



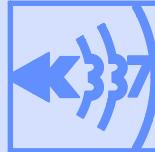
# Audiovizuální technika

## Záznam a zpracování (zvukových) signálů



Czech Technical University in Prague  
Faculty of Electrical Engineering  
Department of Radioelectronics  
<http://radio.feld.cvut.cz>  
Technická 2  
166 27 Prague 6

Department of  
Radioelectronics  
K13137



František Rund  
<http://mmtg.fel.cvut.cz/>



# Osnova

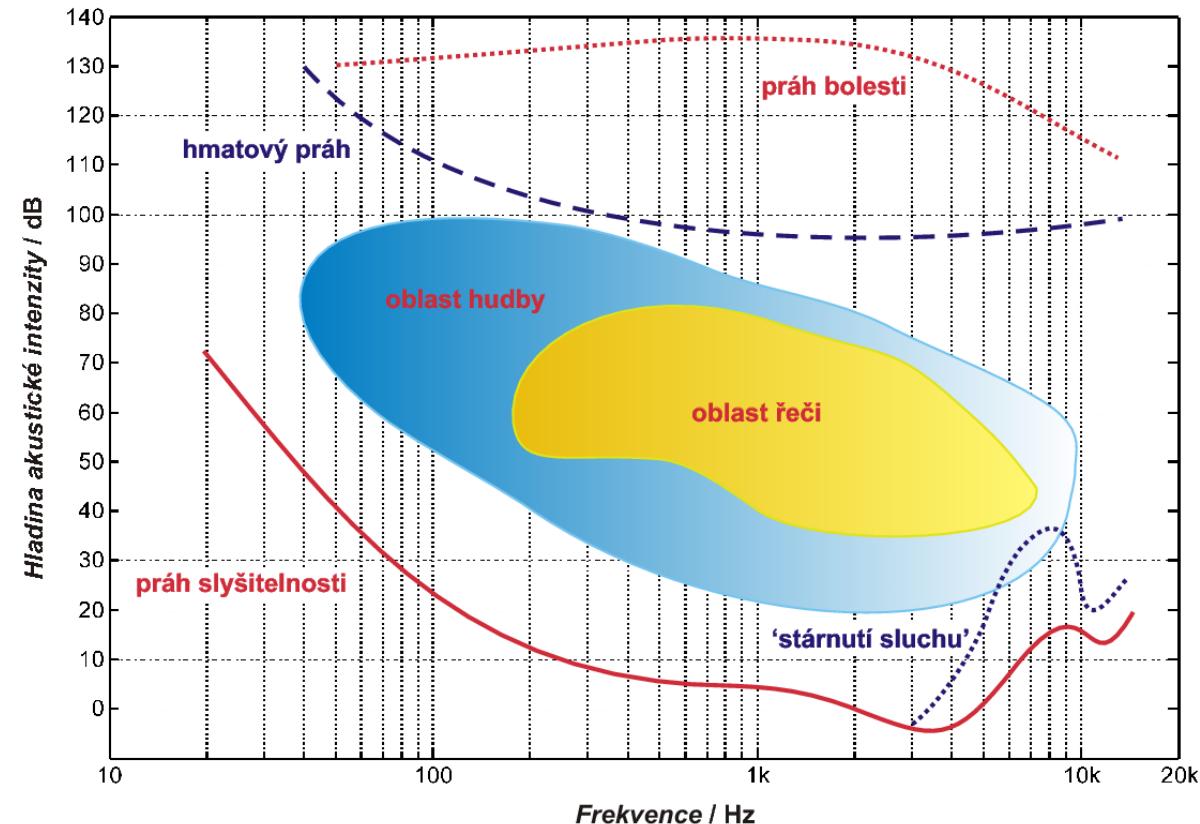
## Okruh SZZ : Vzorkování, kvantování a zdrojové kódování zvuku

