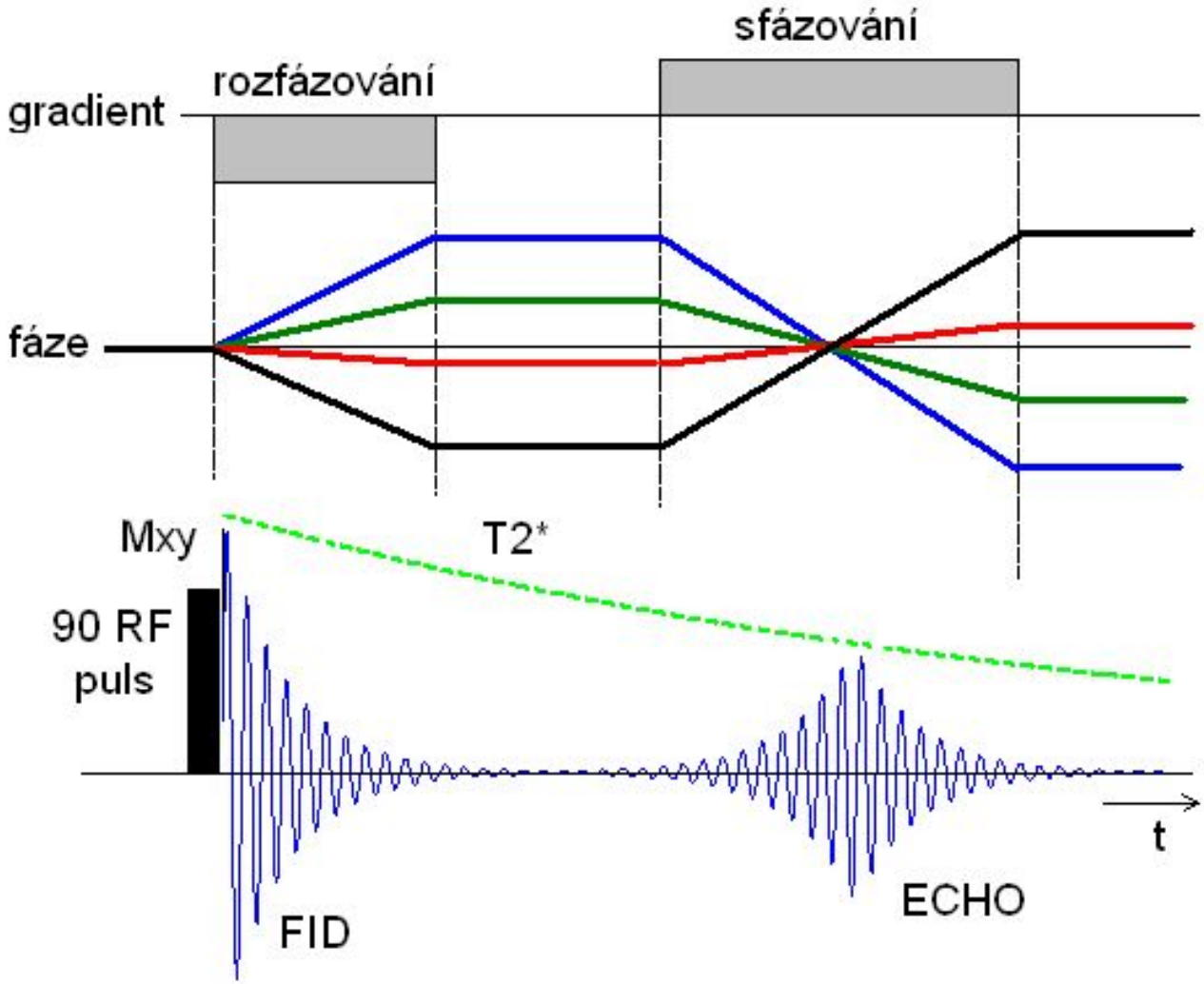


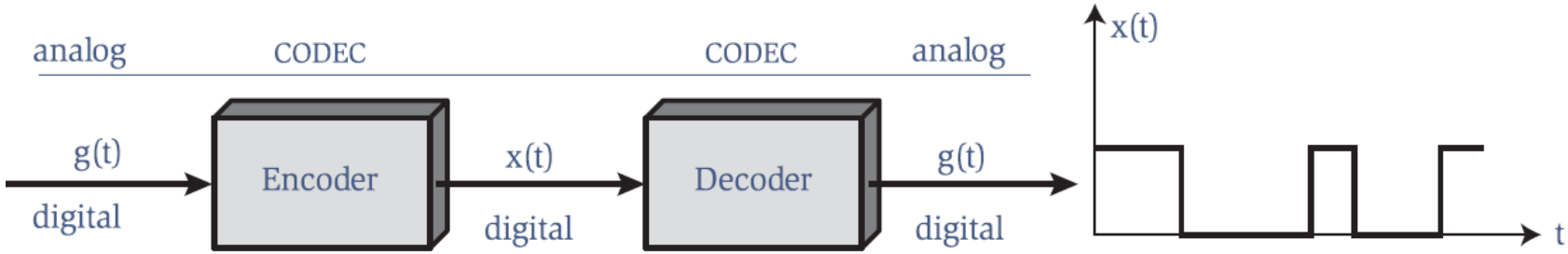
Techniky kódování signálu

O čem přednáška je?

- 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?

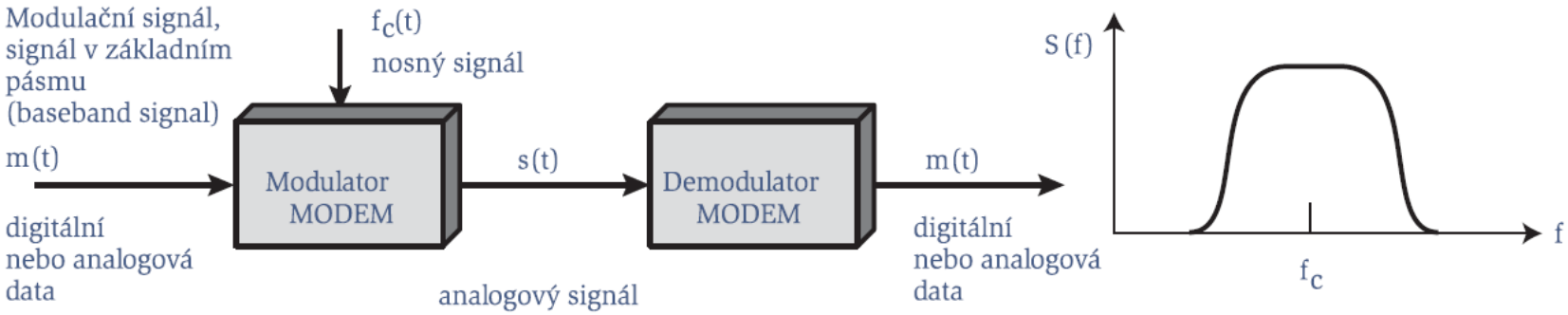
Kódování digitálních/analogových dat do digitálního signálu

- digitální data na digitální signál
  - ✓ zobrazování 1 a 0 do posloupností pulsů
  - ✓ jednodušší a levnější technologie než technologie kódující digitální data na analogový signál
- analogová data do digitálního signálu
  - ✓ použití moderních digitálních vysílacích a přepojovacích technologií pro přenos analogových dat (audio, video)



Kódování digitálních/analogových dat do analogového signálu

- analogová data do analogového signálu
  - ✓ historický standard, levné, jednoduché řešení
  - ✓ používá se pro přenos hlasu analogovou telefonní sítí a pro řešení frekvenčního multiplexu
- digitální data do analogového signálu
  - ✓ používá se pro přenos dat analogovou telefonní sítí
  - ✓ dodnes nutné při použití médií, které šíří pouze analogové signály (např. optické vlákno, éterová média)



Poznámky ke kódování analogových dat/signálů

- kódování analogových dat
  - ✓ kvalita, věrnost přenosu –
    co se přijímá musí být pokud možno totéž co se vysílá,
    přičemž pojem *pokud možno* má širokou interpretaci
- Proč / kdy se stále používá modulace analogového signálu ?
  - ✓ Protože některá média přenášejí pouze analogové signály –
    např. bezdrátová média a optická vlákna
  - ✓ Mnohdy je nutné/efektivní sdílet přenosové médium pomocí
    FDM, *Frequency Division Multiplex(ing)* – analogové signály
    se překládají do různých dílčích frekvenčních pásem
  - ✓ Pro efektivnější přenos je někdy potřebné použít
    pásmo vyšších frekvencí a
    analogový signál (nyní analogová data) se do něj proto přeloží

Základní kódovací techniky

- Digitální data na digitální signál, $DD \rightarrow DS$
  - ✓ buď tzv. *baseband* nebo také přímé vysílání digitálních dat do média, také tzv. přenos v základním pásmu (od 0 Hz po f_m)
  - ✓ nebo komplexnější kódování do některé formy odvozené např. od některého standardu PCM, *Pulse Coded Modulation*
- Digitální data na analogový signál, $DD \rightarrow AS$
  - ✓ tzv. *broadband* nebo také přenos v přeloženém pásmu
  - ✓ *Amplitude-shift keying* (ASK), amplitudová (digitální) modulace kóduje se pomocí rozdílných hodnot amplitud nosného signálu
  - ✓ *Frequency-shift keying* (FSK), frekvenční (digitální) modulace kóduje se pomocí rozdílných hodnot frekvencí nosného signálu
  - ✓ *Phase-shift keying* (PSK), fázová (digitální) modulace kóduje se pomocí rozdílných hodnot posuvů fáze nosného signálu

Základní kódovací techniky, 2

- Analogová data na digitální signál, $AD \rightarrow DS$
  - ✓ *Pulse Coded Modulation* (PCM),
  - ✓ *Delta Modulation* (DM)
- Analogová data na analogový signál $AD \rightarrow AS$
  - ✓ tzv. *broadband* nebo také přenos v přeloženém pásmu
  - ✓ *Amplitude modulation* (AM), amplitudová modulace
  - ✓ *Angle modulation*, úhlové modulace
    - – *Frequency modulation* (FM), frekvenční modulace
    - – *Phase modulation* (PM), fázová modulace

Dva způsoby vyjadřování rychlosti přenosu

- baudová (modulační) rychlost =

  počet signálových prvků / s [Bd], (Baud - jméno)

  ✓ je irelevantní, kolik bitů signálový prvek reprezentuje

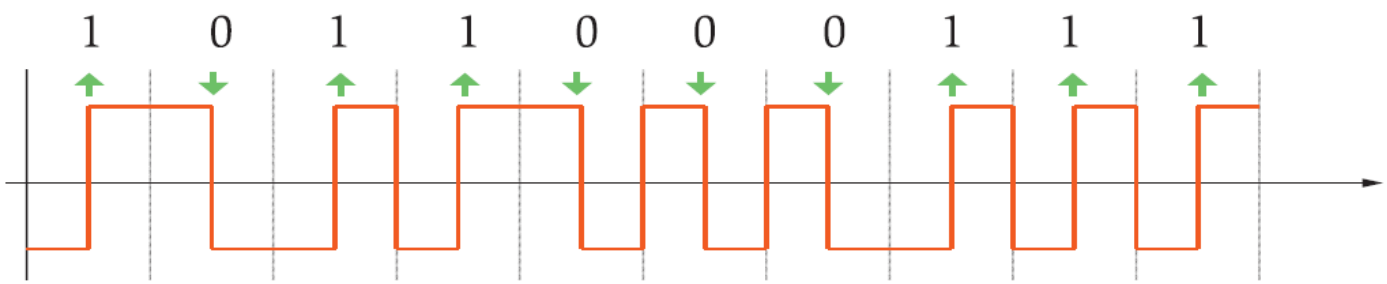
- bitová rychlost, resp. rychlost přenosu dat

  počet bitů / s [b/s]

