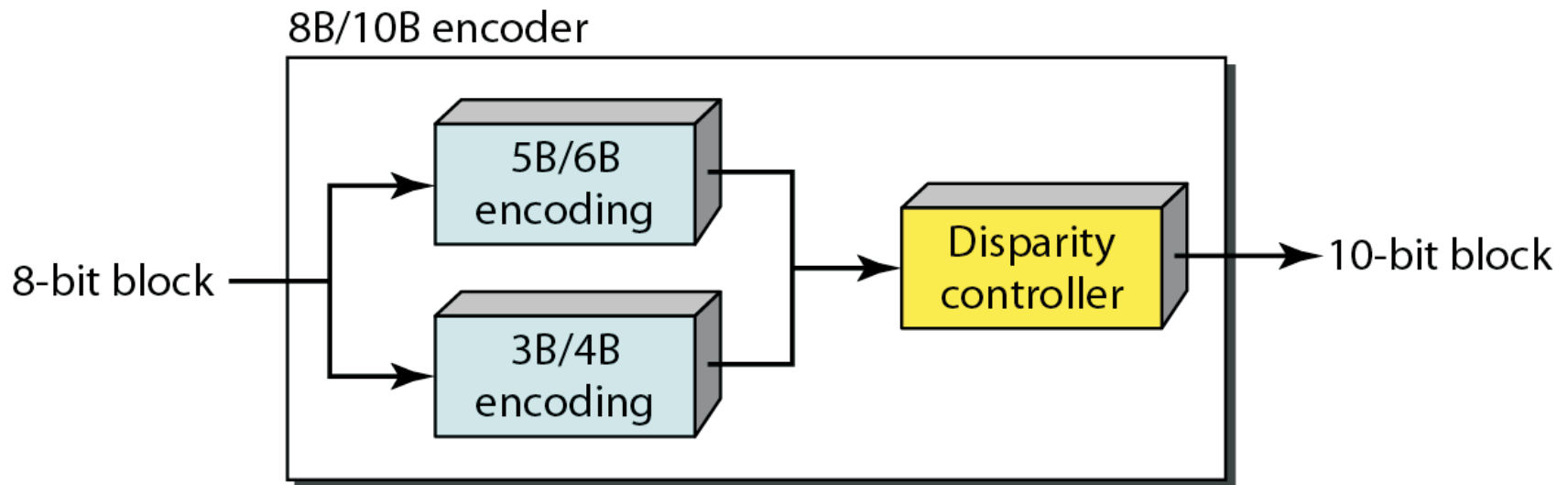
- používá jedna z variant Ethernetu v kombinaci s AMI a NRZ-I
- 4bitové vzorky se nahrazují 5bitovými
 - ▣ datové kombinace neobsahují více než 2 nuly za sebou
- uměle zavedená **redundance** (2^4 vs. 2^5) zvyšuje výkon
 - ▣ zabezpečuje synchronizaci
 - ▣ umožňuje zadávání protokolárních povelů
 - ▣ umožňuje detekci chyb



Blokové kódy, 8B/10B

18

- varianta 4B/5B, nahrazují se osmice bitů deseticemi
- lze účinněji implementovat opravu chyb (2^8 vs. 2^{10})



Scrambling (míchání)

19

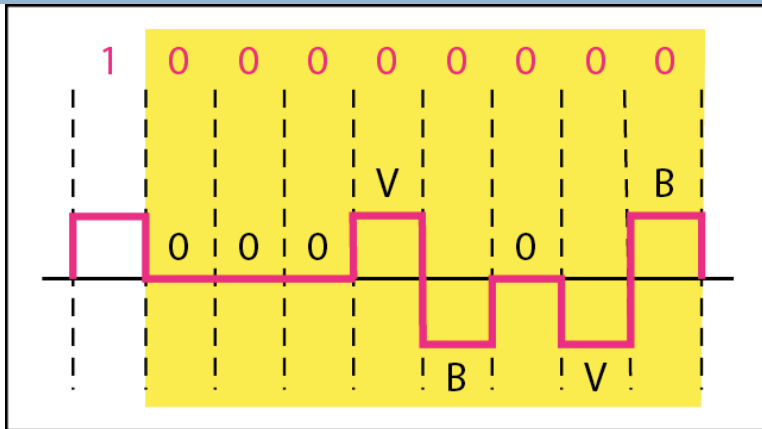
- cílem je odstranění „posloupnosti stejných bitů“ v NRZ
 - ▣ dvoufázové kódy jsou nevýhodné pro velké vzdálenosti
- posloupnost se nahradí posloupností s dostatečným počtem přechodů
- délka původní posloupnosti musí zůstat zachována
- přijímač musí být schopen vrátit nahrazovací posloupnost do původního tvaru
- nekumuluje se stejnosměrná složka
- nesníží se rychlost přenosu dat a lze detekovat bitové chyby

Scrambling (míchání), B8ZS

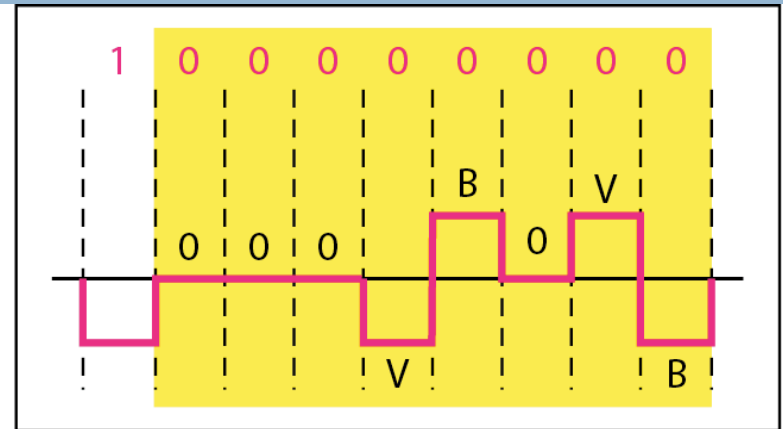
20

- B8ZS, Bipolar with 8-Zeros Substitutions
 - ▣ používají US/Japonské digitální přenosy T1
 - ▣ modifikace kódu Bipolar-AMI
 - ▣ nahrazuje posloupnost 8 nul posloupností s 2 porušeními kódu AMI „nezpůsobené“ šumem
 - ▣ puls předcházejí oktetu nul byl pozitivní → 000+-0-+
 - první + reprezentuje porušení definice AMI
 - ▣ puls předcházejí oktetu nul byl negativní → 000-+0+-
 - první - reprezentuje porušení definice AMI
 - ▣ počet + a - v nahrazovací posloupnosti je sudý, nekumuluje se stejnosměrná složka

Scrambling (míchání), B8ZS

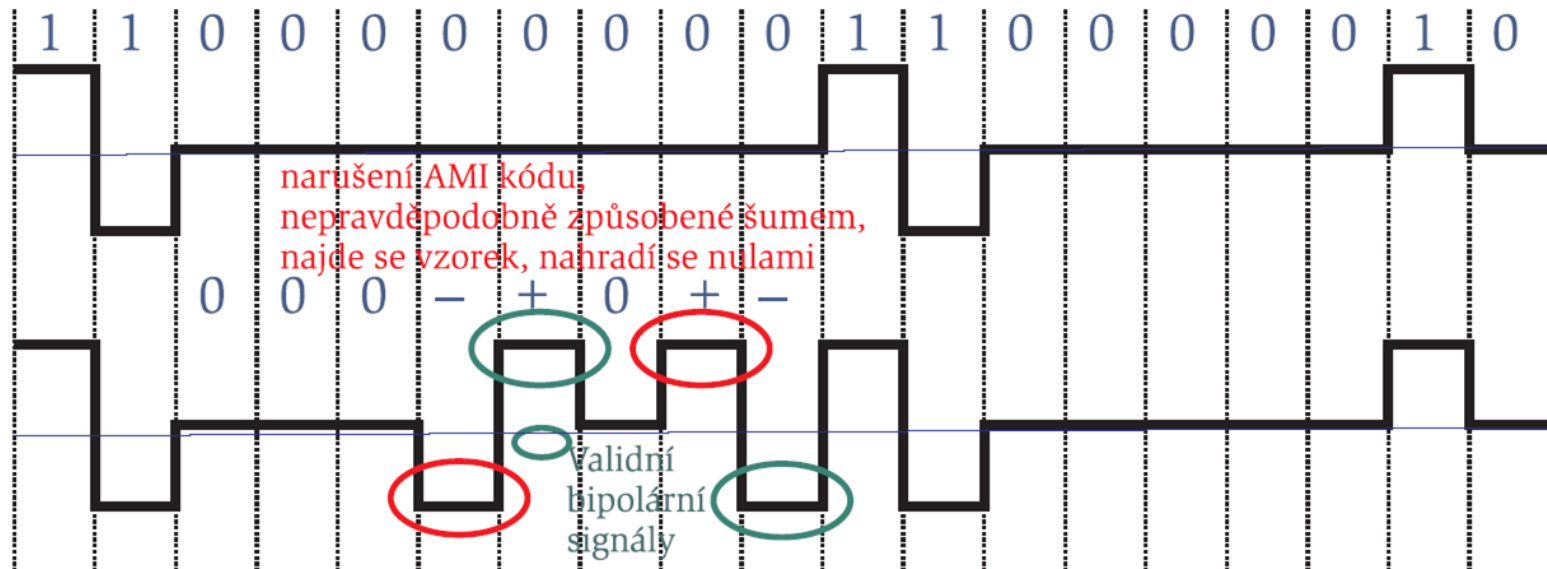


a. Previous level is positive.



b. Previous level is negative.