- Záznam, zpracování a zdrojové kódování zvuku.
  - Analog x digital
    - Specifika digitálního zvuku
    - Oprava chyb (kanálové kódování)
  - Zdrojové kódování - komprese
  - Principy záznamu zvuku



# Akustické pole

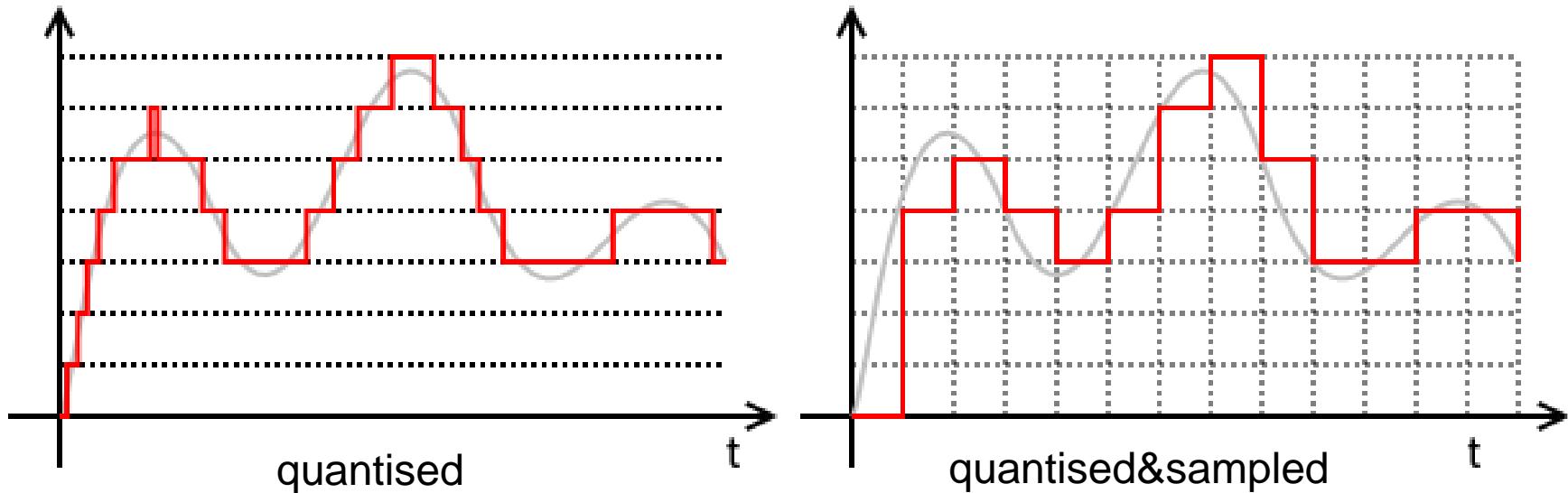
- Kmitočtový rozsah
- Dynamický rozsah





# Analog vs. Digital

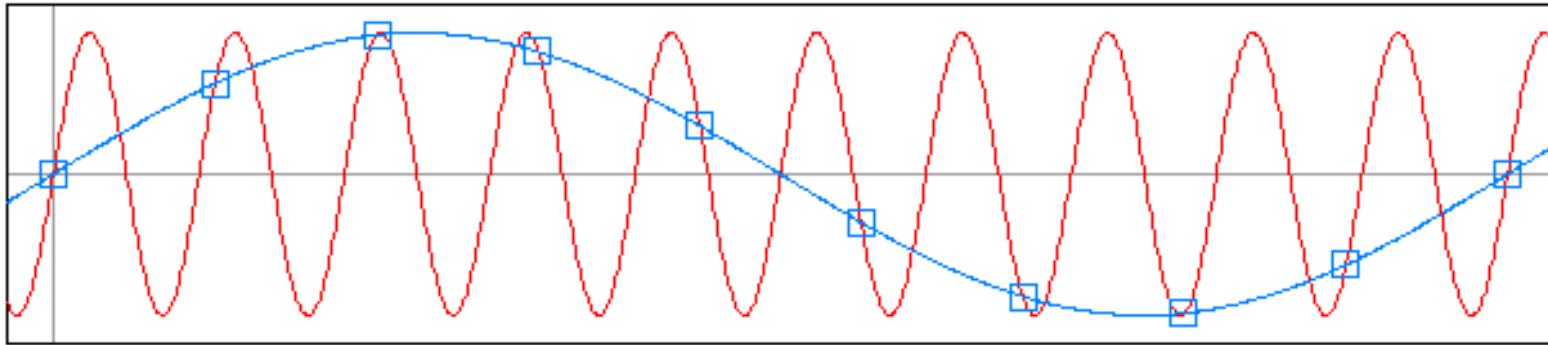
## Kvalita?



