

## 7. Diskretizace analogového signálu

Vzorkování, kvantizace, digitalizace.

Aliasing error, lineární a nelineární kódování.

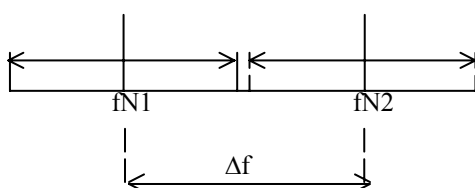
Principy kódového zabezpečení přenosu.

### Diskretizace analogového signálu

Jedná se o převod signálu se spojitým časovým průběhem na jemu odpovídající nespojité, diskrétní vzorky, těmi mohou být např. amplitudy periodických signálů nebo jejich šíře či poloha.

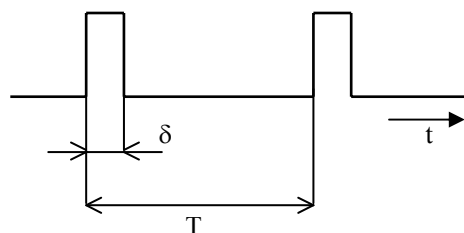
Se značným zjednodušením si lze takové vzorky představit jako jednotlivé kmity AM signálu – špičková amplituda každého z nich je obrazem okamžité hodnoty původního spojitého modulačního signálu. Počet vzorků za jednotku času u AM závisí na nosném kmitočtu. K nejdůležitějším parametrům diskretizace a digitalizace patří tzv. Shannonův teoreme – stanovení minimální přípustné četnosti vzorkování. Jeho pochopení usnadní přesnější analýza principu AM v časovém, kmitočtovém a fázové rovině a představa o kmitočtovém spektru periodických impulsů.

- a) Uvažujeme dvě nosné  $f_{n1}$ ,  $f_{n2}$  amplitudově modulované s vhodným harmonickým signálem. Aby nedošlo k vzájemnému prolínání spekter obou modulovaných AM signálů musí platit:

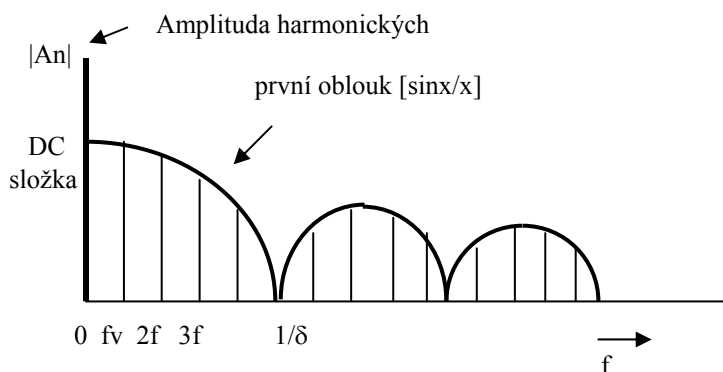


$$\Delta f = f_{N2} - f_{N1} \geq 2f_{\text{modmax}}$$
$$f_{\text{modmax}} \geq (f_{N2} - f_{N1})/2$$

b)



časová rovina



kmitočtová rovina

předpoklad :  $\delta \ll T$   
( $\delta \rightarrow 0$ )

- c) Ovládní amplitudy periodických impulsů analogovým signálem se mění jejich kmitočtové spektrum a obdobně jako u AM nese jeho obsah.
- Diskretizace analogového signálu je základním předpokladem jeho pozdější digitalizace.

### Diskrétní modulační metody

- a) analogově diskrétní  
b) s kvantizovaným vzorkováním  
c) digitální

Spojitý analogový signál (dále uvažujeme s určitou vnucenou DC složkou) vzorkujeme periodickým signálem s četností vzorkování podle Shannon-Kotelnikova teoremu

$f_v \geq 2f_{\text{modmax}}$

Poměr  $f_v/f_{\text{mod}}$  může být libovolně vyšší, tím však dochází k nežádoucímu zmenšování časového prostoru mezi jednotlivými vzorky i doby pro zpracování v reálném čase. Úměrně tomu se zvyšují i požadavky na rychlost obvodů kodeku (kodéru, dekodéru) i šíře pásma pro přenos.