Bipolar-AMI



B8ZS

USA, Kanada

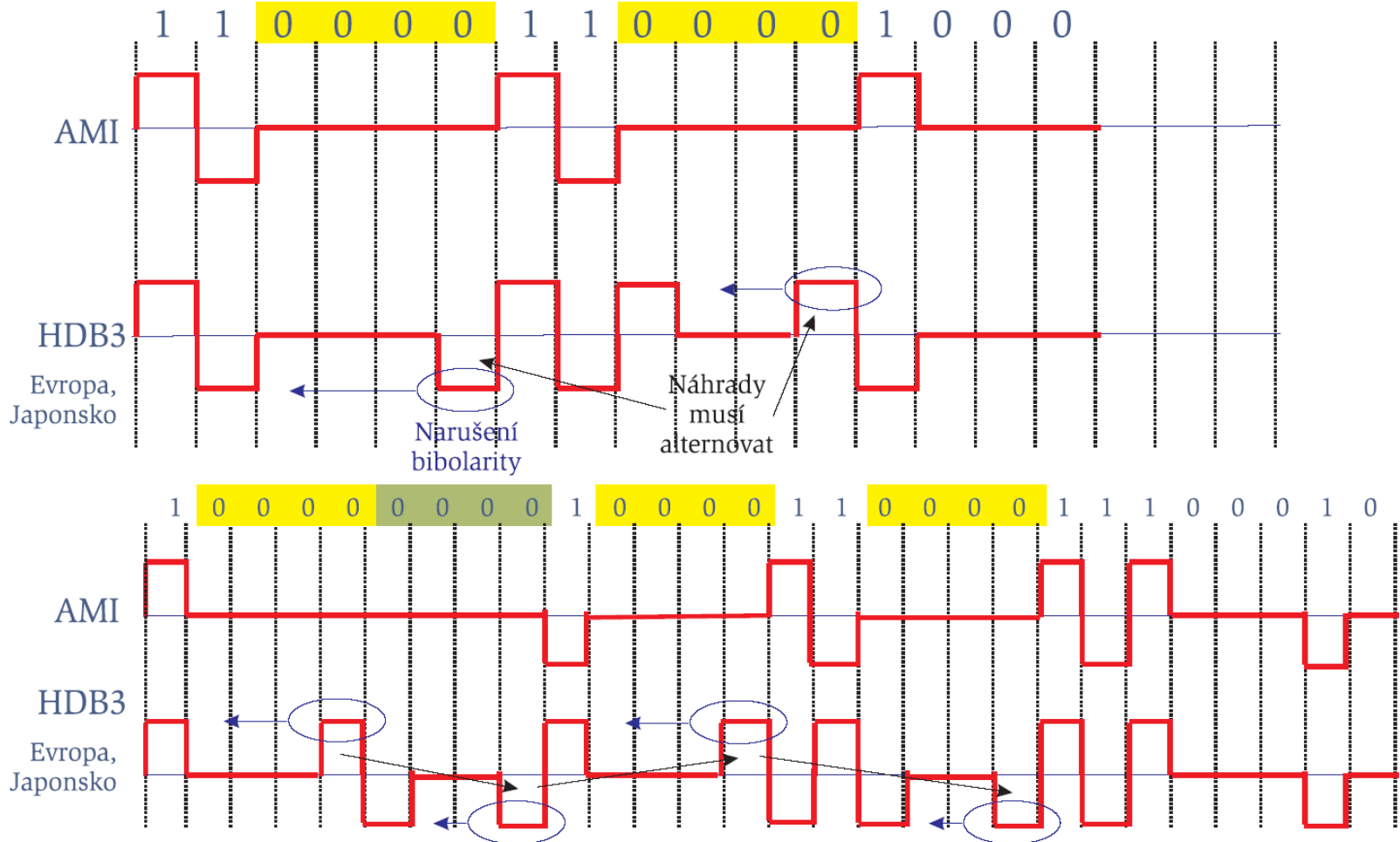
Scrambling (míchání), HDB3

22

- **HDB3**, High-Density Bipolar-3 zeros
 - ▣ používají evropské digitální přenosy E1
 - ▣ modifikace kódu Bipolar-AMI
 - ▣ na výstup pouští nejvýše 3 po sobě jdoucí nuly
 - ▣ pokud za sebou následují 4 nuly nahradí se střídavě kódy **B00V** a **000V**
 - ▣ symbol **V** je **+** nebo **-** a polaritu má shodnou s předchozím bitem
 - ▣ symbol **B** je **+** nebo **-** a polaritu má opačnou než předchozí bit
 - ▣ symbol **B** se vyšle jenom pokud se od posledního kódu **B00V** vyskytl sudý počet 1

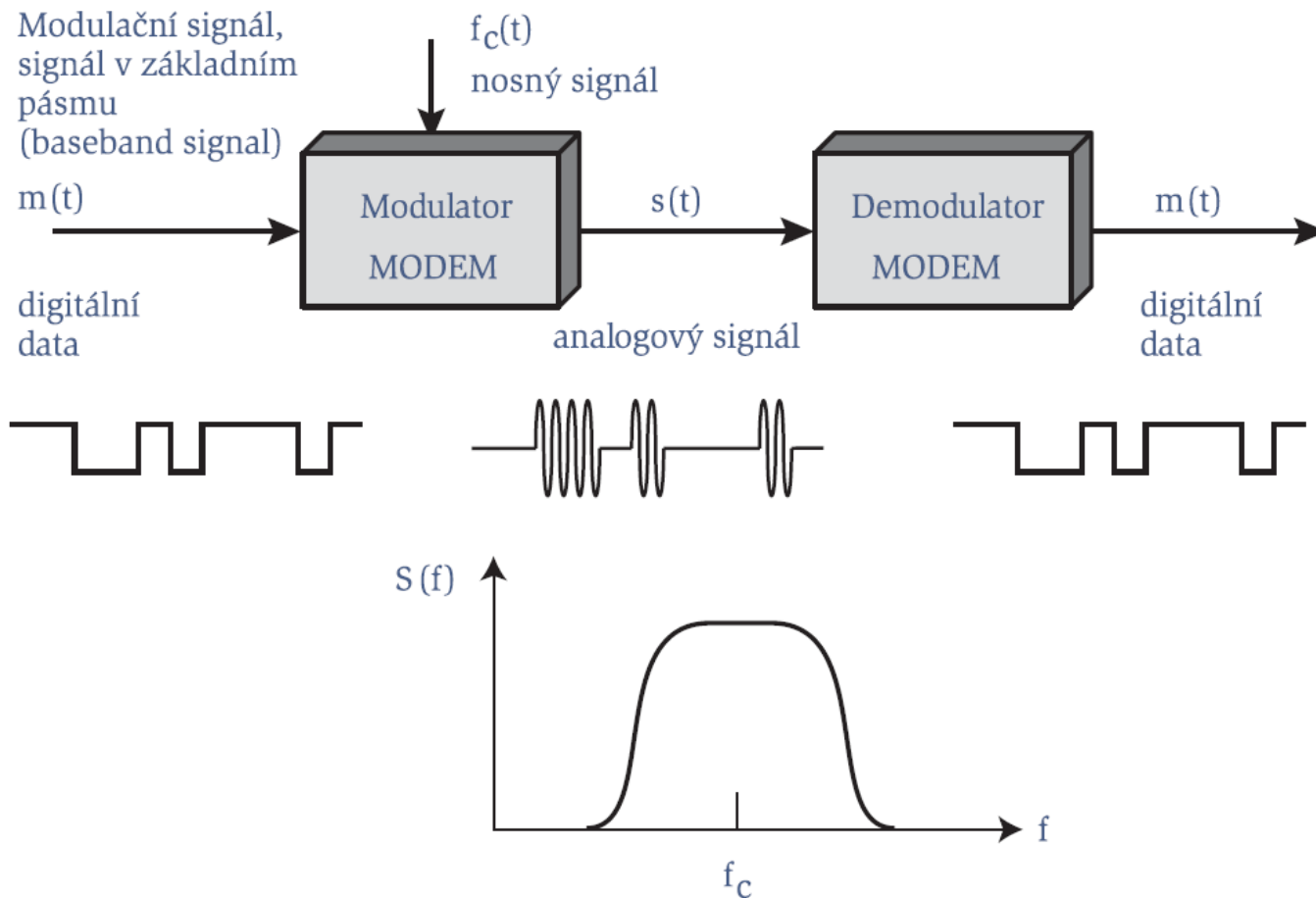
Scrambling (míchání), HDB3

23



Digitální data na analogový signál

24



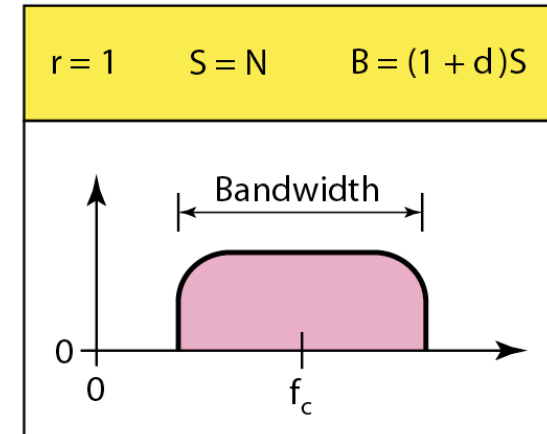
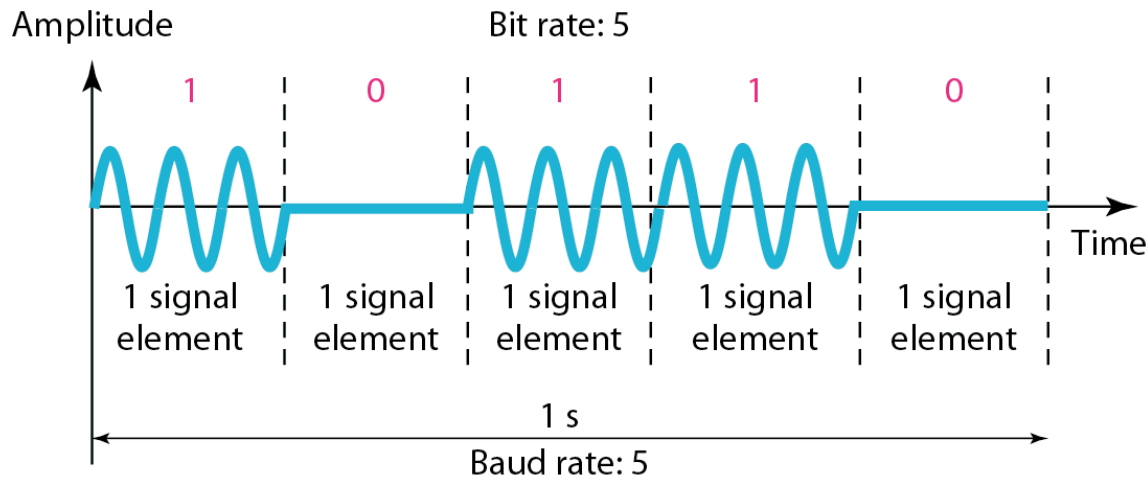
Metody modulace