- Bezeztrátové kopírování
- Protichybové zabezpečení
- Ochrana proti kopírování
- Zdrojové kódování – komprese

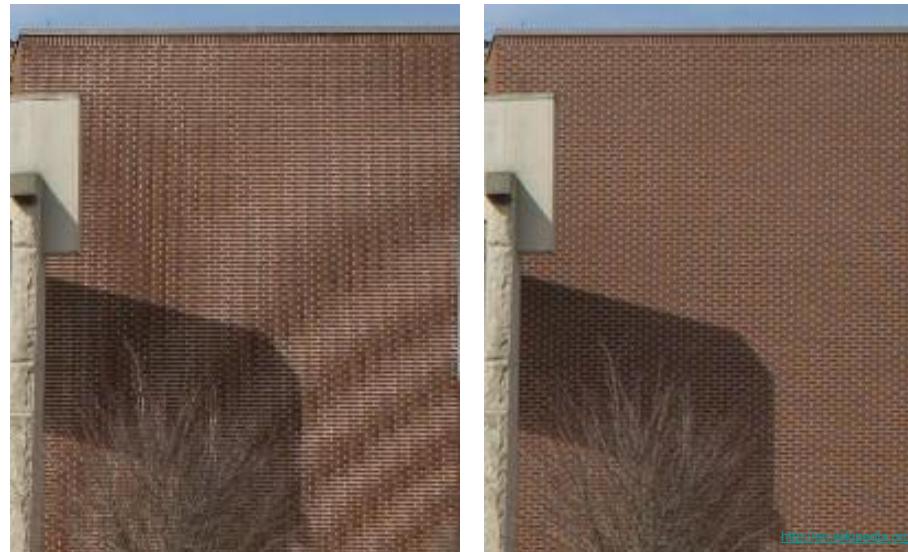


# Vzorkování



<http://en.wikipedia.org/wiki/Aliasing>

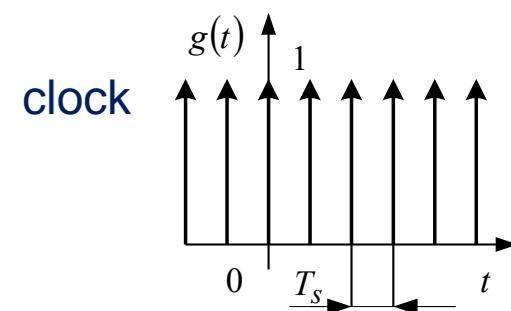
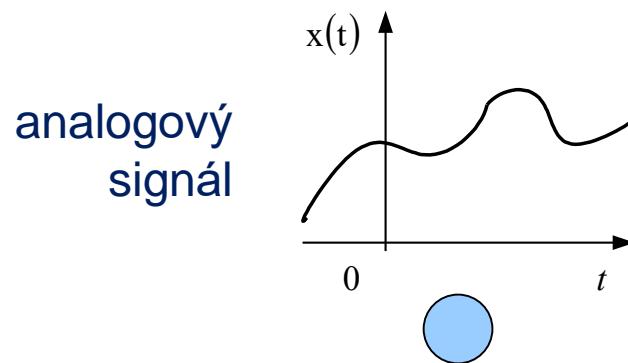
- ☐ Maximální kmitočet?