- oba způsoby vymezování rychlosti se shodují jen při 2-hodnotovém signálu

Dva způsoby vyjadřování rychlosti přenosu

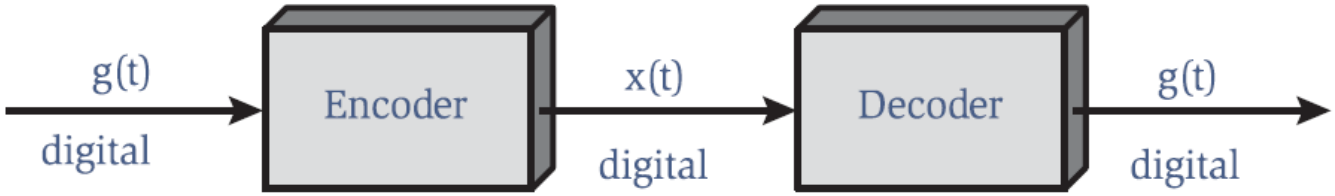
- baudová rychlost > bitová rychlost
  - ✓ např. Manchester kódování, Ethernet – 2 prvky signálu kódují 1 bit,
    - – 0: přechod mezi signálovými prvky jedním směrem,
    - – 1: přechod mezi signálovými prvky opačným směrem
  - ✓ vrozená vnitřní synchronizace kódu usnadňuje realizaci přijímače
  - ✓ pro dosažení 2násobné bitové rychlosti je nutné zečtyřnásobit šířku pásma
  - ✓ dostupná šířka pásma se z využívá pouze z poloviny

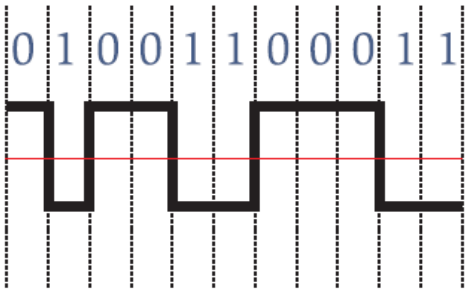


Dva způsoby vyjadřování rychlosti přenosu

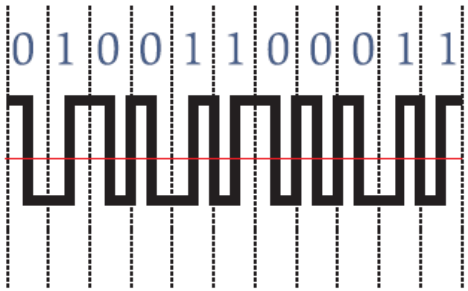
- baudová rychlost = bitová rychlost
  - ✓ 0: jedna hladina signálu
  - ✓ 1: opačná hladina signálu
  - ✓ např. kód NRZ (Non Return to Zero)
- baudová rychlost < bitová rychlost
  - ✓ 2 amplitudy signálu ve 4 hodnotách fáze = 8 (= 2^3) kombinací,
  - ✓ jeden prvek signálu reprezentuje 3-bitovou kombinaci

DD → DS: Digitální data na digitální signál

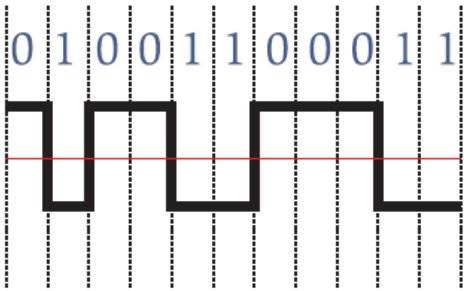




NRZ-L
data v počítači



Manchester
přenos Ethernetem



NRZ-L
data v počítači

DD → DS: Digitální data na digitální signál, baseband

- přijímač musí rozpoznat, kde signálové prvky, tvořící kódy digitálních dat, začínají a končí
- přicházející signál musí být možné vzorkovat prvek signálu po prvku 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 signál se vysílá, tím se také zvyšuje úroveň šumu

DD → DS: Digitální data na digitální signál, baseband, 2

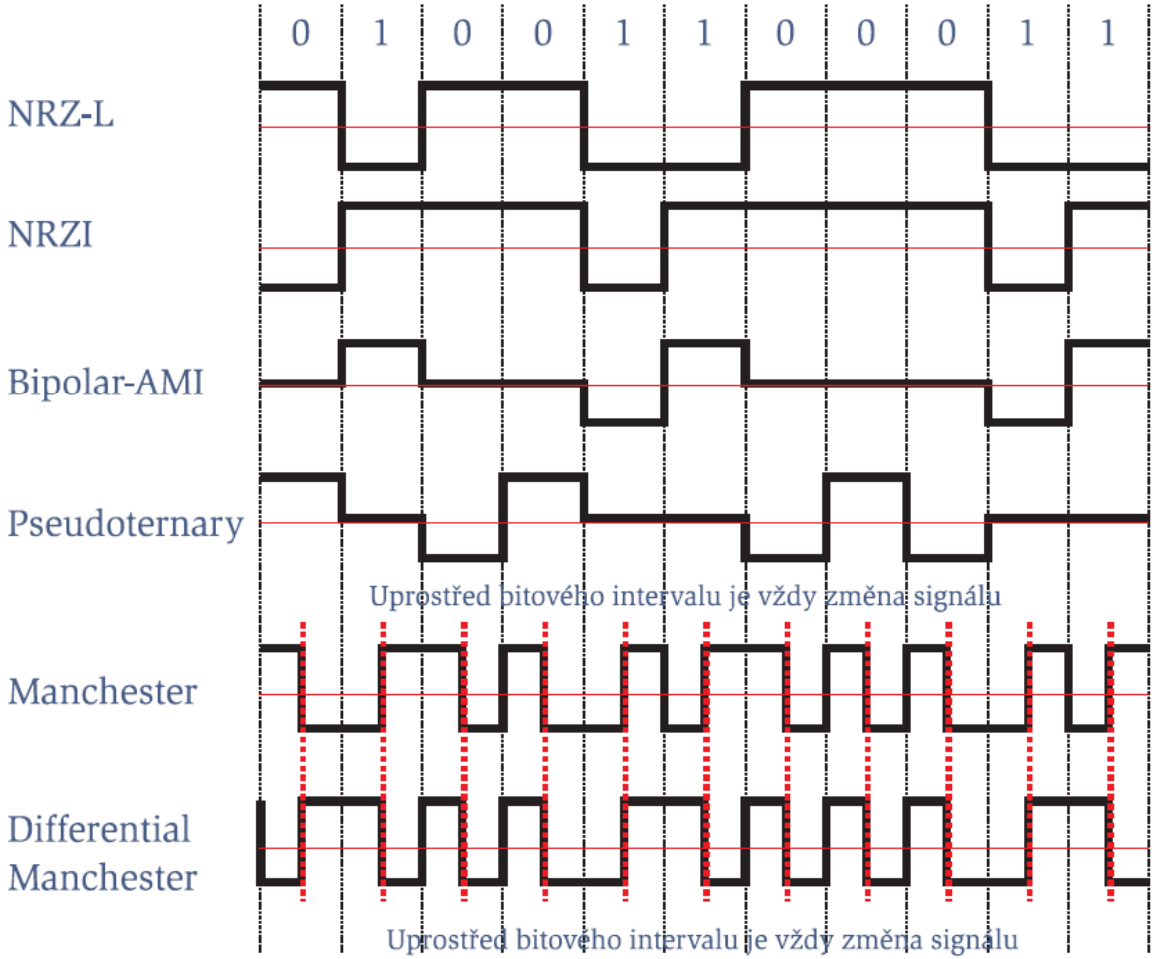
Co určuje jak úspěšně bude přijímač interpretovat přicházející signál?

- rozhodující role hrají
  - ✓ poměr signál/šum (SNR),
  - ✓ rychlost přenosu dat a
  - ✓ dostupná šířka pásma
- s růstem rychlosti dat roste frekvence výskytů chyb,
  BER, *Bit Error Rate*
- s růstem SNR klesá frekvence výskytů chyb
- větší šířka pásma umožňuje zvýšit rychlost přenosu dat

DD → DS: Digitální data na digitální signál, baseband, 3

- podle čeho porovnávat kódovací schémata?
  - ✓ důležitou roli hraje spektrum signálu
  - ✓ odstranění složek s vysokou frekvencí sníží nároky na šířku pásma
  - ✓ když neexistuje stejnosměrná složka, lze signály spřažovat v transformátoru a zajišťuje se dobrá isolace
  - ✓ přenosová funkce je nejhorší na okrajích pásma, využívá se proto spíše střed šířky pásma
  - ✓ kvalita časování vymezuje snadnost určení začátků a konců bitových pozic.
    Jak takovou synchronizaci zajistit ?
  - ✓ roli hraje imunita vůči interferenci signálu a šumu, výkon za přítomnosti šumu
  - ✓ důležitou roli hraje cena a složitost – čím složitější signál se musí použít pro dosažení požadované rychlosti dat, tím je cena vyšší

DD → DS: Přehled diskutovaných kódů



DD → DS: NRZ kódy

- ✓ užívají se pro reprezentaci digitálních dat (modulujících signál) a pro uchovávání magnetickým záznamem
- ✓ pro přenos dat se užívají zřídka a jen na krátké vzdálenosti (metry)

- NRZ-L, *Nonreturn to Zero-Level*
  - ✓ + a - úroveň napětí reprezentuje 0 a 1 (nebo naopak)
- NRZI, *Nonreturn to Zero Inverted one ones*
  - ✓ diferenciální kódování
  - ✓ 1 se kóduje přechodem polarity, 0 se kóduje ponecháním polarity
  - ✓ při dekódování se porovnává polarita sousedních signálových prvků, ne jejich absolutní hodnota
  - ✓ snadněji se dekóduje i za přítomnosti šumu a polarita nemá význam
- problémy NRZ kódů
  - ✓ vymezování časové hranice bitů při dlouhých posloupnostech stejných hodnot (u NRZ-L u obou hodnot)
  - ✓ kumulace stejnosměrné složky při dominanci pulsů jedné polarity

DD → DS: Víceúrovňové binární kódy

- ✓ cílem je odstranění nedostatků NRZ kódů

- Bipolar-AMI, *Bipolar Alternate Mark Inversion*
  - ✓ 0 reprezentuje žádný signál,
  - ✓ 1 reprezentuje + nebo – hodnota napětí
  - ✓ obě hodnoty reprezentace 1 postupně alternují
  - ✓ pokud dojde ke ztrátě jedniček, neztratí se synchronizace
  - ✓ nekumuluje se stejnosměrná složka
  - ✓ je potřebná menší šířka pásma
  - ✓ snadno se detekují chyby

- Pseudoternary
  - ✓ 1 reprezentuje žádný signál,
  - ✓ 0 reprezentuje + nebo – hodnota napětí
  - ✓ obě hodnoty reprezentace 0 postupně alternují
  - ✓ klady a zápory shodné s Bipolar-AMI, žádná další výhoda/nevýhoda

DD → DS: Víceúrovňové binární kódy, 2

- užívají 3 úrovně napětí, nejsou tak efektivní jako NRZ kódy:
  - ✓ každý prvek signálu reprezentuje 1 bit,
    i když by mohl reprezentovat $log_2 3 = 1,58$ bitu
  - ✓ přijímač musí rozeznávat 3 úrovně,
    signál musí být pro udržení stejné pravděpodobnosti bitových chyb
    o 3dB silnější (o 50 % silnější)

DD → DS: Dvoufázová kódovací schémata

✓ cílem je odstranění nedostatků NRZ kódů

- 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 bit. intervalu

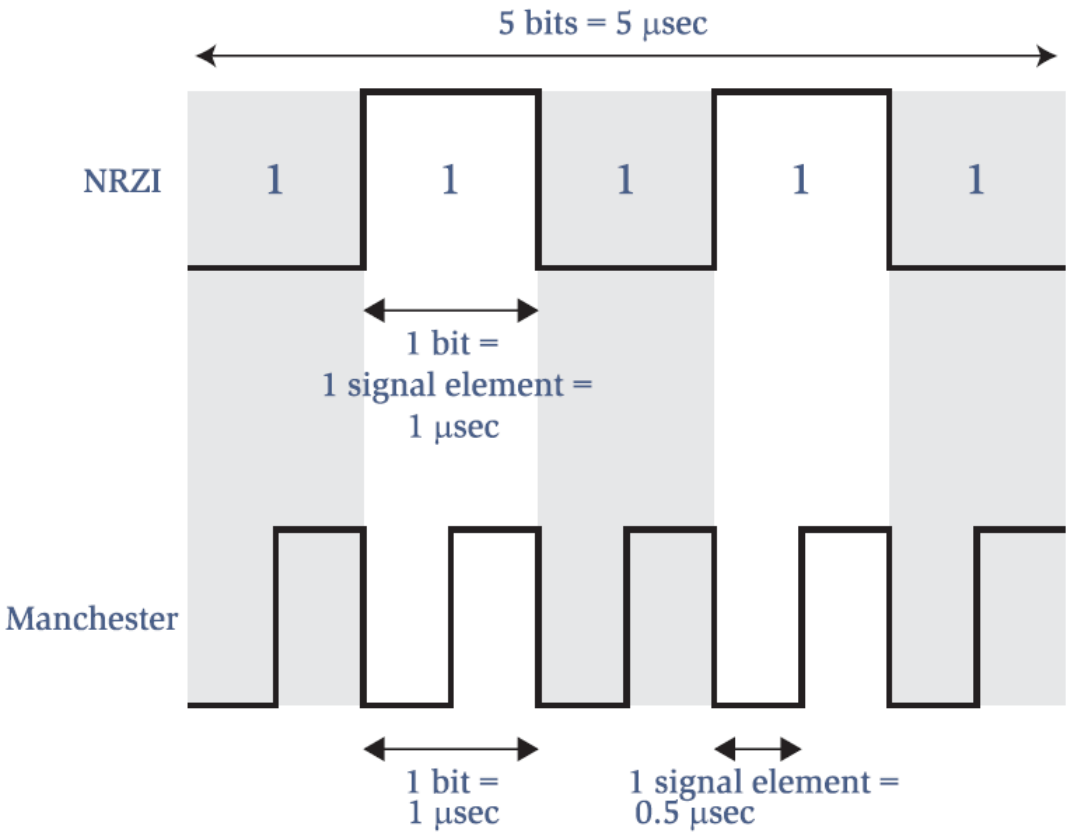
DD→DS: Dvoufázová kódovací schémata,2

charakteristiky dvoufázových kódovacích schémat:

- 2 signálové prvky kódují 1 bit
- modulační rychlost je 2x vyšší než datová rychlost,
- je potřebná dvojnásobná šířka pásma
- přechody mezi signálovými prvky,
  uprostřed bitového intervalu
  - ✓ implicitně zajišťují synchronizaci bitových intervalů
  - ✓ a umožňují detekci chyb – odhalí se chybějící přechod
- nekumuluje se stejnosměrná složka
- používají se např. pro ukládání dat na magnetická média, . . . ,
  pro přenos dat v LAN:
  - ✓ Manchester – IEEE 802.3/Ethernet,
  - ✓ dif. Manchester – IEEE 802.5

DD → DS: Modulační rychlost kódování Manchester

proud binárních jedniček s rychlostí 1 Mb/s

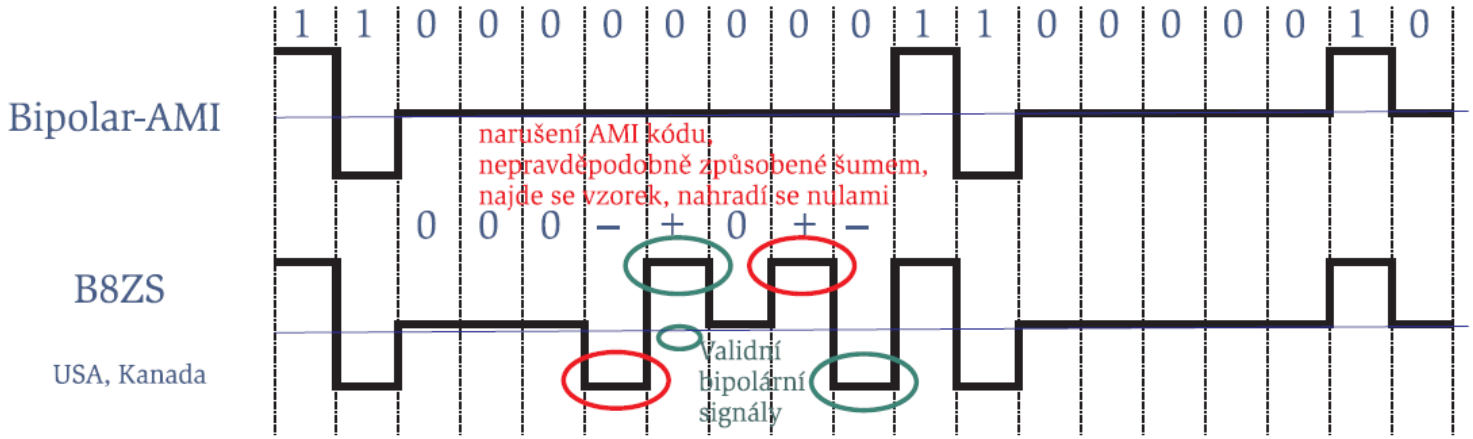


DD → DS: Scrambling (míchání)

- cílem scramblingu je odstranění nedostatku NRZ kódů – „posloupnosti stejných bitů způsobují ztrátu synchronizace"
- Dvoufázové kódy jsou vhodné pro LAN, nejsou vhodné pro velké vzdálenosti
  - ✓ požadují dvojnásobnou modulační rychlost než je datová rychlost
- Scrambling – vlastnosti
  - ✓ posloupnosti stejných (opakovaných) bitů se nahradí posloupností signálových prvků s dostatečným počtem přechodů
  - ✓ (časová) délka posloupnosti musí být zachovaná
  - ✓ přijímač musí být schopen nahrazovací posloupnost vrátit do původního tvaru
  - ✓ nekumuluje se stejnosměrná složka
  - ✓ nesníží se rychlost přenosu dat a přitom lze detekovat bitové chyby

DD → DS: Scrambling (míchání), B8ZS

- B8ZS, *Bipolar with 8-Zeros Substitutions*
  - ✓ řeší nedostatek kódování Bipolar-AMI – dlouhé posloupnosti 0
  - ✓ vsouvá 2 porušení kódu AMI ,,téměř jistě" nezpůsobená šumem
  - ✓ Pokud se vyskytne oktet nul a poslední předcházející puls před ním byl pozitivní, pak se oktet nul zakóduje oktetem 000+–0–+
  - ✓ Pokud se vyskytne oktet nul a poslední předcházející puls před ním byl negativní, pak se oktet nul zakóduje oktetem 000–+0+–



DD → DS: Scrambling (míchání), HDB3

- HDB3, *High-Density Bipolar-3 zeros*
  - ✓ řeší nedostatek kódování Bipolar-AMI – dlouhé posloupnosti 0
  - ✓ Na výstup se pouští nejvýše 3 po sobě jdoucí nuly
  - ✓ Pokud následují za sebou 4 nuly, zavede se porušení bipolarity (2 impulsy téže polarity následující za sebou a význam pulsů se změní).
  - ✓ řetěz 4 nul je nahrazený řetězem s 1 nebo se 2 pulsy
  - ✓ sleduje se počet ,,1'' po posledním porušení bipolarity (je lichý nebo sudý)
  - ✓ nulový počet 1 po posledním porušení bipolarity (např. 0000 a pak 0000) se chápe jako sudý počet

lichý+ ⟶ 000+

lichý- ⟶ 000-

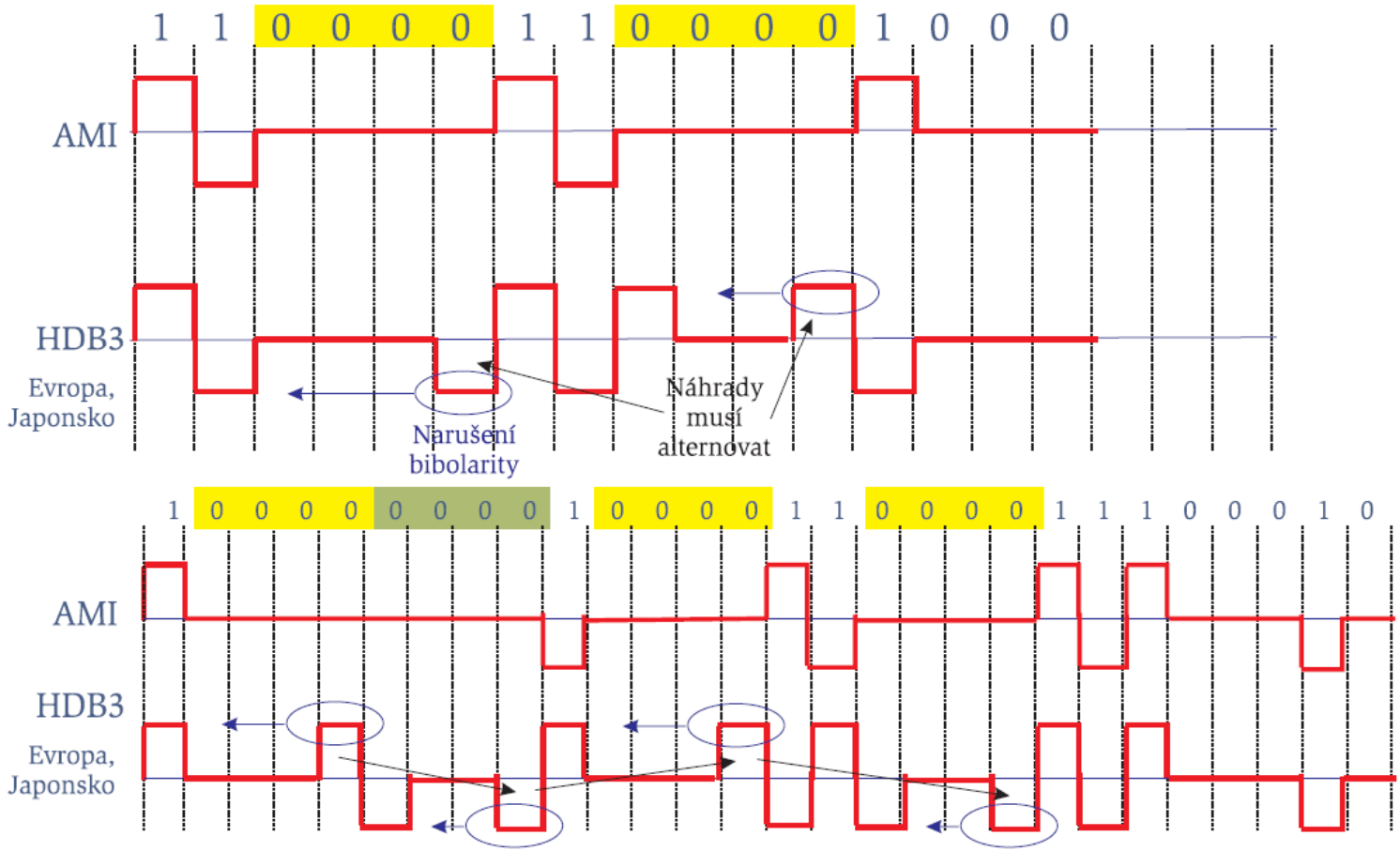
sudý+ ⟶ -00-

sudý- ⟶ +00+

DD → DS: Scrambling (míchání), HDB3

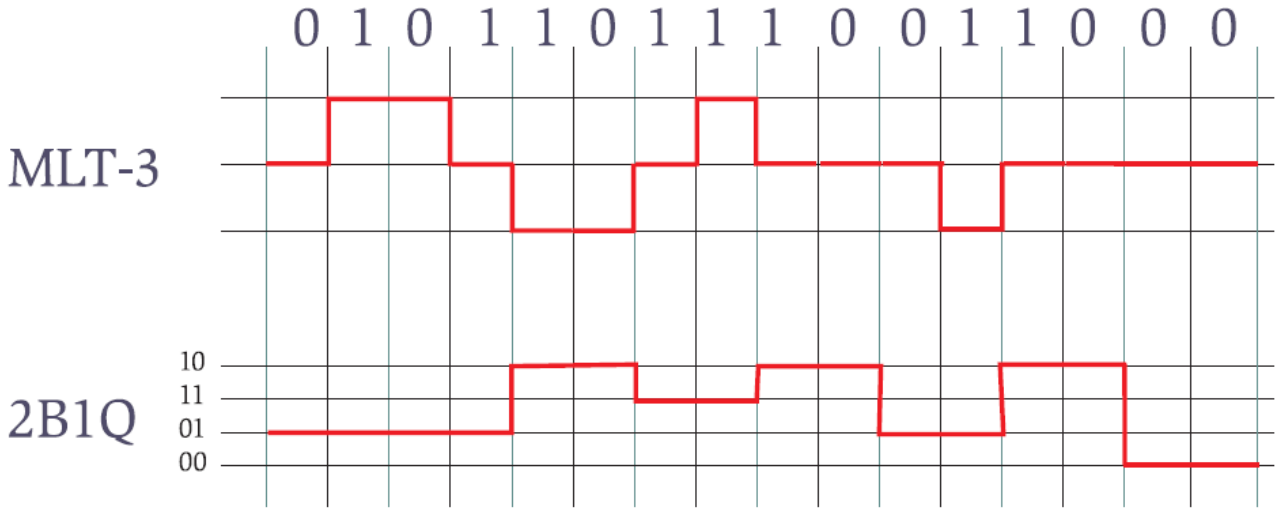
- HDB3, *High-Density Bipolar-3 zeros*, pokrač.
  - ✓ Má-li předchozí impuls opačnou polaritu než poslední porušení bipolarity, převádí se první nula skupiny čtyř nul jako nula.
  - ✓ Má-li předchozí impuls shodnou polaritu s posledním porušením bipolarity, vyjádří se první nula impulsem neporušující bipolaritu.
  - ✓ Druhá a třetí nula skupiny čtyř nul převádějí opět jako nuly.
  - ✓ Nula na čtvrtém místě skupiny nul se vždy vyjádří impulsem, jehož polarita je stejná s posledním předchozím impulsem (porušení bipolarity).