25

- modulace digitálními signály známé jako **X-Shift Keying**
- **Amplitude-Shift Keying (ASK)**
 - ▣ jednoduchá, nepožaduje velkou šířku pásma, trpí interferencemi
- **Frequency-Shift Keying (FSK)**
 - ▣ požaduje větší šířku pásma
- **Phase-Shift Keying (PSK)**
 - ▣ složitější, odolná interferencím

Amplitude-Shift Keying, ASK

26

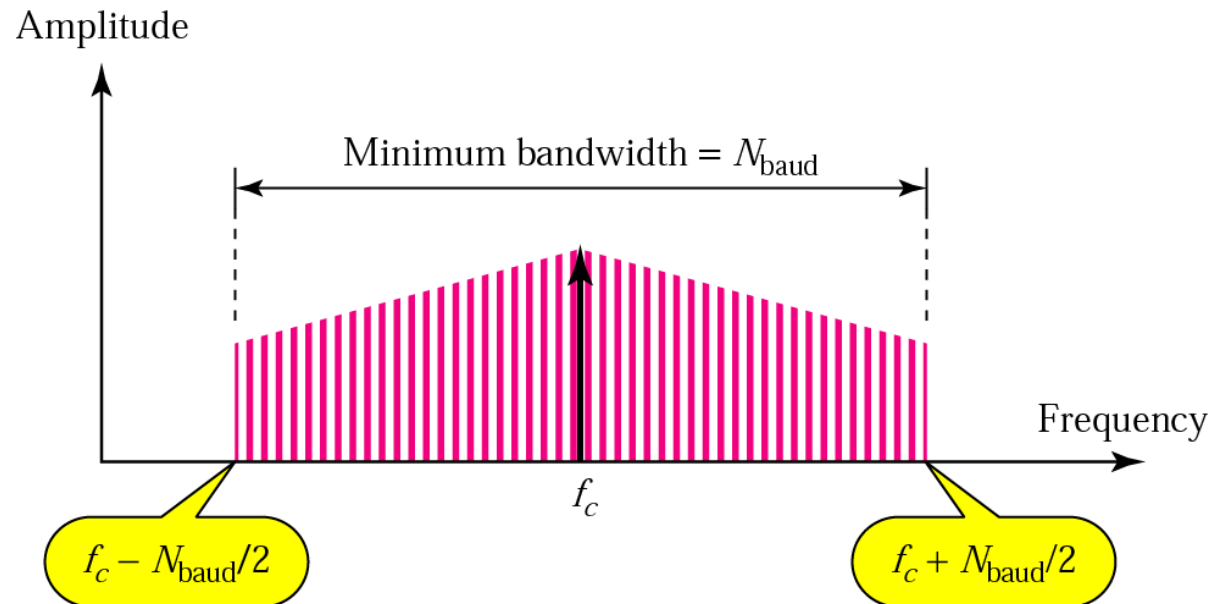


- také on/off keying
- digitální modulace nejvíce ovlivňovaná šumem
- d faktor 0 až 1 závisující na modulaci a filtrování
- šířka pásma B je centrována okolo nosného signálu

Šířka pásma ASK

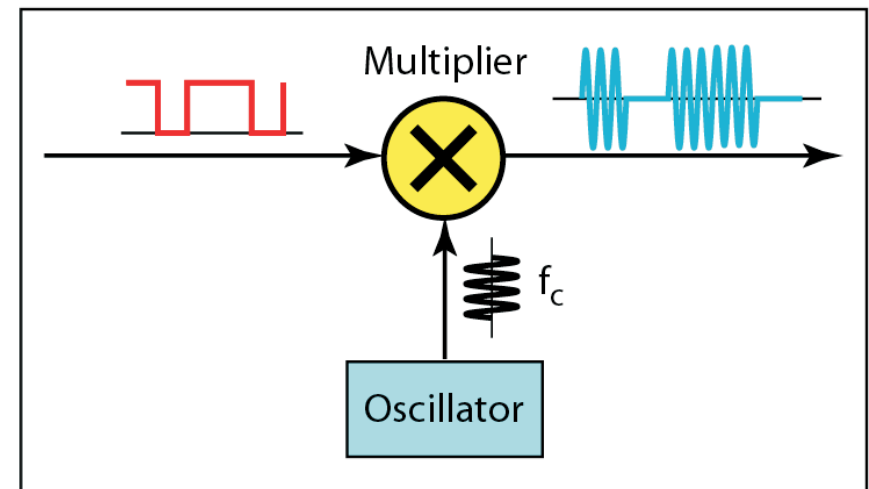
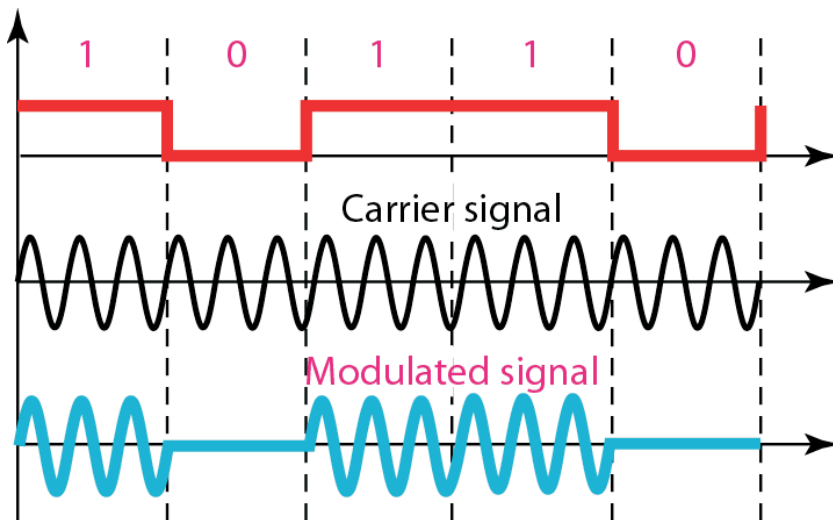
27

- teoreticky nekonečná
- většina energie v pásmu $f_c - N_{\text{baud}}/2$ a $f_c + N_{\text{baud}}/2$
 - f_c je nosná frekvence
 - N_{baud} je baudová rychlost
- minimální potřebná šířka pásma je N_{baud}



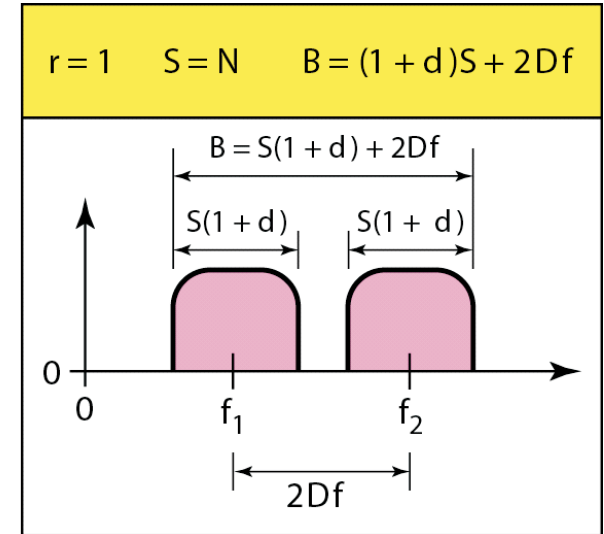
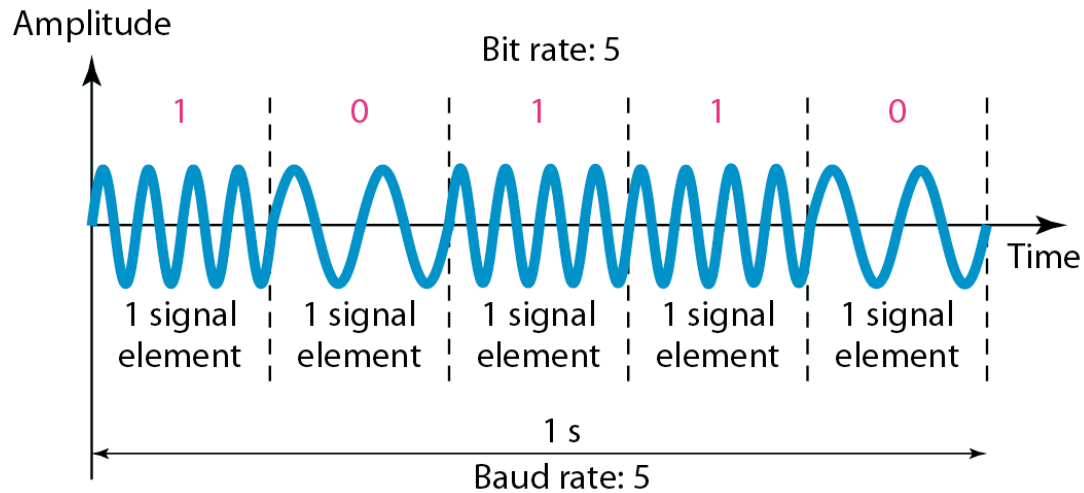
Implementace ASK