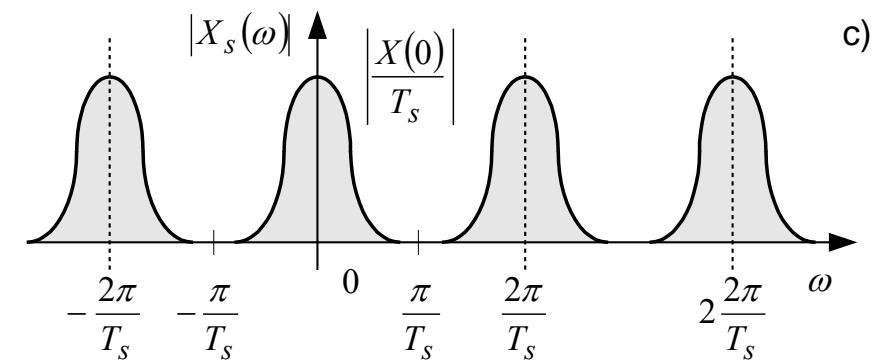
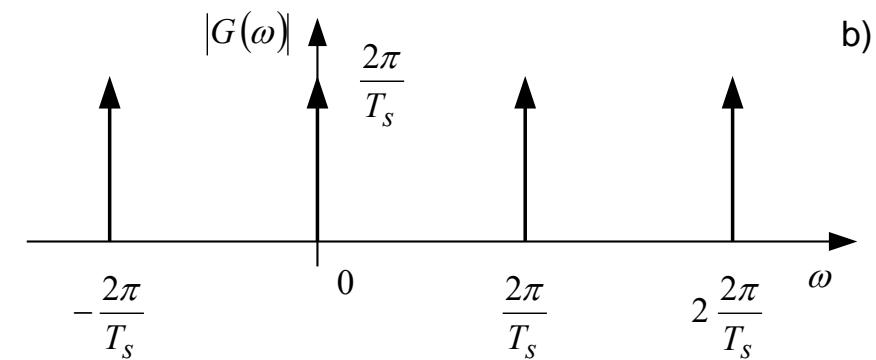
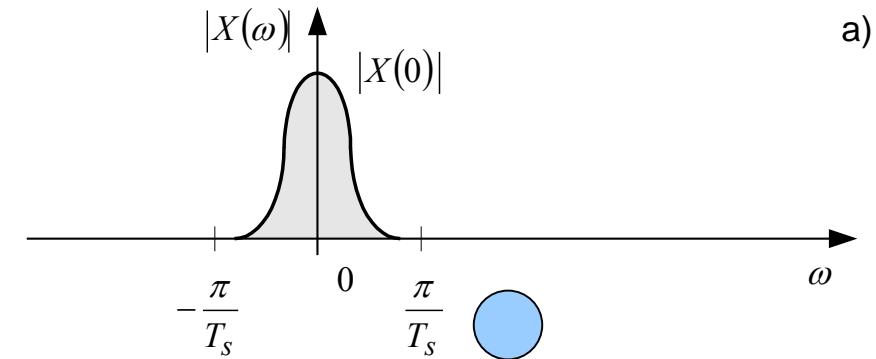
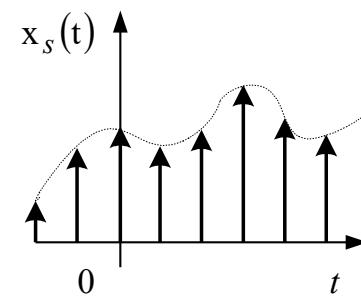
[http://en.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9\\_pattern](http://en.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9_pattern)