DD → DS: Scrambling (míchání), HDB3



DD → DS: Další kódovací schémata – MLT-3, 2B1Q

- MLT-3 (*Multiline Tx, three Level*)
  - ✓ analogie NRZ-I, 3 úrovně signálu (+1, 0, –1)
  - ✓ přechod z jedné úrovně na příští na začátku bitu 1
  - ✓ žádný přechod na začátku bitu 0
- 2B1Q, (*Two Binary, One Quaternary*)
  - ✓ 4 úrovně napětí, každý puls reprezentuje 2 bity

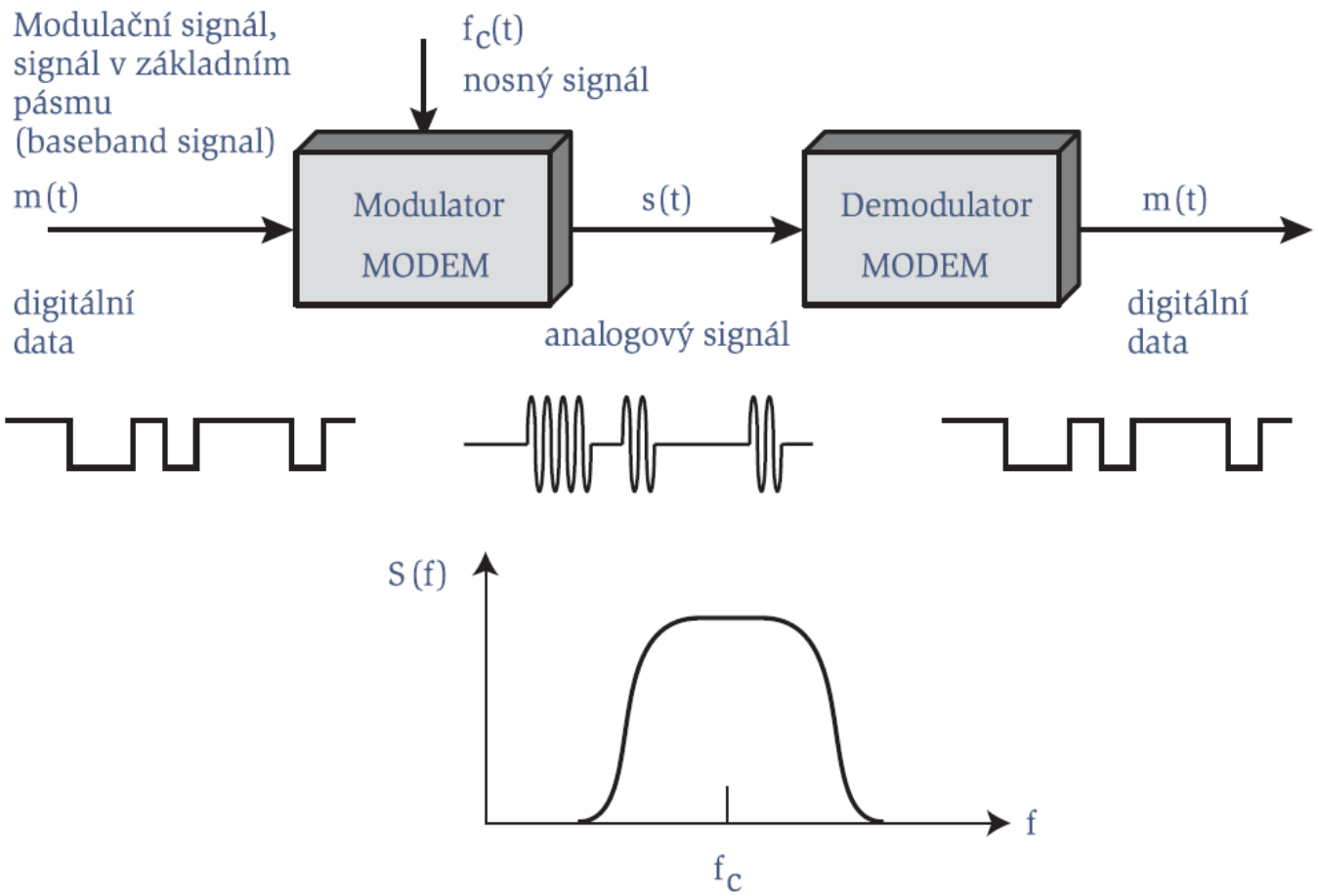


DD → DS: Blokové kódování – 4B/5B

- dosahuje se zvýšení výkonu kódování
- pomocí uměle zavedené redundance
  - ✓ se zabezpečuje synchronizace vč. zadávání protokolárních povelů
  - ✓ se detekují chyby
- postup (4B/5B)
  - ✓ dělení proudu bitů na (4)bitové bloky
  - ✓ náhrada (substituce) originálních (4)bitových bloků (5)bitovými bloky usnadňujícími synchronizaci, detekci chyb a zadávání povelů
  - ✓ nevyužité kombinace 5B pro data se využívají pro povely (protokol)

0000 → 11110	HALT → 00100
0001 → 01001	IDLE → 11111
...	...
0100 → 01010	SET → 11001
...	...
1111 → 11101	

DD → AS: Digitální data na analogový signál



DD → AS: Motivace

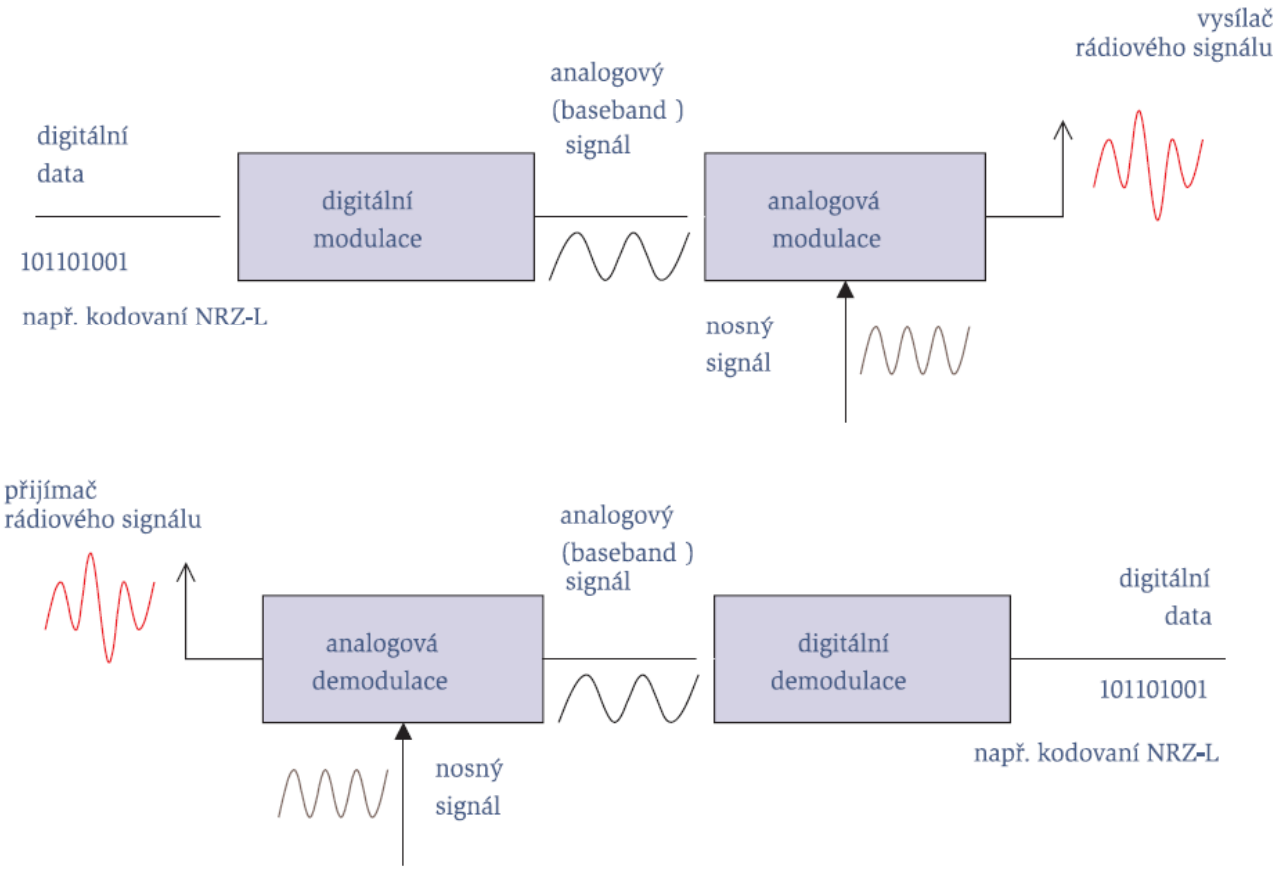
- Veřejná komutovaná telefonní síť, klasické řešení
  - ✓ přijímá/přepojuje/přenáší analogové signály v pásmu 300-3400 Hz
  - ✓ neumí přijímat/přepojovat/přenášet digitálně kódovaná data (NRZ-L, . . .)
- Modem, modulator / demodulator
  - ✓ umí překódovat digitálně kódovaná data (NRZ-L, . . .) na analogové signály v pásmu 300-3400 Hz a vice versa
  - ✓ existují rovněž modemy, které kódují do pásma mikrovln apod.
- existují prostředí pro digitální vysílání nevhodná a vynucující si používání výhradně analogového vysílání (např. bezdrátová prostředí, optická vlákna)

DD ⟶ AS: Digitální modulace, analogová modulace

- digitální modulace
  - ✓ digitální data ⟶ na analogový signál v základním pásmu (*baseband*)
  - ✓ *baseband* – zde ve významu pásmo frekvencí signálu před jeho modulací pro přenos v jiném pásmu frekvencí (0 až f_{max})
  - ✓ základní metody digitální modulace – ASK, FSK, PSK
  - ✓ odlišují se efektivností využití spektra, efektivností výkonu, robustností
- analogová modulace
  - ✓ překládá centrální frekvenci analogového signálu ze základního pásma (analogová data) do pásma nosné rádiové frekvence
  - ✓ výsledný signál zabírá pásmo frekvencí centrované okolo frekvence nosného signálu
  - ✓ Motivace pro používání analogové modulace –

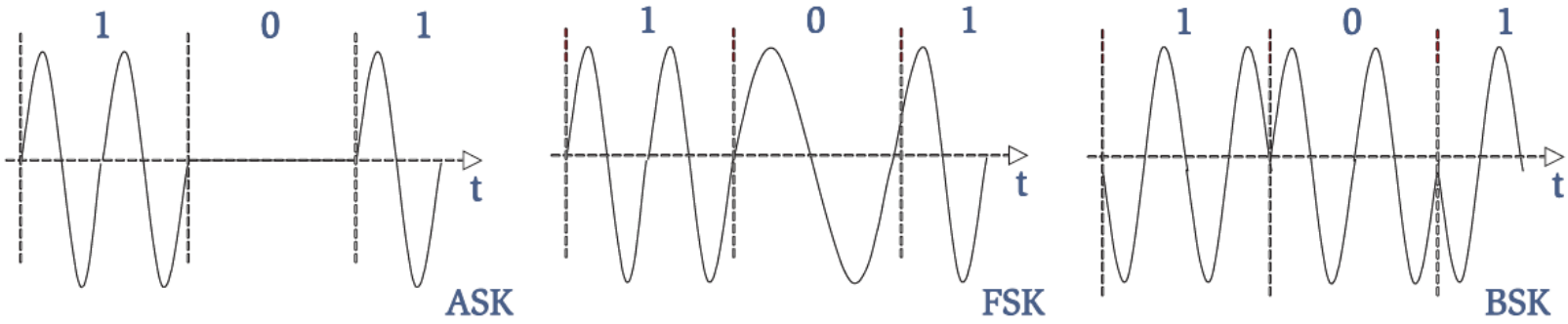
    menší antény (např., $\lambda/4$), lze využít principů FDM, charakteristiky některých médií znemožňují šíření signálu v základním pásmu, . . .