28

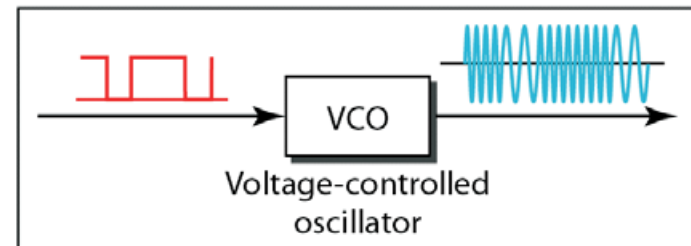
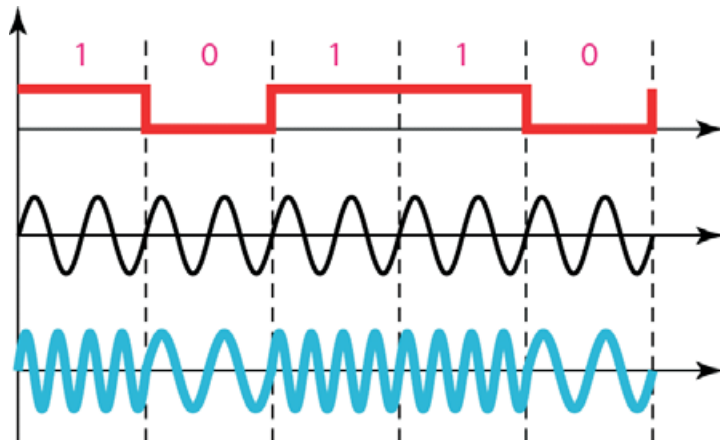


Binary Frequency-Shift Keying, BFSK

29



- $2\Delta f$ musí být rovno alespoň S , typicky bývá $(1+d)S$



Multiple FSK (MFSK), násobná frekvenční modulace

30

- hodnoty signálových prvků = odlišné frekvence
- počet hodnot signálových prvků (frekvencí): $M = 2^L$,
 L = počet bitů reprezentovaných 1 signálovým prvkem
- lépe se využívá šířka pásma,
zvýšuje se ale náchylnost k chybám
- vysílaný MFSK signál – hodnota jednoho signálového prvku
z M možných signálových prvků – je definován vztahem:

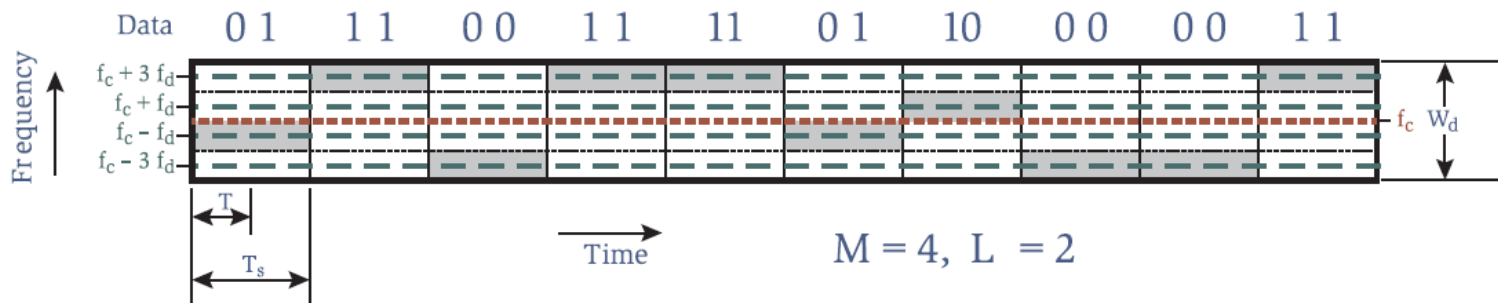
$$s_i(t) = A \cos(2\pi f_i t), 1 \leq i \leq M$$

- ✓ kde $f_i = f_c + (2i - 1 - M)f_d$, tj. f_i nabývá hodnot
 $f_c - (M - 1)f_d, \dots, f_c - f_d, f_c + f_d, \dots, f_c + (M - 1)f_d$,
kde $f_c \dots$ je nosná frekvence a $f_d \dots$ difference hodnot frekvencí

Multiple FSK (MFSK), 2

31

- aby se sladila rychlost přenosu dat s rychlostí vstupního proudu bitů, výstupní signálový prvek trvá $T_s = LT$ [s]
 - ✓ T je perioda bitu (rychlost modulačních dat = $1/T$)
 - ✓ 1 hodnota sign. prvku (tón s konstantní frekvencí) kóduje L bitů
 - ✓ požadovaná šířka pásma pro přenos je $2Mf_d$
 - ✓ lze ukázat, že potřebná minimální separace frekvencí je alespoň $2f_d = 1/T_s$
 - ✓ Modulátor požaduje šířku pásma $W_d = 2Mf_d = M/T_s$



Multiple FSK (MFSK), příklad

32

- $f_c = 250 \text{ kHz}$, $f_d = 25 \text{ kHz}$, $M = 4$
- $M = 4 = 2^2 \Rightarrow L = 2$
- 4 přidělené frekvence,
každá reprezentuje jednu 2-bitovou kombinaci:
175 – 00, **225** – 01, **275** – 10, **325** – 11
- potřebná šířka pásma:
 $150 \text{ kHz} - 350 \text{ kHz} = 200 \text{ kHz}$, tj. $2 \times 4 \times 25 \text{ kHz}$, $2 \cdot M \cdot f_d$
- podporovaná modulační rychlost: $f_s = 1/T_s = 2f_d$, 50 kBd
- podporovaná rychlost přenosu dat:
 $f = L/T_s = L \times f_s = 50 \times L \text{ kb/s}$,
při $M = 4$ ($L = 2$) se jedná o 100 kb/s

Multiple FSK (MFSK), příklad 2

33

- $f_c = 250 \text{ kHz}$, $f_d = 25 \text{ kHz}$, $M = 8$
- $M = 4 = 2^3 \Rightarrow L = 3$
- 8 přidělených frekvencí,
každá reprezentuje jednu 3-bitovou kombinaci:
 $75 - 000$, $125 - 001$, $175 - 010$, $225 - 011$
 $275 - 100$, $325 - 101$, $375 - 110$, $425 - 111$
- potřebná šířka pásma: (o 100% větší než při $M = 4$)
 $50 \text{ kHz} - 450 \text{ kHz} = 400 \text{ kHz}$, tj. $2 \times 8 \times 25 \text{ kHz}$, $2.M.f_d$
- podporovaná modulační rychlost: $f_s = 1/T_s = 2f_d$, 50 kBd
- podporovaná rychlost přenosu dat: (o 50% větší než při $M = 4$)
 $f = L/T_s = L \times f_s = 50 \times L \text{ kb/s}$,
při $M = 8$ ($L = 3$) se jedná o 150 kb/s

Minimum Shift Keying, MSK

34

- šířka pásma potřebná pro FSK závisí na vzdálenosti mezi frekvencemi nosných signálů pro reprezentaci 0 a 1
- **MSK**, *Minimum Shift Keying*
 - ✓ patří mezi modulační schémata označovaná jako *Continuous Phase Modulation (CPM)*
 - ✓ modulovaný nosný signál neobsahuje nespojitosti fázových změn
 - ✓ změny frekvencí se dělají při průchodu nosného signálu nulovou hodnotou
 - ✓ speciální předvýpočty umožňují se vyhnout náhlým posunům fáze
 - 0 a 1 se reprezentují změnami fáze a frekvence
 - signálový prvek reprezentující 0 nebo 1 nezáleží pouze na právě vysílané informaci, ale rovněž na předešle vyslané informaci