- Podmínky vzorkování:
1. kmitočtové spektrum na vstupu kodéru dokonale omezuje DP1 na  $f_{v\text{stmax}} \leq f_v/2$
  2. vzorkovací impulsy musí být dokonalé periodické ( $f_v, \delta, \text{spektrum, fázový jitter}$ )
  3. kmitočtové spektrum na výstupu dekodéru, dokonale omezuje DP2 ba  $f_{v\text{st}} \leq f_v/2$

## **Multiplikativní vzorkování (součinnové)**

Vstupní signál  $F(t)$  po průchodu DP1 určuje amplitudu diskrétních vzorků  $F_v(t)$  vytvářených ovládním elektronického vzorkovacího spínače S taktem periodických vzorkovacích impulsů  $f_v$  se spektrem  $S_v(t)$ .

OBR.5

Pokud by vstupní signál byla pouze DC složka kmitočtové spektrum signálu  $F_v(t)$  by přesně odpovídalo spektru vzorkovacích impulsů  $S_v(t)$ . Multiplikativním vzorkováním amplitud jednotlivých vzorků proměnným signálem  $F(t)$  navíc dochází ke vzniku postraních kmitočtů (pásem) kolem jednotlivých harmonických a DC složky – opět vidíme určitou analogii s AM. Přitom pouze část z celého komplexního spektra stačí k reprezentaci a opětovně k rekonstrukci původního analogového signálu – její DC složka + její postraní modulační pásmo. Všechny ostatní produkty se potlačí kmitočtovou filtrací jako redundantní (nadbytečné).

V obvodu kodéru se získané multiplikativní vzorky upravují do některého tvaru analogového diskrétního signálu (PAM, PSM, PPM), který může tvořit baseband pro modulaci (klíčování) vysílače. Tyto modulace se také označují jako analogové diskrétní lineární nekódované.

Na straně dekodéru se demodulovaný baseband převádí zpět na vzorky  $F_v(t)$ . Jejich průchodem dolní propustí DP2 je obnoven původní analogový signál  $F(t)$  včetně DC složky.

OBR.77

- a) Libovolný analogový signál (např.  $\sim 1$  kHz) s DC složkou v časové rovině.
- f) Vstupní analogový signál je kmitočtově omezen DP1 s mezním kmitočtem (např. 20 kHz)
- b) Vzorkovací impulsy  $S_v(t)$  s opakovacím kmitočtem (44 kHz)
- g) Část kmitočtového spektra vzorkovacích impulsů (první oblouk)
- c) Amplitudově modulované vzorky vstupního signálu ( $F_v(t) = F(t) \cdot S_v(t)$ ), současně signál PAM
- h) Po průchodu DP2 jsou ze spektra multiplikativních vzorků odstraněny všechny složky vyšších řádů a tedy obnoven původní analogový signál  $F(t)$ .
- c) PAM - pulsně amplitudová modulace, nositelem informace je amplituda vzorku.
- d) PSM (PWM) – amplituda každého vzorku se převádí na proporcionální šíři impulsu konstantní amplitudy.
- e) PPM – v závislosti na amplitudě vzorku se mění poloha (fáze) impulsů konstantní amplitudy a šíře.