DD → AS: Modulace a demodulace



DD → AS: Metody digitální modulace

- 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



DD → AS: Amplitude-Shift Keying, ASK

- jedna binární jednotka je reprezentovaná existencí nosné složky (s konstantní amplitudou)
- druhá binární jednotka je reprezentovaná absencí nosné složky

$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) & \text{, binární 1} \\ 0 & \text{, binární 0} \end{cases},$$

  nosným signálem je $A\cos(2\pi f_c t)$
- modulační technika
  - ✓ náchylná k chybám při náhle vznikajících změnách
  - ✓ neefektivní na hlasových spojích, použitelná tak tak do 1200 b/s
  - ✓ používaná pro vysílání digitálních dat optickým vláknem pomocí LED – *Light-Emitting Diode* (emitováním nízké a vysoké úrovně světla)

DD → AS: Binary Frequency-Shift Keying, BFSK

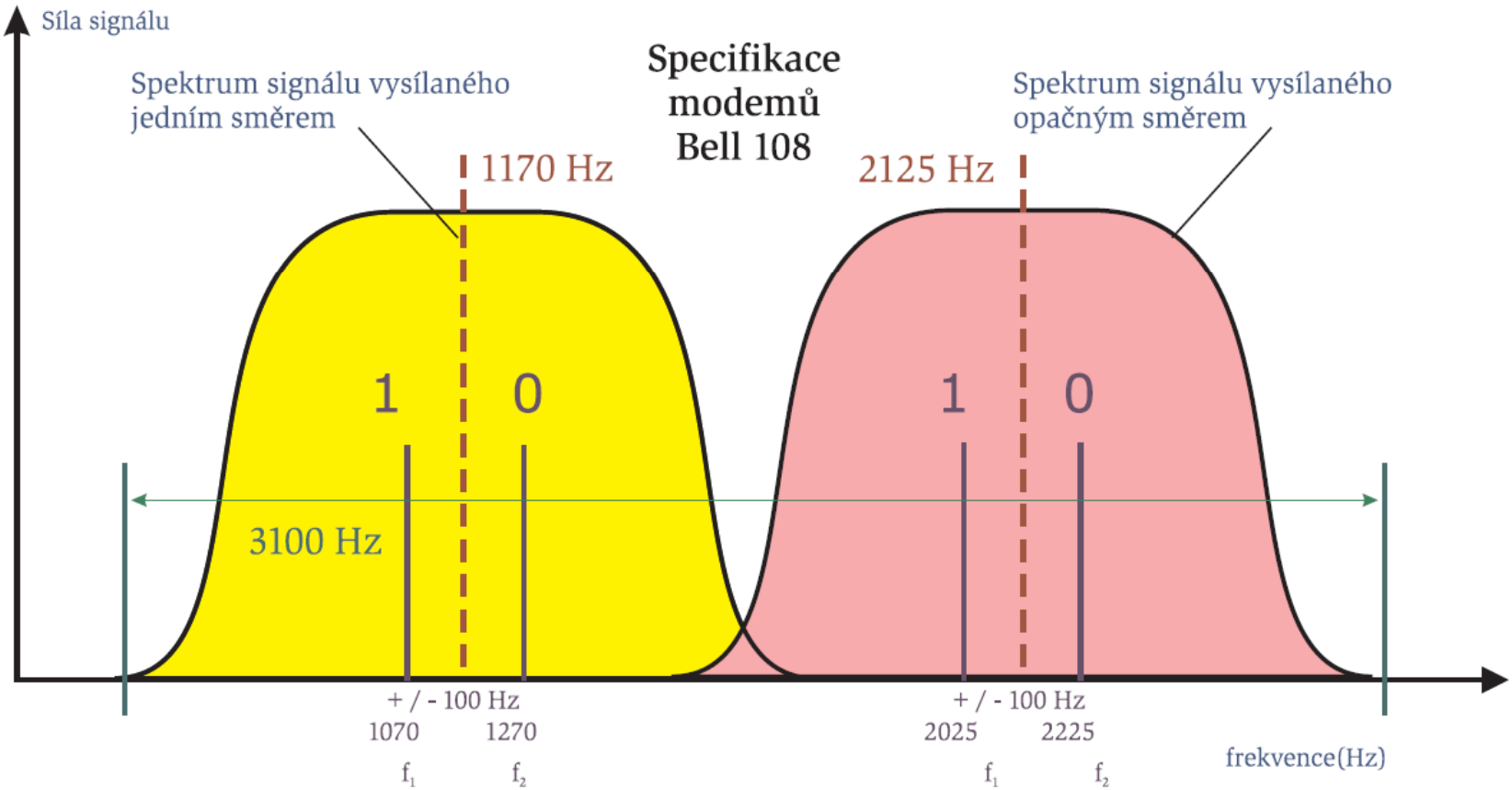
- dvě binární cifry jsou reprezentované dvěma frekvencemi f_0 a f_1 blízkými nosné frekvenci f_c, symetricky pozicované vůči f_c

$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_0 t) & \text{, např. binární 1} \\ A\cos(2\pi f_1 t) & \text{, v tomto případu binární 0} \end{cases}$$

- méně náchylné k chybám než ASK
- na hlasových spojích tak do 1200 b/s
- používá se na vysokých frekvencích (3 to 30 MHz) – *radio transmission*
- může se použít na vyšších frekvencích v LAN budovaných na bázi koaxiálního kabelu

DD → AS: BFSK, plný duplex na hlasovém spoji

šířka pásma hlasového spoje: 300 Hz–3400 Hz



DD → AS: Multiple FSK (MFSK), násobná frekvenční modulace

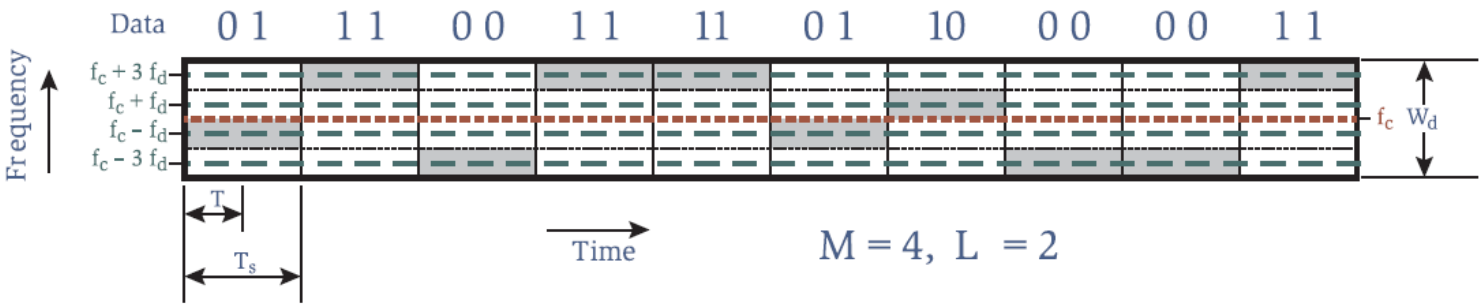
- hodnoty signálových prvků = odlišné frekvence
- počet hodnot signálových prvků (frekvencí): $M = 2^L$,
  L = počet bitů reprezentovaných 1 signálovým prvkem
- lépe se využívá šířka pásma,
  zvyšuje se ale náchylnost k chybám
- vysílaný MFSK signál – hodnota jednoho signálového prvku z M možných signálových 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
$f_c - (M-1)f_d, \ldots, f_c - f_d, f_c + f_d, \ldots, f_c + (M-1)f_d$,
kde f_c ... je nosná frekvence a f_d ... diference hodnot frekvencí

DD → AS: Multiple FSK (MFSK), 2

- 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 $W_d = 2Mf_d = M/T_s$



DD → AS: Multiple FSK (MFSK), příklad

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

DD → AS: Multiple FSK (MFSK), příklad

- $f_c = 250\ kHz,\ f_d = 25\ kHz,\ M = 8$
- $M = 4 = 2^3 \Rightarrow L = 3$
- 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 kHz – 450 kHz = 400 kHz, tj. $2 \times 8 \times 25\ kHz, 2.M.f_d$
- podporovaná modulační rychlost: $f_s = 1/T_s = 2f_d$, 50 kBd
- podporovaná rychlost přenosu dat:(o 50% větší než při $M = 4$)
  $f = L/T_s = L \times f_s = 50 \times L$ kb/s,
  při M = 8 (L = 3) se jedná o 150 kb/s

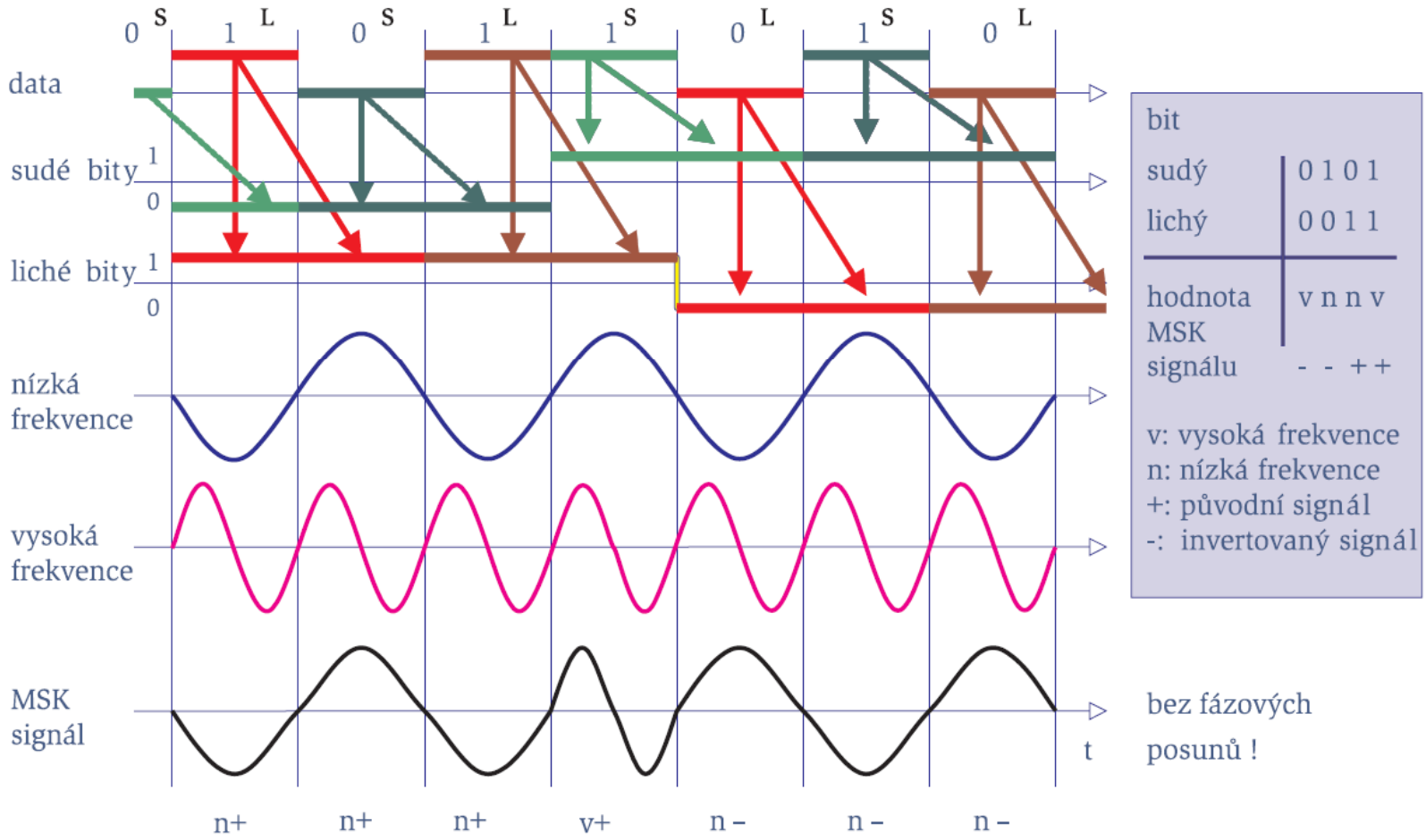
DD → AS: Další forma FSK – MSK, Minimum Shift Keying

- šířka pásma potřebná pro FSK záleží 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