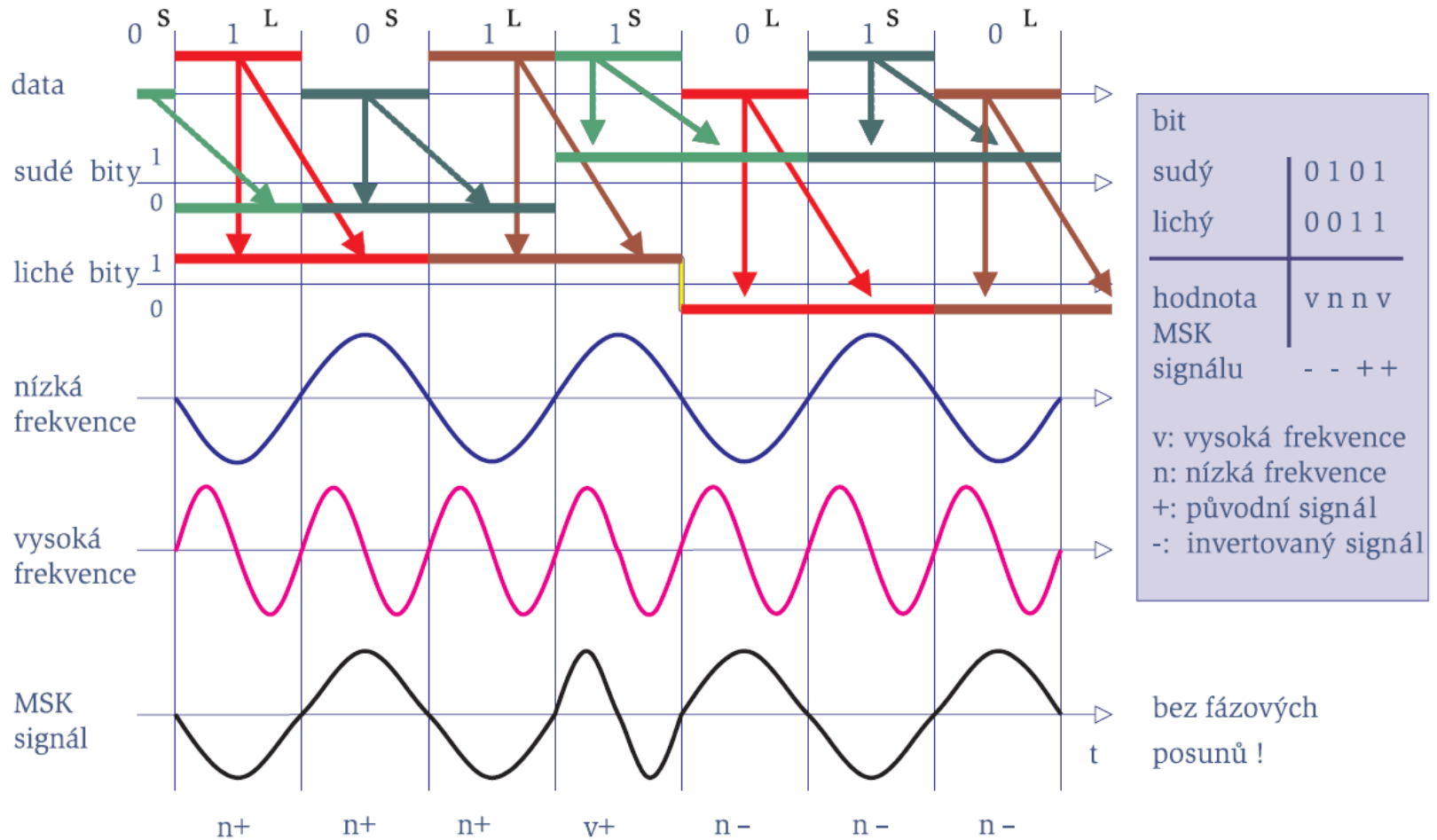
MSK – postup a charakteristiky

35

- provede se bitová separace na liché a sudé bity + zajistí se zdvojnásobení délek bitových dob
- podle bitové hodnoty a pořadí sudý, lichý bit se volí
 - ✓ signál s vyšší nebo nižší frekvencí a
 - ✓ původní nebo invertovaný nosný signál
- frekvence jednoho nosného signálu je dvojnásobkem frekvence druhého nosného signálu
- ekvivalent modulace **Ofsett QPSK** (*Ofsett Quadrature Phase Shift Keying*), viz dále
- ještě lepší efektivity využití šířky pásma se dosáhne použitím **dolní Gaussovské propusti** (*Gaussian low-pass filter*) před modulací – **GMSK** (*Gaussian MSK*), používá se v GSM

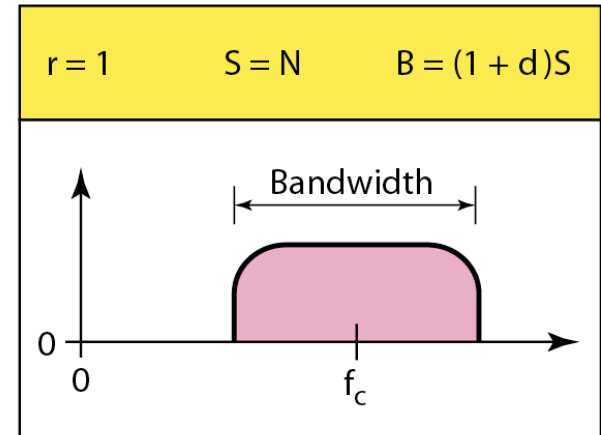
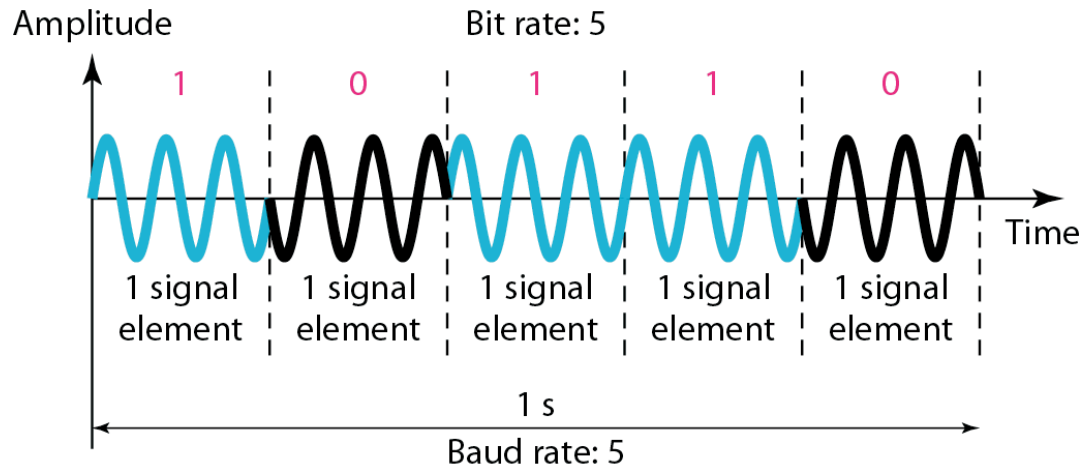
MSK, příklad

36



Binary Phase-Shift Keying, BPSK

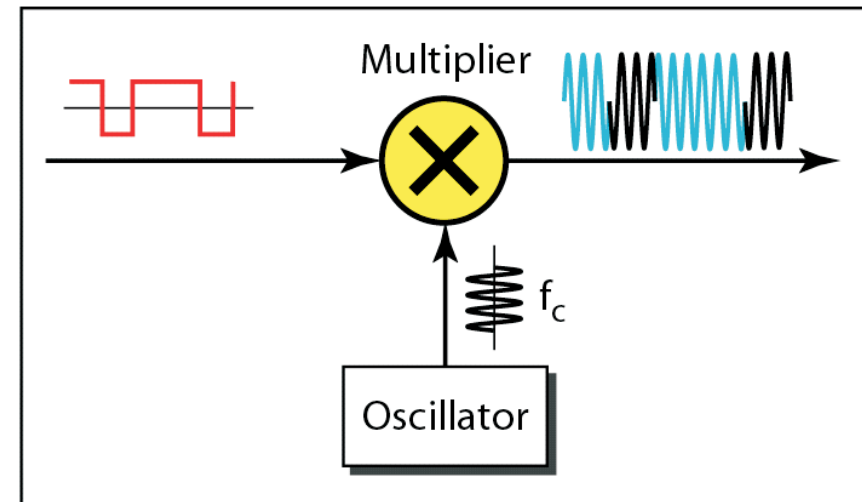
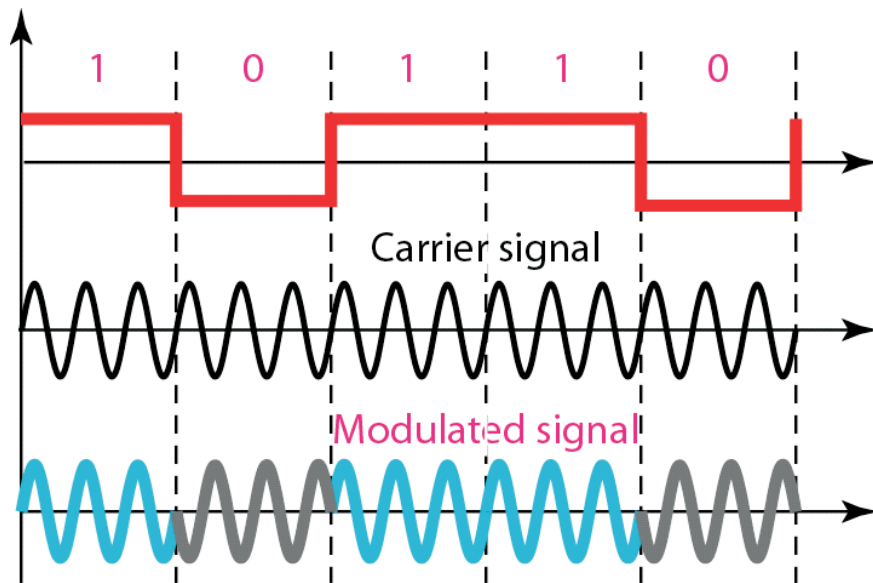
37



- obě amplitudy i frekvence zůstávají stejné
- přeskakuje se mezi 2 fázovými posuvy 0 a 180 stupňů
- PSK je stejně jednoduchá jako ASK, požaduje stejnou šířku pásma
- je méně citlivá na šum