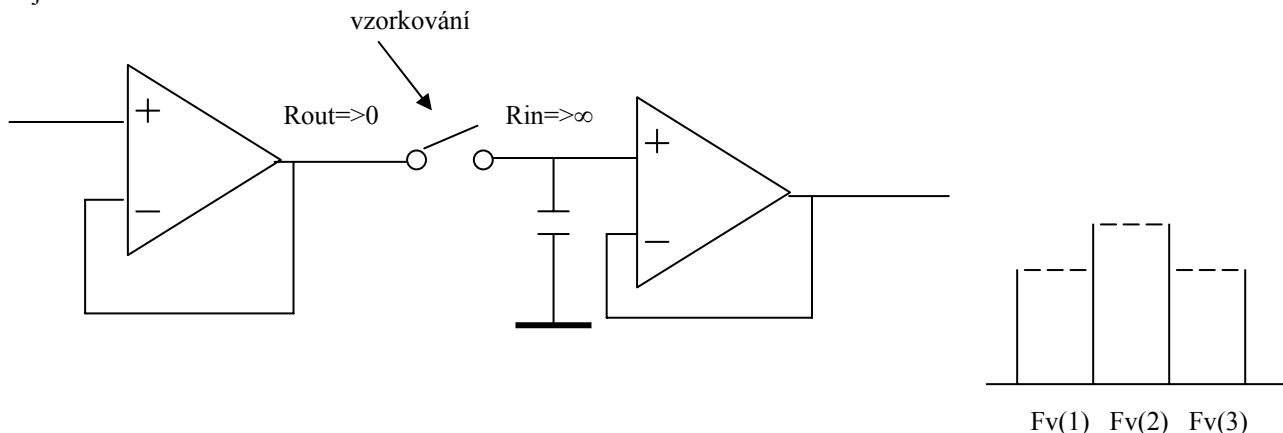
K základním nedostatkům těchto metod patří:

- a) Možnost užití pouze v reálném čase
- b) Omezená přenosová rychlost a tedy i kapacita kanálu
- c) Nedostatečná odolnost vůči rušení a bezpečnost přenosu dat vůbec

Mezistupněm mezi diskretizací a digitalizací je kvantizace.

## Kvantizované vzorkování

Kvantizace znamená přiřazení určitého omezeného počtu vzorků  $F_v(t)$  v rozsahu zobrazení. Smyslem kvantizace je však především zajištění času potřebného pro převod diskrétního vzorku  $F_v(t)$  na jeho digitální tvar, číslo. Každý vzorek se kvantizuje pomocí paměťového členu SAMPLE&HOLD, který jej uchová po určitou dobu, v mezním případě až do výskytu následujícího vzorku.



OBR.6

Vzorkování při kvantizovaném zpracování v kodéru musí být vzájemně synchronizovány.

## Digitalizace

OBR.7

Digitální signál vytváří ze vzorků kvantizovaného signálu (S+H) A/D převodník. Tím se charakter basebandu zcela mění - je číslicový. Opačnou konverzi v dekodéru zajišťuje převodník D/A.

Dvojnásobná konverze A/D, D/A a uplatnění přenosu celého řetězce včetně dynamiky signálu a vlivu propustí DP1, DP2 jsou příčinami vzniku statické kvantizační chyby ( $\pm 1$  bit) a kvantizačního šumu. Příklad vzniku obou odchylek pro A/D konverzi ( $\pm 1/2$  bitu) je na obr.61.

OBR.61

Potřebná přenosová rychlost systému vyplývá z poměru mezi rozsahem přenášených dat a dobou, která je pro jejich přenos k dispozici. Výchozím bodem pro optimalizaci přenosové rychlosti je určení vzorkovacího kmitočtu pro daný typ dat. Dále uvažujeme jednoduchý binární signál v sériovém tvaru s lineárním kódováním.

## Lineární kódování

Přenosovou rychlost pro lineární sériový signál určuje vztah  $v = f_v \cdot \log_2(U_{\max}/U_{\min})$  ( $U_{\max}/U_{\min}$  = rozsah dat)

1. Porovnejme analogii s AM jako příklad náhodné volby "vzorkovacího" kmitočtu při poměru  $f_{\text{mod}} \ll f_N$   
 $f_{\text{mod}} = 4,5 \text{ kHz}$   
 $f_N = [f_v] = 1 \text{ Mhz [Sv]}$   
 $U_{\max}/U_{\min} = (256/1) = 2^8 = 8 \text{ bitů}$   
 $v = f_v \cdot \log_2(256/1) = 1 \cdot 10^6 \cdot 8 = 8 \text{ Mbit/s}$
2. Optimalizovaná přenosová rychlost s využitím vztahu  $f_v = 2f_{\text{modmax}}$ .  
 $v_{\min} = f_v \cdot \log_2(256/1) = 9 \cdot 10^3 \cdot 8 = 72 \text{ kbit/s}$

Z rozdílu obou příkladů vyplývá nezbytnost optimalizace vzorkovacího kmitočtu jak z hlediska vlastního přenosu, tak z hlediska požadavků na technické parametry zařízení.