DD → AS: MSK – postup a charakteristiky

- 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

DD → AS: MSK, příklad



DD → AS: Binary Phase-Shift Keying (BPSK)

- (binární) fázová modulace

  pro reprezentaci binárních číslic se používají dvě fázová posunutí

$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) & \text{, binární 1} \\ A\cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{, binární 0} \end{cases}$$

  což je

$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) & \text{, binární 1} \\ -A\cos(2\pi f_c t) & \text{, binární 0} \end{cases}$$

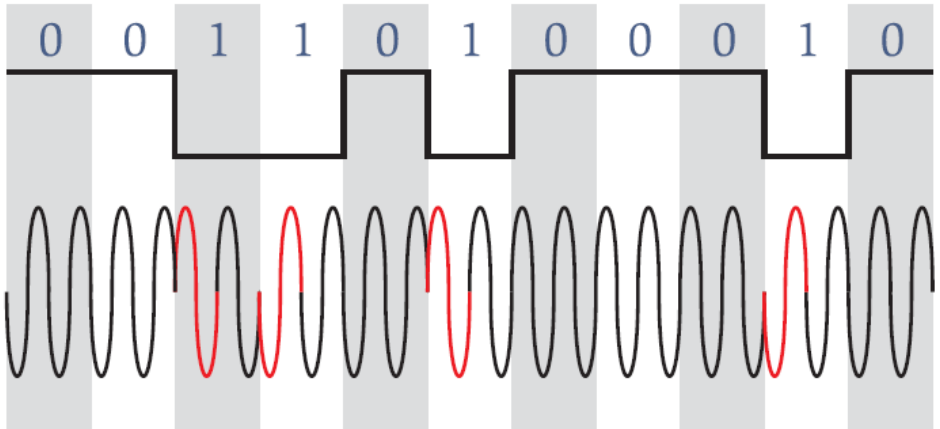
  Pokud proud 1 a 0 definujeme jako $d(t)$ nabývající hodnot +1 a -1 pro bity 1 a 0, pak

$$s(t) = d(t)\cos(2\pi f_c t)$$

- velmi jednoduchá PSK
- špatně se využívá spektrum
- robustní modulační technika, používají ji satelity

DD → AS: Diferenciální typ PSK – DPSK

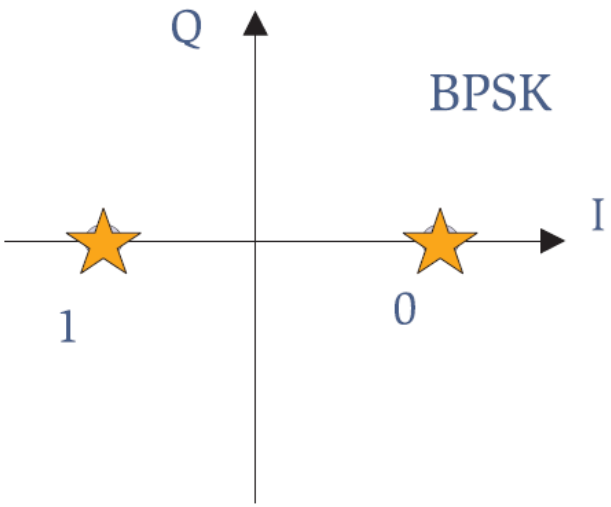
- Diferenciální PSK (*DPSK*)
  - ✓ fázový posun vůči fázi předchozího bitu:
    0 – fáze se nemění 1 – změna fáze o 180°

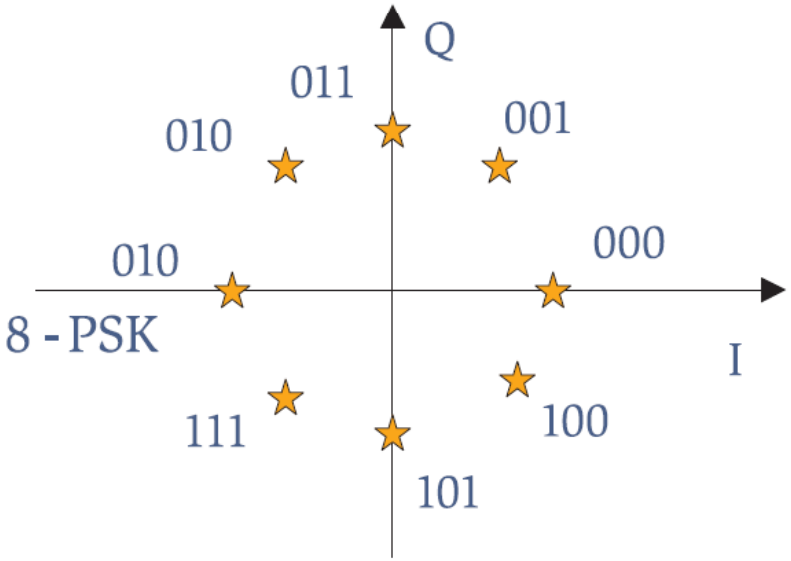


- vyšší bitové rychlosti se dosahuje např. modulací DQPSK (*Differential Quadrature PSK*):
  - ✓ fázový posun vůči fázi předchozí dvojice bitu:
    00 – 0°, 01 – 90°, 10 – 180°, 11 – 270°

DD → AS: Zvyšování bitové rychlosti PSK, M-PSK

- M-ární PSK
  - ✓ využívá se M různých fází,
  - ✓ signálové prvky kódují $n = \log_2(M)$ bitice
  - ✓ případně se doplňuje variabilatia amplitudy v některých fázích



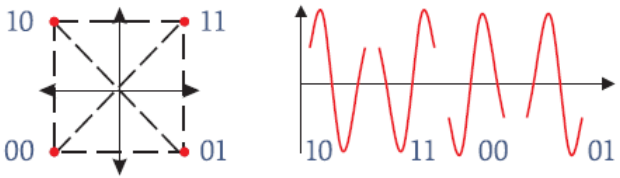


DD → AS: Zvyšování bitové rychlosti PSK, QPSK

- QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*):
- 2 bity kódované 1 prvkem signálu (≡ fázovým posuvem)
- fázový posuv o $\pi/2$, jeden signálový prvek reprezentuje 2 bity

$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t + \pi/4) & , 11 \\ A\cos(2\pi f_c t + 3\pi/4) & , 01 \\ A\cos(2\pi f_c t - 3\pi/4) & , 00 \\ A\cos(2\pi f_c t - \pi/4) & , 10 \end{cases}$$

bitová rychlost je zvýšena na dvojnásobek rychlosti modulační



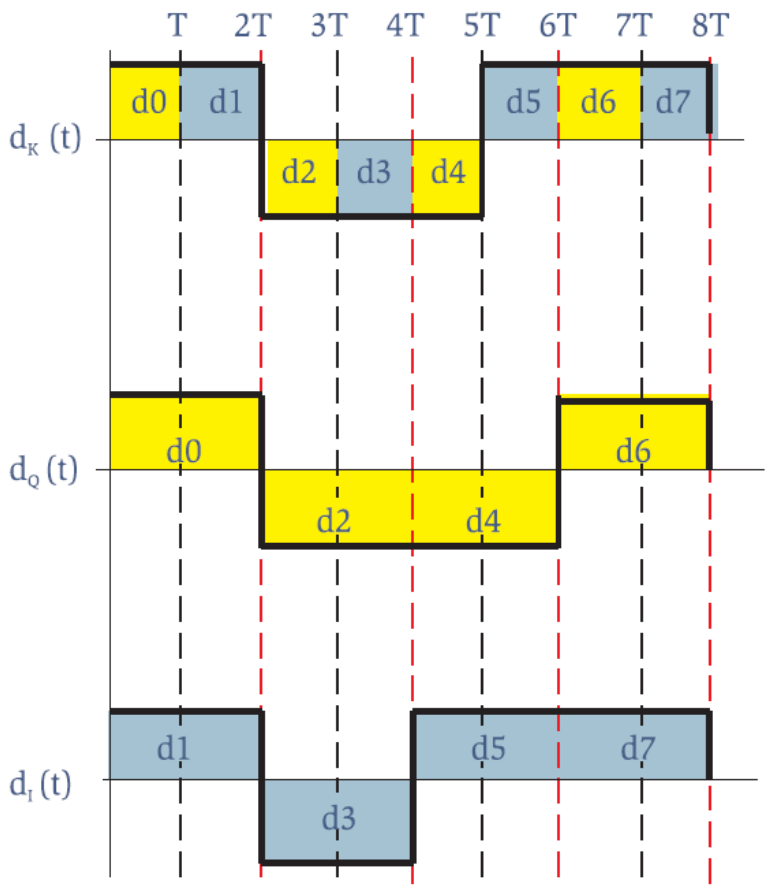
- požaduje menší šířku pásma než BPSK,
  je složitější než BPSK s fázovým posuvem o π

DD → AS: Zvyšování bitové rychlosti PSK, QPSK, 2

- Vstupní bitový proud
  $d_K(t) = d0, d1, d2, \ldots$

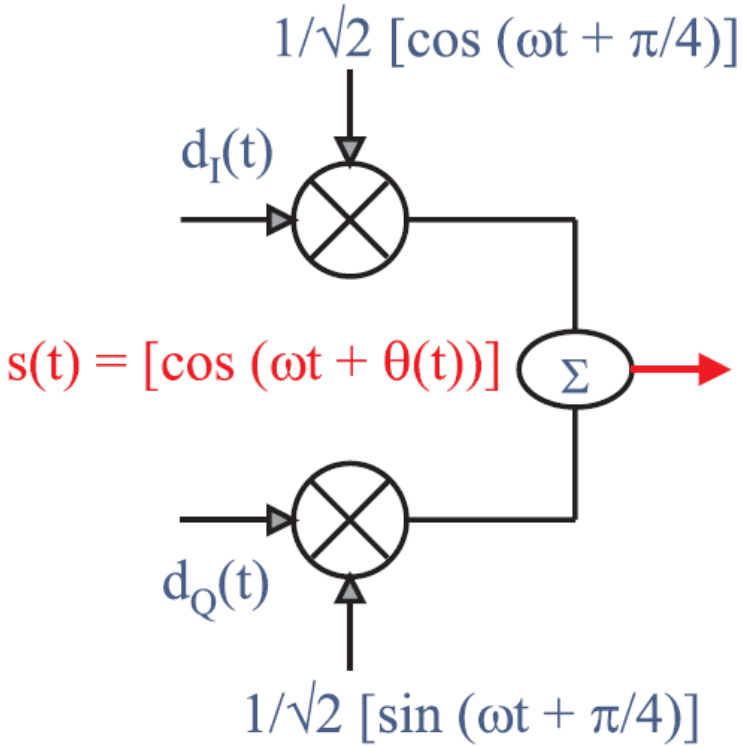
- vstupuje do modulátoru
  rychlostí 1/T b/s
  a je separován
  do dvou proudů
  $d_I(t)$ a $d_Q(t)$
  I – in-phase,
  Q – Quadrature Phase

- obsahujících
  sudé a liché bity:
  $d_Q(t) = d0, d2, d4, \ldots$
  $d_I(t) = d1, d3, d5, \ldots$



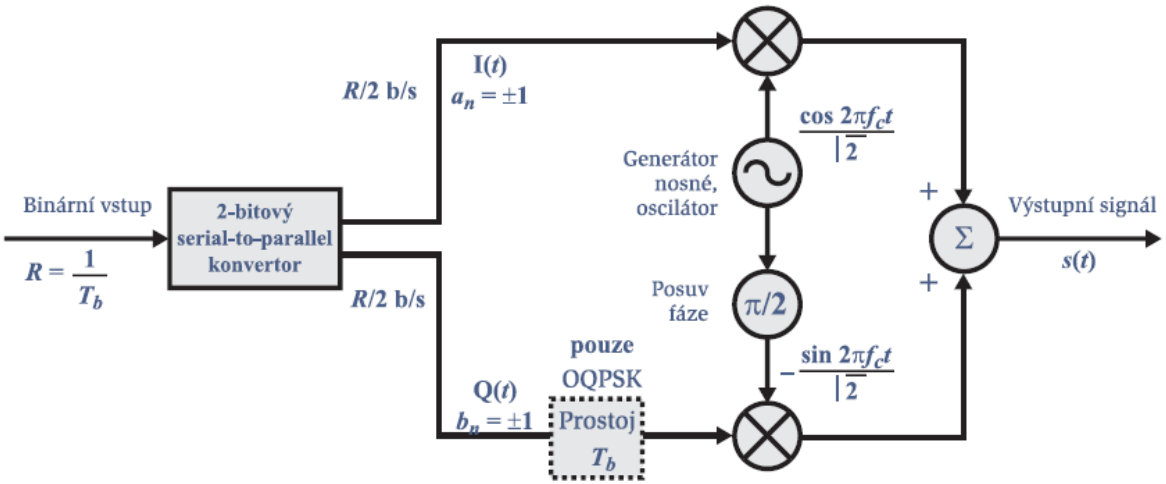
DD → AS: Zvyšování bitové rychlosti PSK, QPSK, 3