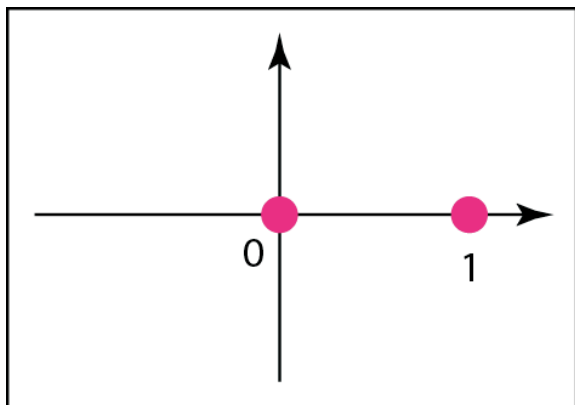
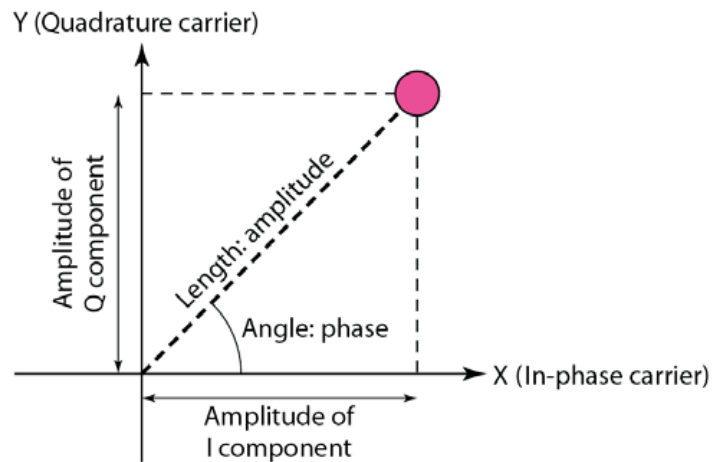
Implementace PSK

38

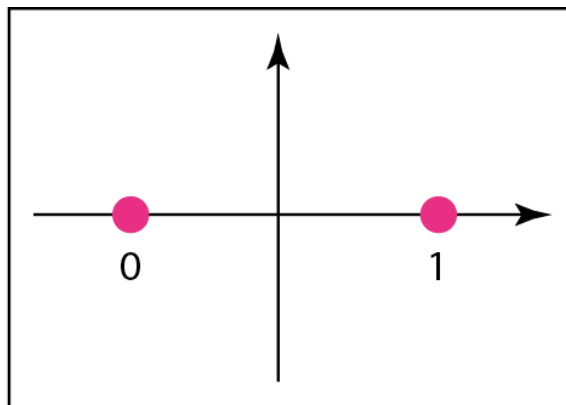


Konstelační diagram

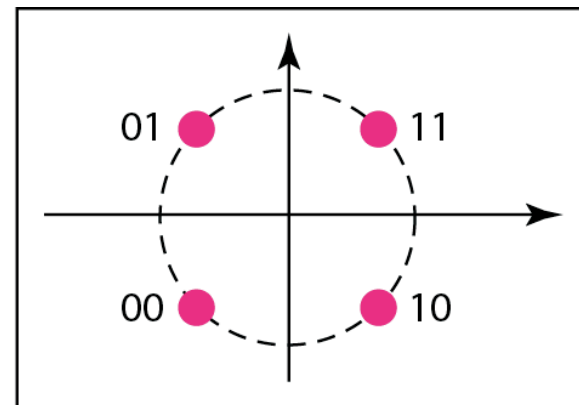
39



a. ASK (OOK)



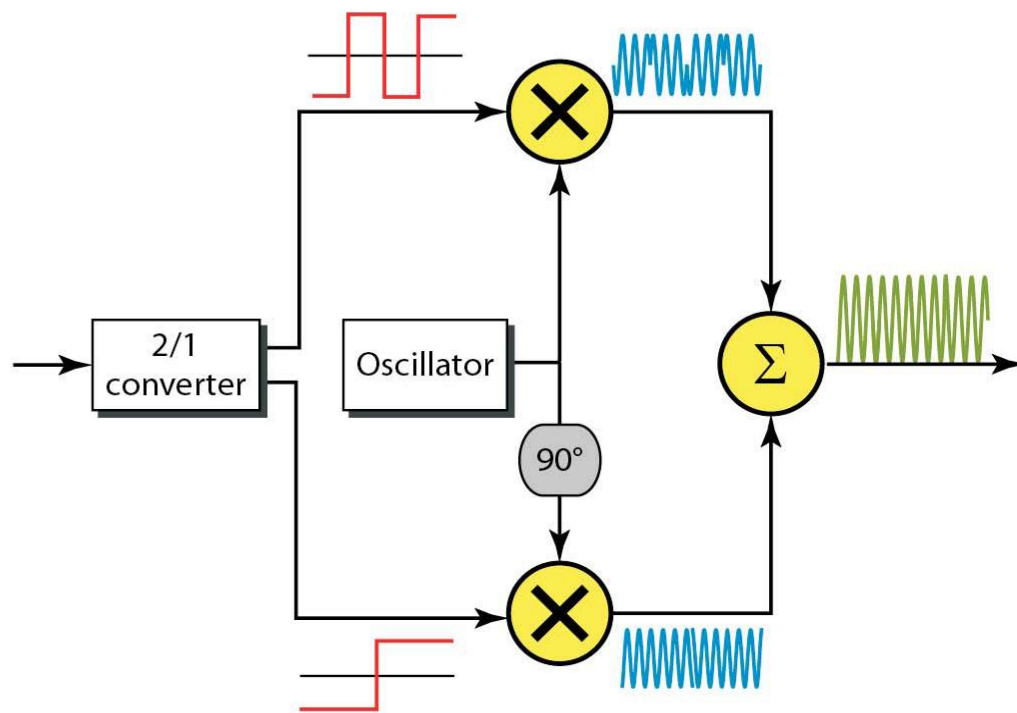
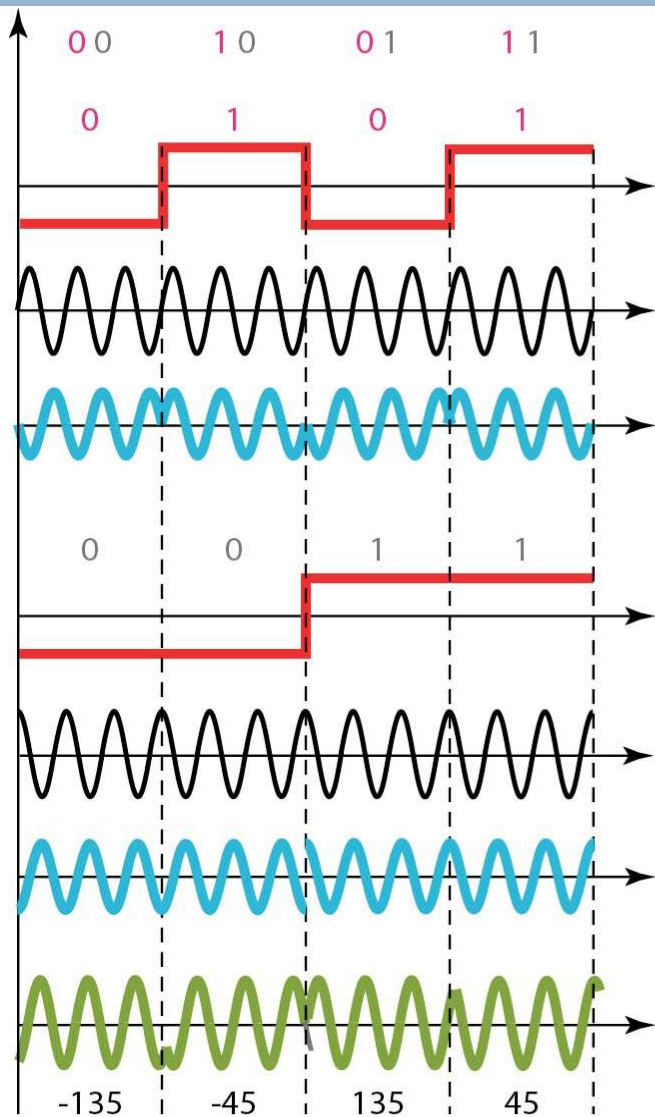
b. BPSK