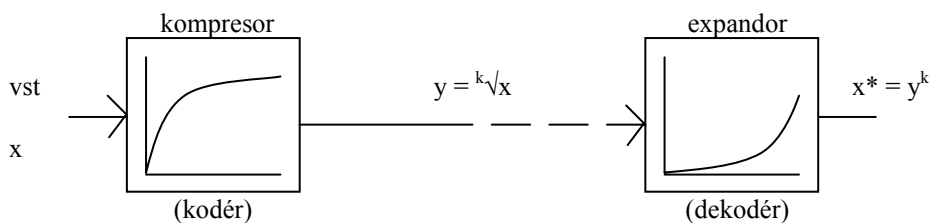
U klasického lineárního kódování lze kvantizační zkreslení a šum omezovat pouze zvyšováním rozlišovací schopnosti, tj. počtem kvantizačních hladin rozsahu na úkor propustnosti přenosového kanálu. Lineární systém s postupným přenosem a optimalizovaným vzorkovacím kmitočtem již další zvýšení přenosové rychlosti neumožňuje.

## Nelineární kódování

Pro zlepšení odstupu S/A tj. kvantizačního šumu, se často užívá tzv. maskování poměrnou úrovní signálu. Je založeno na poměrné velikosti kvantizačního kroku závislé na okamžité úrovni signálu. Nelineární kódování zajišťuje v kodeku tzv. komparator, dvojice obvodů kompresor, expandor s nelineárními, vzájemně inverzními a navzájem kompenzujícími převodními charakteristikami. Pro malé signály je kvantizační krok velmi jemný, s nárůstem  $U_{\text{vst}}$  rozlišení klesá. Při omezení přenosové rychlosti tak lze dosáhnout vyšší přenosové kapacity kanálu.

OBR.8

Zjednodušený příklad:

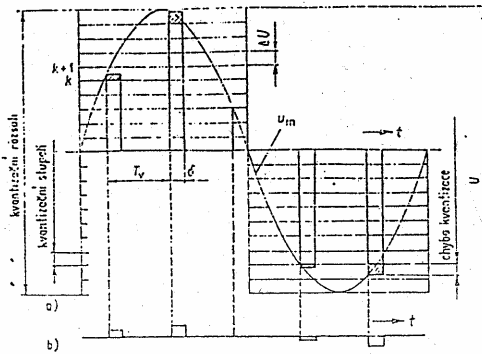
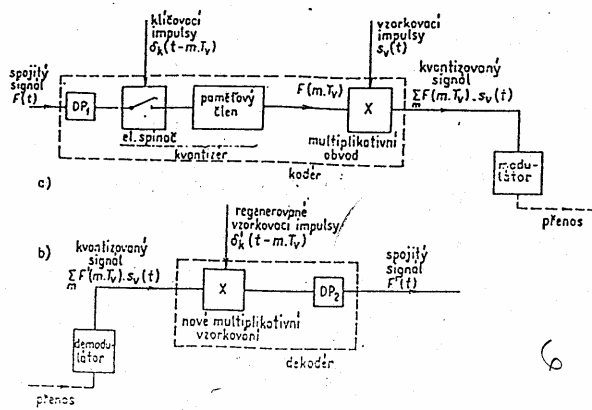


x	0	1	2	5	10	100
y	$\sqrt{0}$	$\sqrt{1}$	$\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$	$\sqrt{10}$	$\sqrt{100}$
$x^*$	0	1	2	5	10	100

V praxi se užívají spojitě nelineární funkce obou charakteristik a běžné lineární A/D a D/A převodníky.

## Systémová zkreslení

- lineární, působená např. propustmi DP1, DP2
- nelineární, např. nedokonalost vzájemně inverzních průběhů kompresoru – expandoru.
- Interferenční, např. nedokonalost potlačení  $f_{\text{modmax}}$ , nedokonalost A/D a D/A konverzí.
- kvantizační, závisí na úrovni signálu a kvalitě kodéru/dekodéru.



Obr. 61. Systém lineárního kódování  
a) princip analogově číslicového převodu, b) chybový signál způsobující kvantizační zkreslení