- $d_I(t)$ moduluje cosinusovku amplitudou $\pm$
  - To je ekvivalentní posuvu fáze cosinusovky o 0 nebo o π.
- $d_Q(t)$ moduluje sinusovku amplitudou $\pm$
  - vytváří vlnu BPSK ortogonální ke kosinusovce
  - Sumou vzniká vlna QPSK

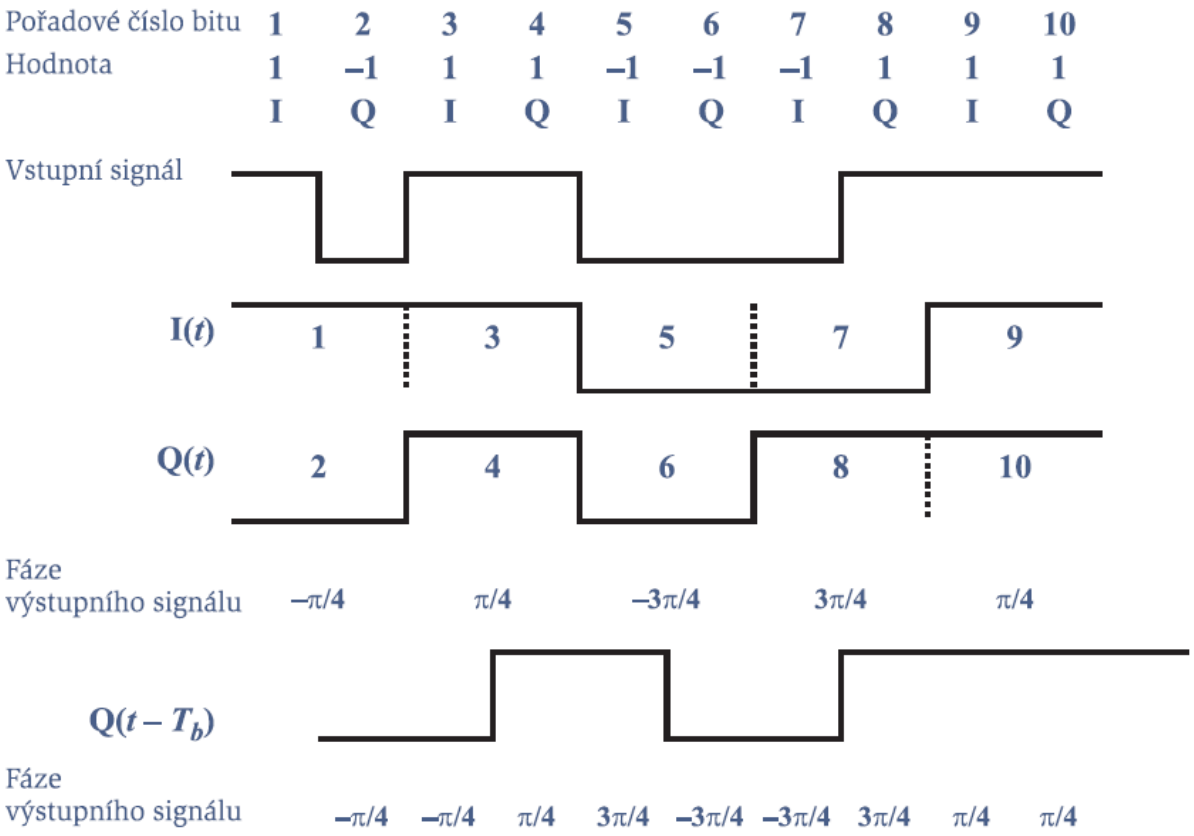


DD → AS: Zdokonalování forem PSK – Offset QPSK, OQPSK

- 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 proudu sudých bitů



DD → AS: Příklad signálů QPSK a OQPSK



fáze se mezi sousedními symboly se může měnit až o π

DD → AS: Zobecňování PSK – MPSK

- víceúrovňová PSK, *multilevel PSK*, MPSK
  - ✓ používá se více fázových posuvů a v každém posuvu lze použít případně i více amplitud
  - ✓ vytváří se tak signálové prvky reprezentující více bitů vysílané modulační rychlostí (viz. Nuyiquistova věta):

$$D = \frac{R}{L} = \frac{R}{\log_2 M}$$

D = modulační rychlost [Baud]

R = rychlost přenosu dat [b/s]

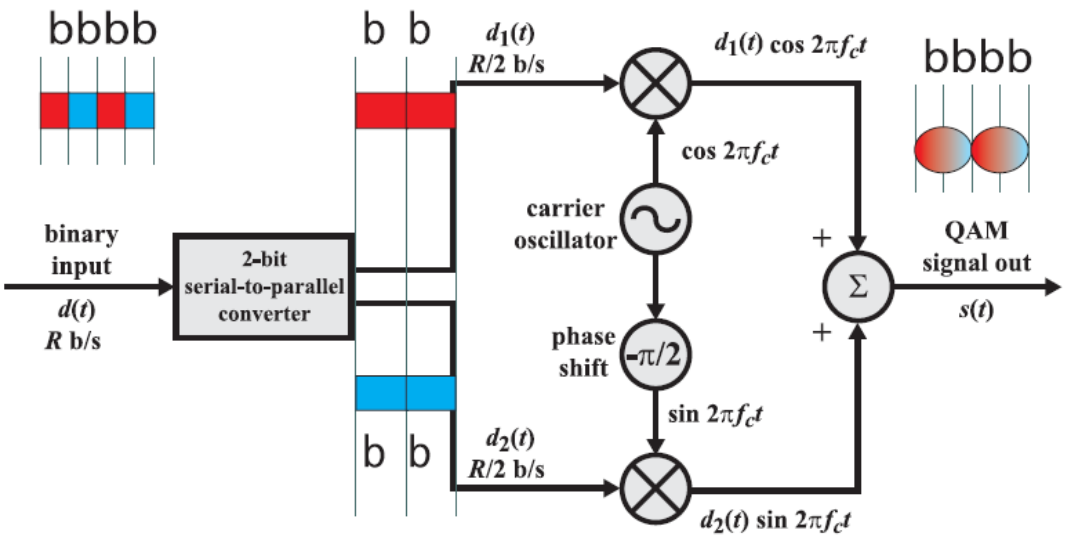
M = počet různých sign. prvků = 2^L, L = b / sign. prvek

  - ✓ příkladem je modulace kombinující ASK a PSK označovaná QAM
    - – *Quadrature Amplitude Modulation*
    - – používá ADSL, viz přednáška Multiplexing, a některé standardy bezdrátových přenosů
    - – QAM lze považovat za logické rozšíření QPSK

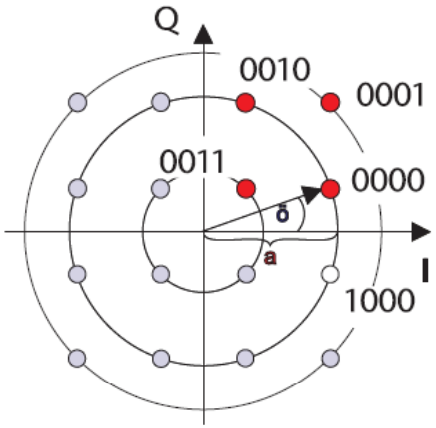
DD → AS: Další typy PSK – QAM

- QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*
  kvadraturní amplitudová modulace, kombinace ASK a PSK
- lze kódovat n bitů jedním signálovým prvkem o 2^n diskrétních úrovní, pro $n = 2$ identita s QPSK
- lze současně vysílat dva různé (nosné) signály o stejné frekvenci, pokud jsou vzájemně posunuté o $\pi/2$,
  $s(t) = d_1(t) \cos 2\pi f_c + d_2(t) \sin 2\pi f_c$
- každý nosný signál je modulovaný pomocí ASK,
  ex. 2 vstupní bitové proudy, každý ve 2 stavech,
  výstupní proud je v $4 = 2 \times 2$ stavech
- s n roste chybovost, chyb je však při srovnání s PSK méně

DD → AS: Další typy PSK – QAM, příklad 16-QAM



Implementace QAM



16--QAM

- ✓ Příklad – 16-QAM (4 bity = 1 symbol), např.
  symboly 0011 a 0001 mají stejnou fázi φ, liší se amplitudou
  symboly 0000 a 1000 mají různou fázi a stejnou amplitudu
- ✓ modulaci16-QAM používaly klasické standardní modemy 9600 bit/s pracující na 1200 Bd spojích

DD → AS: Další typy PSK – QAM

- lze kombinovat i s ASK s víceúrovňovou modulací
  - ✓ Např. modem používá 4-úrovňovou ASK
    (4 úrovně amplitud, každá reprezentuje hodnotu dvojice bitů)
    nebo používá 12 fázových posunutí,
    a přitom 4 z nich mají 2 hodnoty amplitudy
  - ✓ používá se 16 signálových prvků, každý reprezentuje čtveřici bitů —
    na spoji s mod. rychlostí 2400 Bd lze dosáhnout rychlost 9 600 b/s
  - ✓ byly implementovány systémy s 64 i s 256 stavy
  - ✓ Modulační rychlost hlasového spoje díky jeho omezené šířce pásma
    nelze snadno zvyšovat nad 2400 Bd, protože vyšší harmonické složky
    signálu jsou filtrované
  - ✓ Čím větší počet stavů, tím vyšší bitová rychlost při stejné šířce pásma
  - ✓ Čím větší počet stavů, tím vyšší frekvence chyb díky šumu a útlumu

DD → AS: Hierarchická modulace

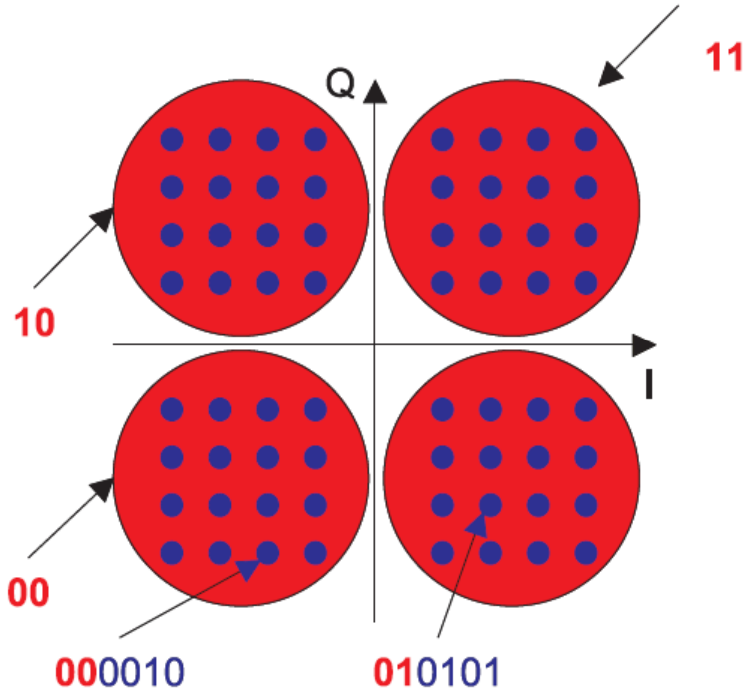
- DVB-T, *Digital Video Broadcasting – Terrestrial*
- moduluje dva separátní datové proudy do jednoho DVB-T proudu
- High Priority proud (*HP*) se skládá dohromady s Low Priority proudem (*LP*)
- hierarchie umožňuje v zašuměném prostředí přijímat pouze HP a je tudíž zachovaná funkčnost, i když s nižší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

DD → AS: Hierarchická modulace, příklad 64-QAM

– 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



AD → DS: Digitalizace analogových dat

- 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 mikrovlnými pojítky

AD → DS: Digitalizace analogových dat, 2

- Digitalizace – konverze ,,analogových dat" na ,,digitální data"
- Řeší zařízení nazývané codec – coder / decoder
- Dvě bázové techniky fungování codecu:
  - ✓ *Pulse Coded Modulation* (PCM),
  - ✓ *Delta Modulation* (DM)