c. QPSK

Implementace kvadrurní PSK

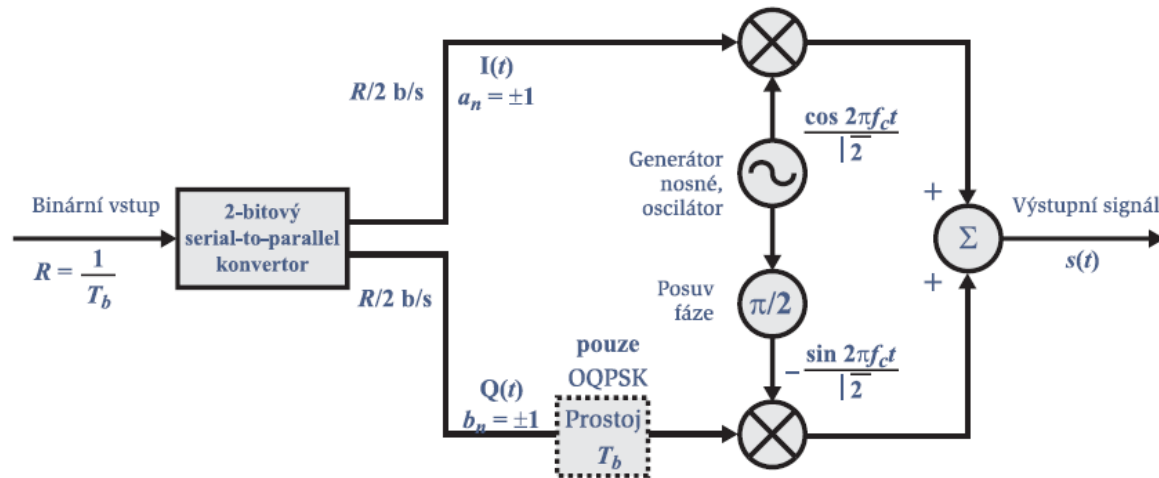
40



Zdokonalování PSK – Offset QPSK

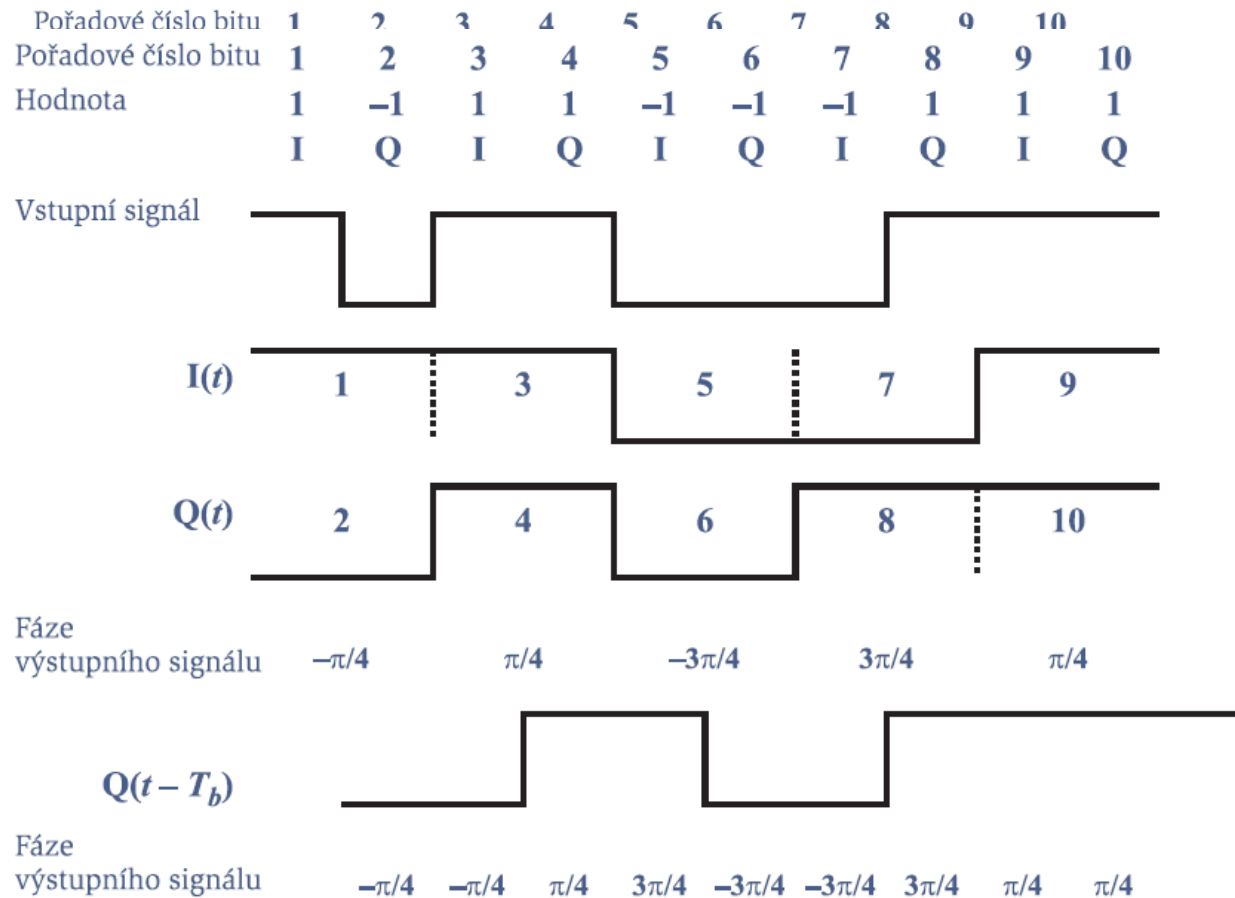
41

- jestliže se dva bitové proudy posunou o $1/2$ bitového intervalu, pak se minimalizují fluktuace amplitud, poněvadž fáze se nikdy nezmění o π
- **Offset QPSK, OQPSK**
 - ✓ získá se z QPSK zpožděním lichých bitů o polovinu bitového intervalu vůči proudům sudých bitů



Příklad signálu OQPSK

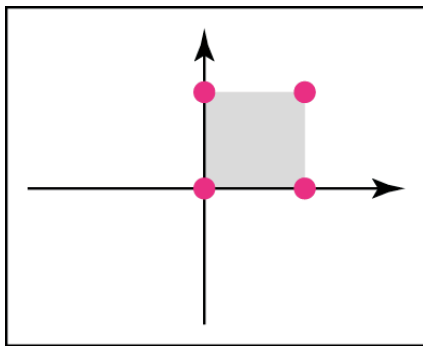
42



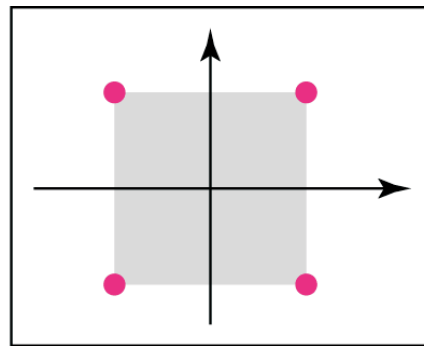
Kvadrurní amplitudová modulace, QAM

43

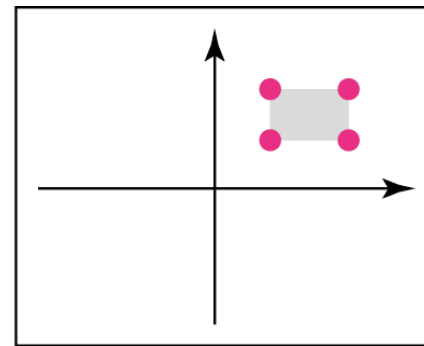
- PSK špatně rozlišuje malé difference fáze
- ASK špatně rozlišuje více než 2 hodnoty amplitudy
- QAM je vylepšení PSK kombinací s ASK
 - ▣ mění fázi a amplitudu
 - ▣ cílem je maximální možná odlišnost signálových prvků
 - ▣ počet změn amplitud bývá menší než počet změn fází