AD → DS: Pulse Code Modulation, PCM

- 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 dekódovat
- na příjmové straně lze pak původní signál rekonstruovat

AD → DS: Pulse Code Modulation, PCM, 2

- 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

    $\Rightarrow$ vzorky se kódují do osmic bitů
  - ✓ pro přenos je nutná rychlost 8 x 8 000 = 64 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

    (plati – zvyšování počtu úrovní snižuje zkreslení signálu, šum)

    $\Rightarrow$ vzorky se kódují do desetic bitů
  - ✓ pro přenos je nutná rychlost 92 Mb/s

AD → DS: Pulse Code Modulation, PCM, 3

- kódování
  - ✓ získávají se analogové vzorky – pulsy s proměnnou amplitudou – vzorky PAM (Pulse Amplitude Modulation)
  - ✓ 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:

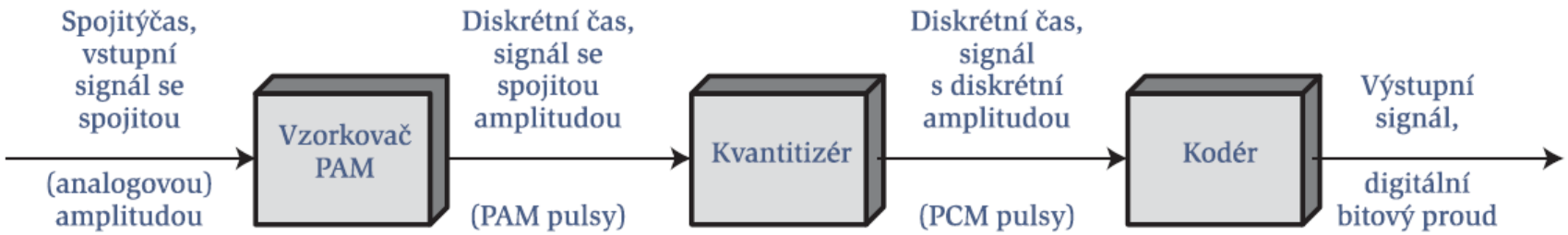
$$SNR_{dB} = 20 \log 2^n + 1,76 = 6,02\, n + 1,76 \text{ [dB]}$$

AD → DS: Pulse Code Modulation, PCM, 4

- 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 od 0. hodnoty,
  - ✓ na nízkoúrovňové (slabé) signály se dostává více úrovní.

AD → DS: Pulse Code Modulation, PCM, 5

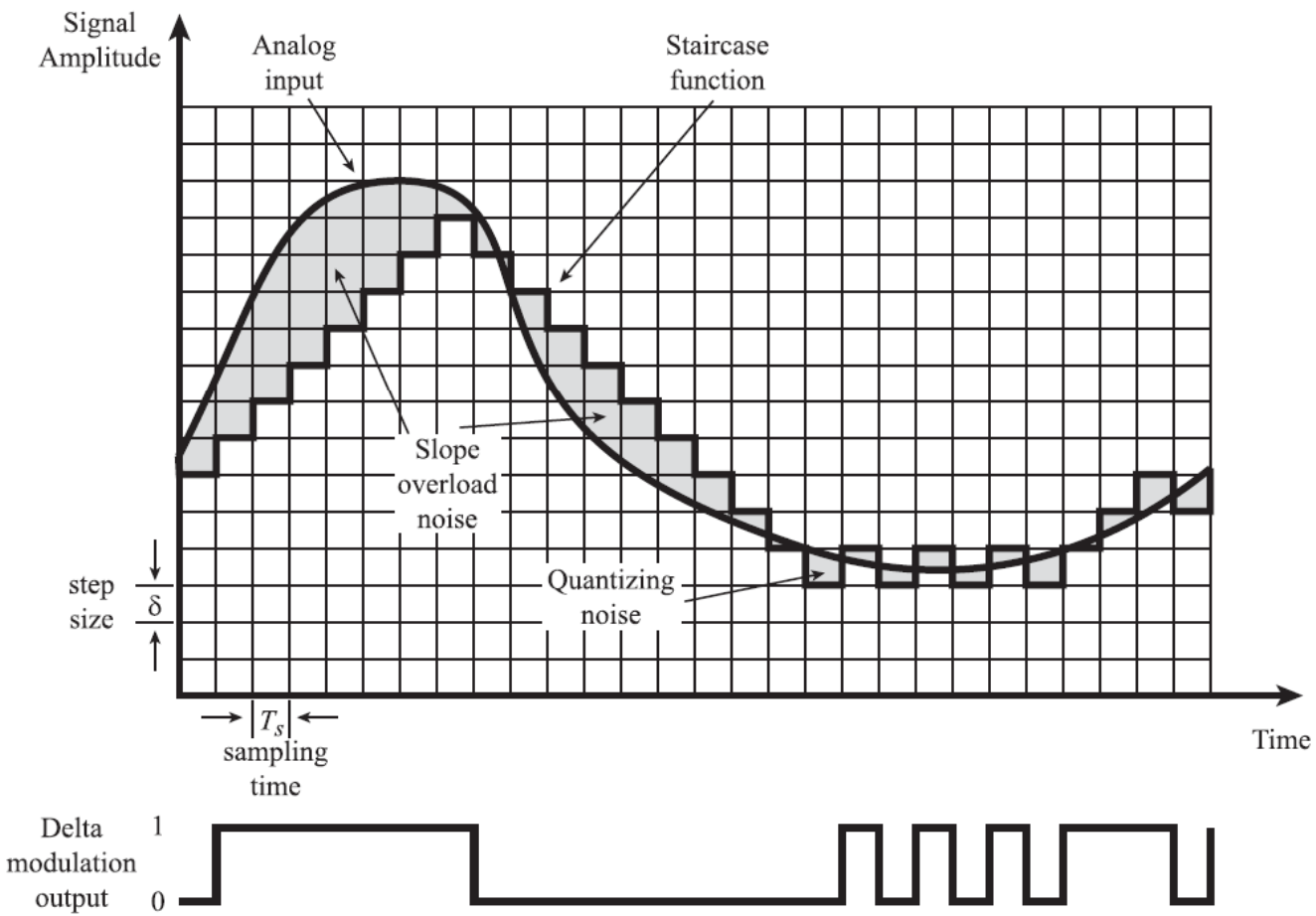
Blokový diagram PCM



AD → DS: Delta Modulace, DM

- 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

AD → DS: Delta Modulace, DM, 2



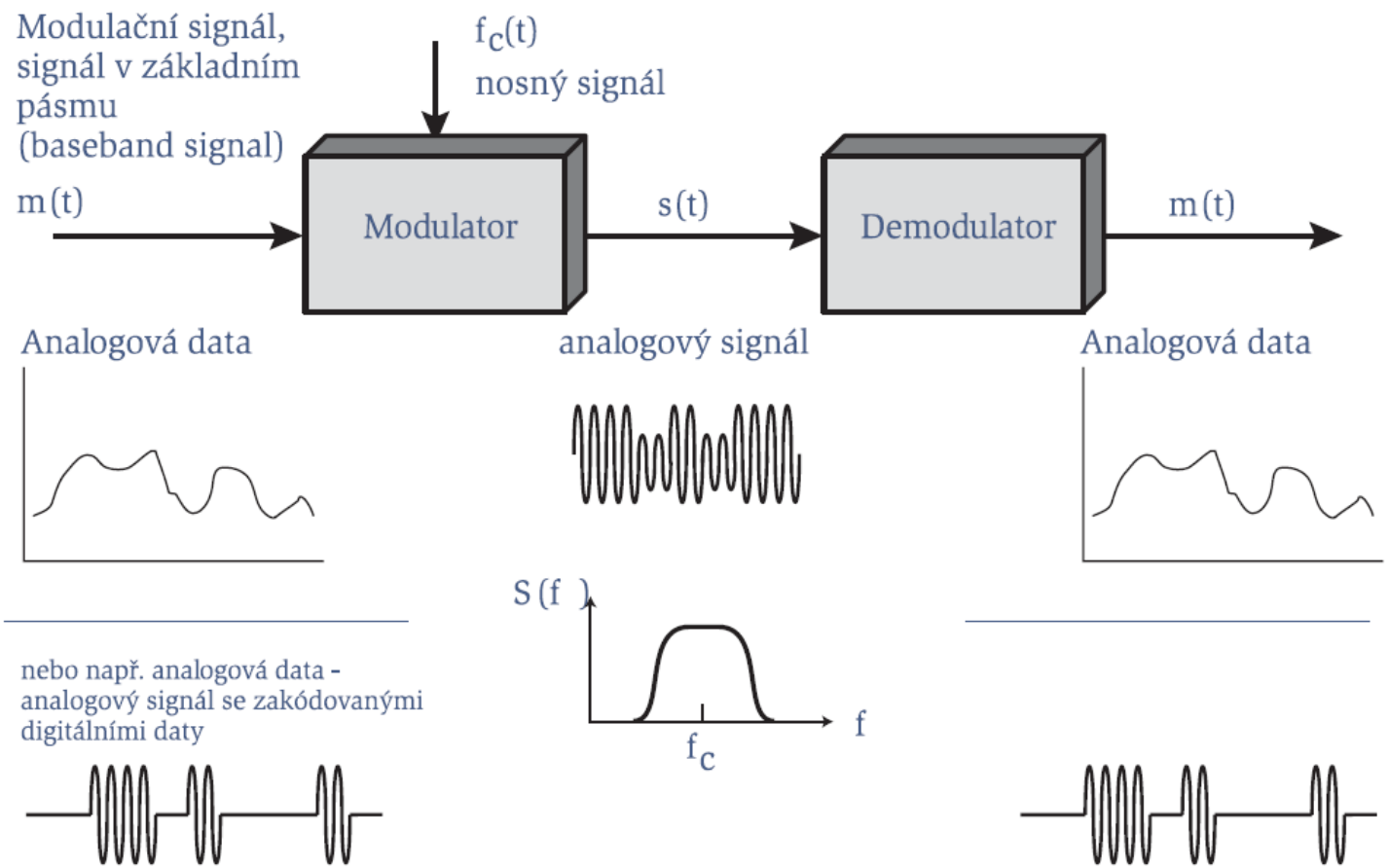
AD → DS: Zhodnocení

- Proč se analogová dat stále šířeji přenášejí digitálními signály
  - ✓ místo zesilovačů se používají opakovače, nevzniká dodatečný šum
  - ✓ násobný přenos více digitálních signálů médiem souběžně se řeší časovým multiplexováním (TDM)
  - ✓ násobný přenos více analogových signálů médiem souběžně se řeší frekvenčním multiplexováním (FDM)
  - ✓ poznáme při výkladu multiplexování, že TDM netrpí mezimodulačním šumem,
    (šířka pásma se nesdílí souběžně, nýbrž střídavě)
  - ✓ digitální signalizace (přenos služebních informací digitálně) usnadňuje implementaci přepojování (switching)
  - ✓ inteligentní mezirámcová komprese umožňuje např. snížit u pomalu se měnících scén rychlost přenosu dat až na 64 kb/s

AD → DS: Zhodnocení, 2

- V telekomunikacích se bude vždy používat jak $AD \rightarrow DS$ tak i $DD \rightarrow DA$ zpracování
  - ✓ valná většina místních ukončení je analogová
  - ✓ sítě používají mix analogových a digitálních technik, např.
    - – digitální data z terminálu budou konvertována modemem na analogový signál
    - – analogový signál bude digitalizován do PCM formy codecem
    - – digitalizovaný výstup codecu bude později konvertována modemem na analogový signál pro bezdrátový přenos satelitem,
    - – . . .
- Analogové signály přenášejí jak hlas, tak i digitální data, pokud se digitalizují, pak platí
  - ✓ techniky typu PCM jsou vhodnější při přenosu dat
  - ✓ techniky typu DM jsou vhodnější při přenosu hlasu

AD → AS: Analogová data na analogový signál



AD → AS: Proč a jak?

- Kódování digitálních dat do analogového signálu se používá když přenosové prostředí je analogové a ne digitální
- Analogová data nejsou de facto nic jiného než jistý analogový signál
- Proč se takový analogový signál konvertuje na jiný analogový signál?
  - ✓ pásma vyšších frekvencí mohou být efektivnější pro přenos (pro základní pásmo by antény musely mít rozměry v km)
  - ✓ lze současně sdílet médium více signály – frekvenční multiplexing
- Princip konverze $AD \rightarrow AS$ – modulace nosného signálu
  - ✓ amplitudová
  - ✓ frekvenční
  - ✓ fázová