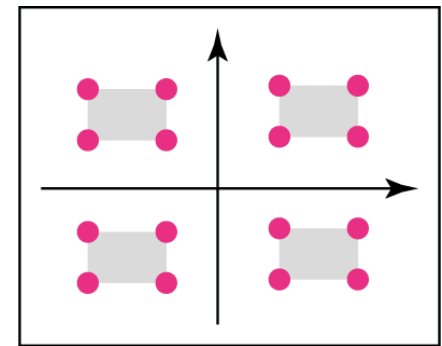
a. 4-QAM



b. 4-QAM



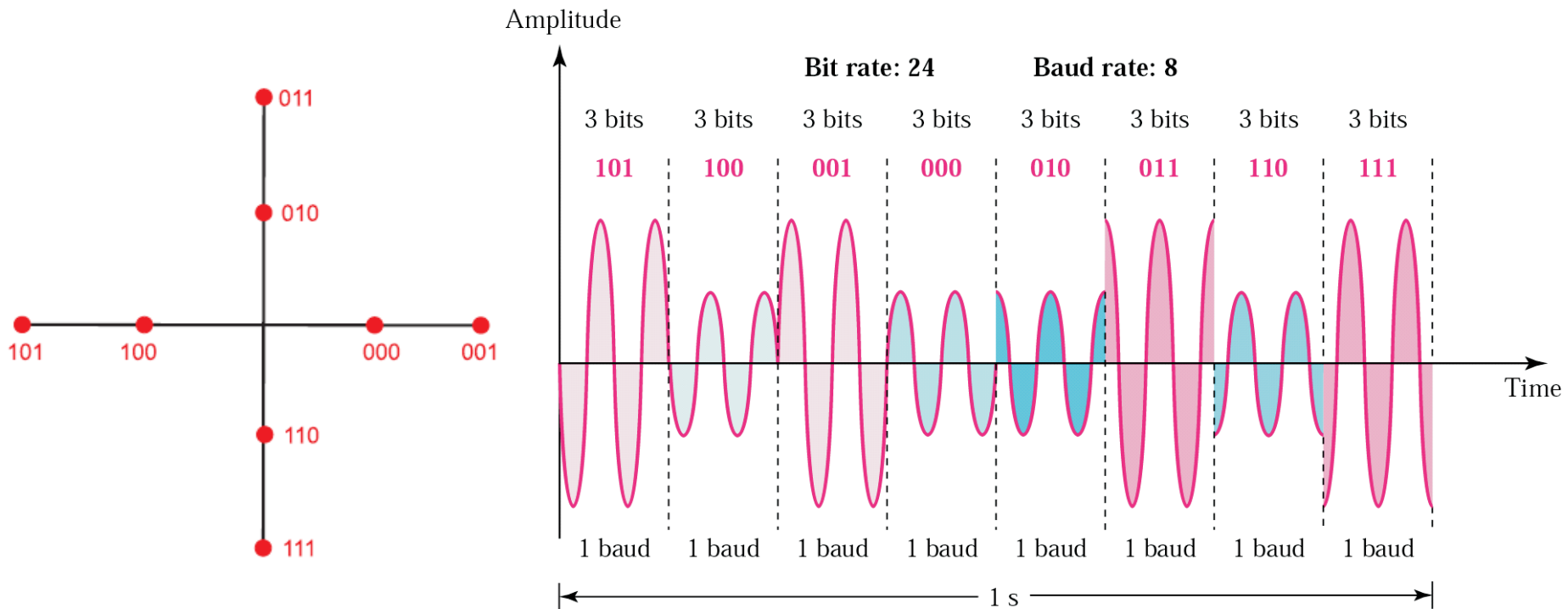
c. 4-QAM



d. 16-QAM

8-QAM

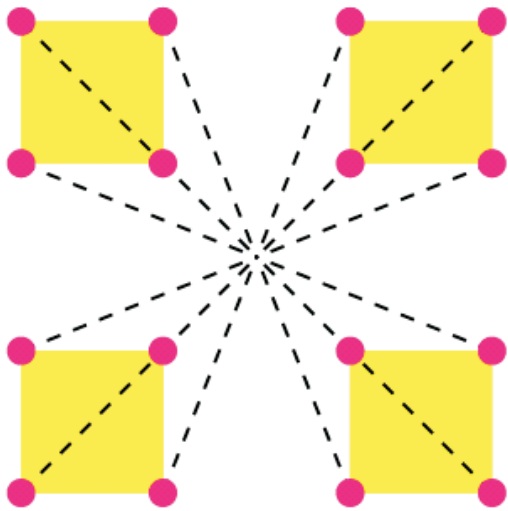
44



16-QAM

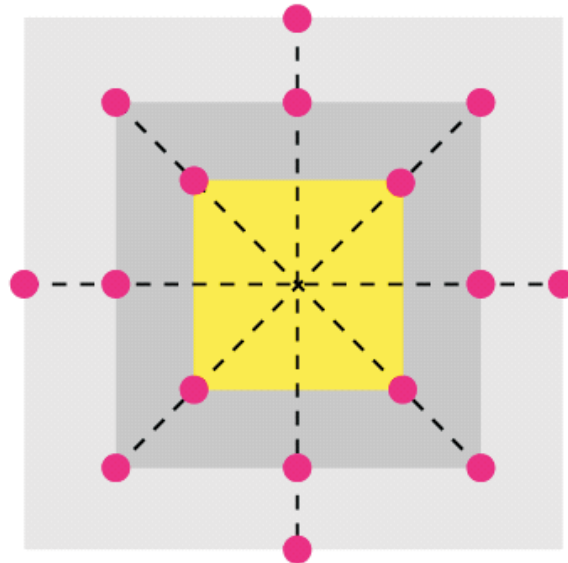
45

3 amplitudes, 12 phases



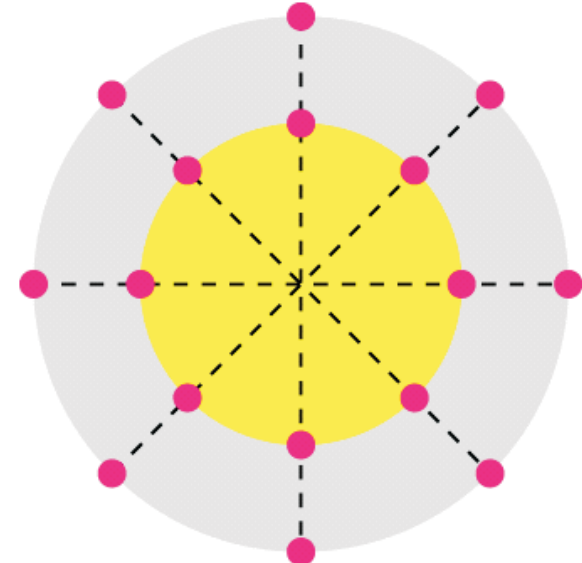
16-QAM

4 amplitudes, 8 phases



16-QAM

2 amplitudes, 8 phases



16-QAM

Hierarchická modulace

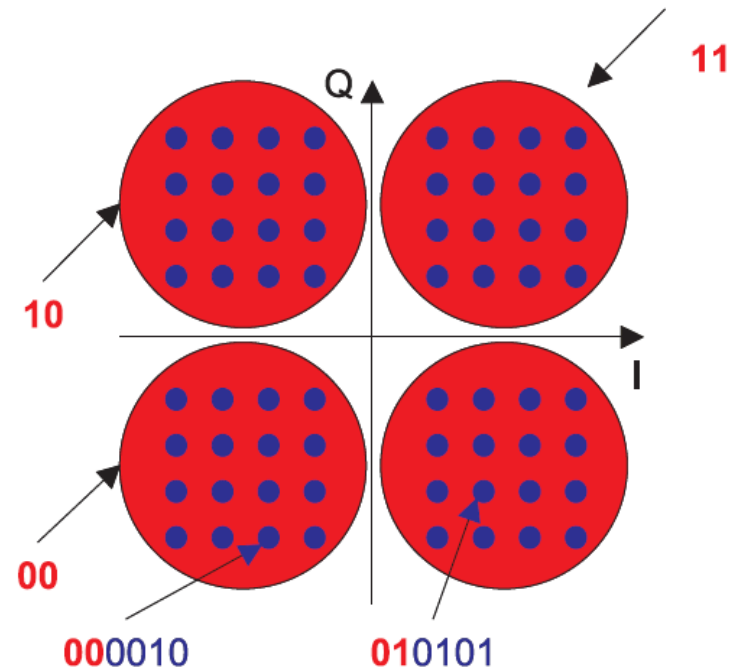
46

- **DVB-T**, *Digital Video Broadcasting – Terrestrial*
- moduluje dva separátní datové proudy do jednoho DVB-T proudu
- **High Priority proud** (*HP*) se skládá dohromady s **Low Priority proudem** (*LP*)
- hierarchie umožňuje v zašuměném prostředí přijímat pouze HP a je tudíž zachovaná funkčnost, i když s nižší kvalitou
- jedná se o typ QPSK – kombinace 16-QAM, 64-QAM

Hierarchická modulace, příklad 64-QAM

47

- dobrý příjem
 - * rozpoznává se celý 64-QAM vzorek
- špatný příjem (mobil)
 - * rozpoznává se pouze QPSK část
- 6 bitů na QAM symbol,
 - * 2 nejvyšší řády vymezují QPSK
 - * HP služba se kóduje do QPSK (2 bity),
 - * LP používá zbývající 4 bity



Digitalizace analogových dat

48

- Digitalizace – konverze „analogových dat“ na „digitální data“
- problém – jak vysílat získaná „digitální data“ ?
 - ✓ digitální data lze vysílat přímo pomocí signálu typu NRZ-L –
 - případ $DD \rightarrow DS$
 - ✓ digitální data lze vysílat pomocí jiného kódování než do NRZ-L –
 - případ $DD \rightarrow DS$
 - ✓ digitální data zakódovat do analogového signálu –
 - případ $DD \rightarrow AS$
 - proč ?
 - např. digitalizovaný hlas se má přenášet mikrovlnnými pojítky



Pulse Code Modulation, PCM

49

- Založeno na principu **věty o vzorkování**, *sampling theorem*:
 - ✓ *Je-li signál $f(t)$ pravidelně vzorkován rychlostí větší než dvojnásobek frekvence nejvyšší harmonické složky signálu, pak vzorky obsahují stejné množství informace, jako původní signál.*
 - ✓ Původní signál $f(t)$ lze ze vzorků rekonstruovat pomocí filtru typu **dolní propust**. □
- každý analogový vzorek se musí při vysílání zakódovat do digitálních dat
- každý zakódovaný vzorek do digitálních dat se musí při přijímání dekodovat
- na příjmové straně lze pak původní signál rekonstruovat

Pulse Code Modulation, PCM, 2

50

- kódování hlasových dat:
 - ✓ šířka pásma hlasového kanálu je omezena na 4 000 Hz
 - ✓ hlasový signál je tudíž nutné vzorkovat $2 \times 4000 = 8000 \times / s$
 - ✓ vzorek se kvantizuje např. do 256 úrovní
 - ⇒ vzorky se kódují do osmic bitů
 - ✓ pro přenos je nutná rychlost $8 \times 8\,000 = 64 \text{ kb/s}$
- kódování dat barevné televize
 - ✓ efektivní šířka pásma signálu je 4,6 MHz
 - ✓ signál je tudíž nutné vzorkovat 9 646 899 x za sekundu
 - ✓ pro dosažení rozumné kvality se vzorky kvantizují do 1 024 úrovní
 - (platí – zvyšování počtu úrovní snižuje zkreslení signálu, šum)
 - ⇒ vzorky se kódují do desetic bitů
 - ✓ pro přenos je nutná rychlost 92 Mb/s

Pulse Code Modulation, PCM, 3

51

□ kódování

- ✓ získávají se **analogové vzorky** – pulsy s proměnnou amplitudou – vzorky **PAM** (*P*ulse *A*mplitude *M*odulation)
- ✓ analogovým vzorkům jsou přidělovány **binární kódy**, počet bitů v binárních kódech je dán počtem rozpoznávaných úrovní amplitud vzorků PAM
- ✓ digitální signál je tvořen posloupností n -bitových bloků
- ✓ každé n -bitové číslo je amplitudou PCM pulsu

□ kvantováním se narušuje vzorkovací teorém, původní signál nelze obnovit úplně přesně,

□ lze odvodit vztah pro **kvantovací chybu**,
resp. pro **kvantovací šum**:

$$SNR_{dB} = 20 \log 2^n + 1,76 = 6,02 n + 1,76 \text{ [dB]}$$

Pulse Code Modulation, PCM, 4

52

- Důsledek existence kvantovacího šumu –
každý dodatečný bit použitý pro binární popis úrovní kvantování
(a tomu odpovídající zvýšení počtu kvantovacích úrovní)
zvyšuje poměr SNR o 6 dB, tj. cca 4-krát
- další zvýšení SNR (např. o 24 dB až o 30 dB) lze dosáhnout **nelineárním kvantováním** –
 - ✓ výšky úrovní se zvětšují se vzdáleností od 0. hodnoty,
 - ✓ na nízkoúrovňové (slabé) signály se dostává více úrovní.

Delta Modulace, DM

53

- Analogový vstup je aproximovaný schodovou funkcí, v každém vzorkovacím intervalu se posouvá o jednu kvantizační úroveň (δ) nahoru nebo dolů
- proud bitů aproximuje derivaci analogového signálu a nikoli jeho amplitudu
 - když funkce roste, generuje se 1
 - jinak se generuje 0
- dva významné parametry
 - velikost kroku přidělená každé binární cifře (δ)
 - rychlost vzorkování
- přesnost se zvýší zvýšením rychlosti vzorkování tím se ovšem zvýší i potřebná rychlost přenosu dat

Delta Modulation, DM, 2

54