# Vzorkování

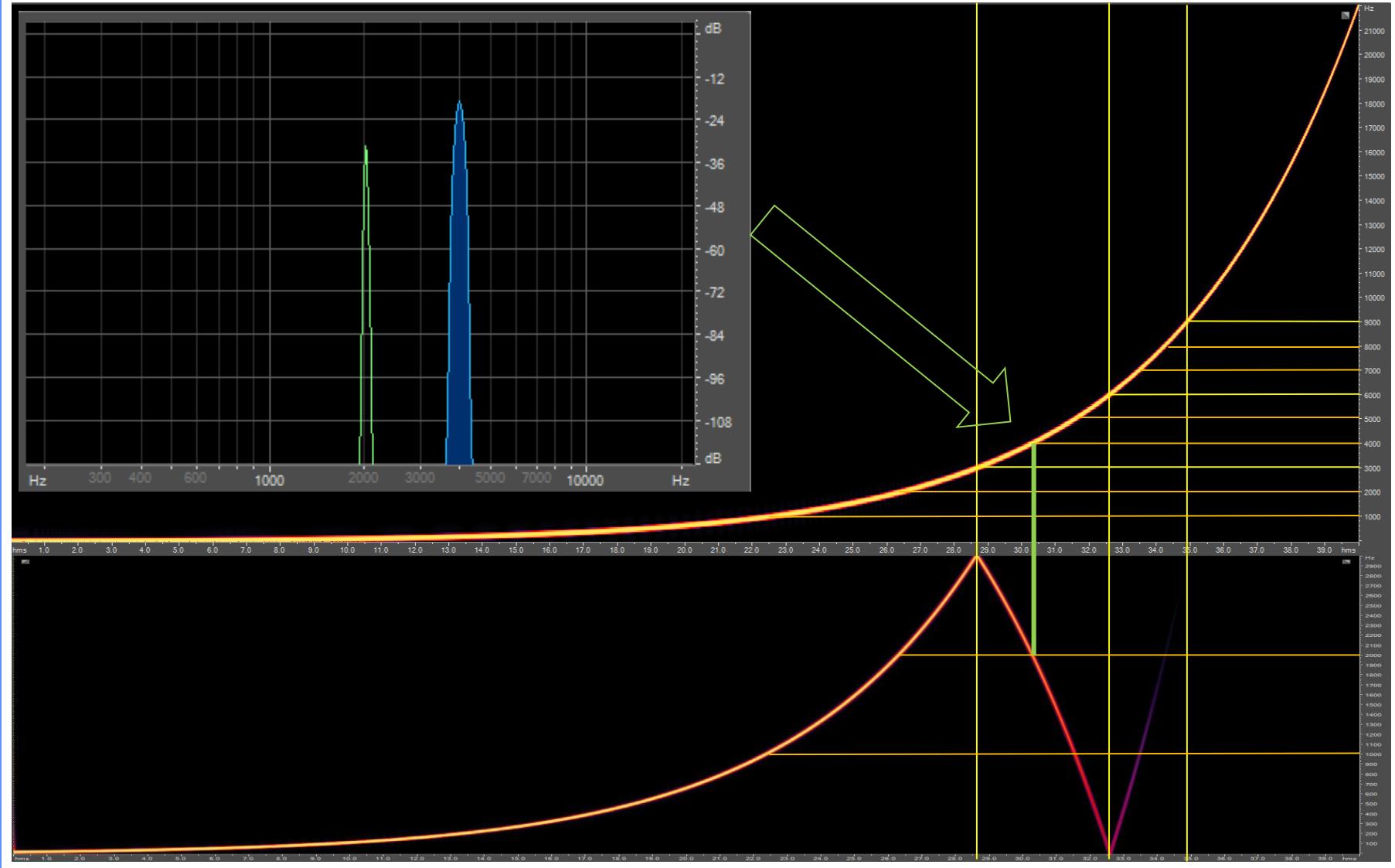


Vzorkovaný signál  
Omezení kmitočtu





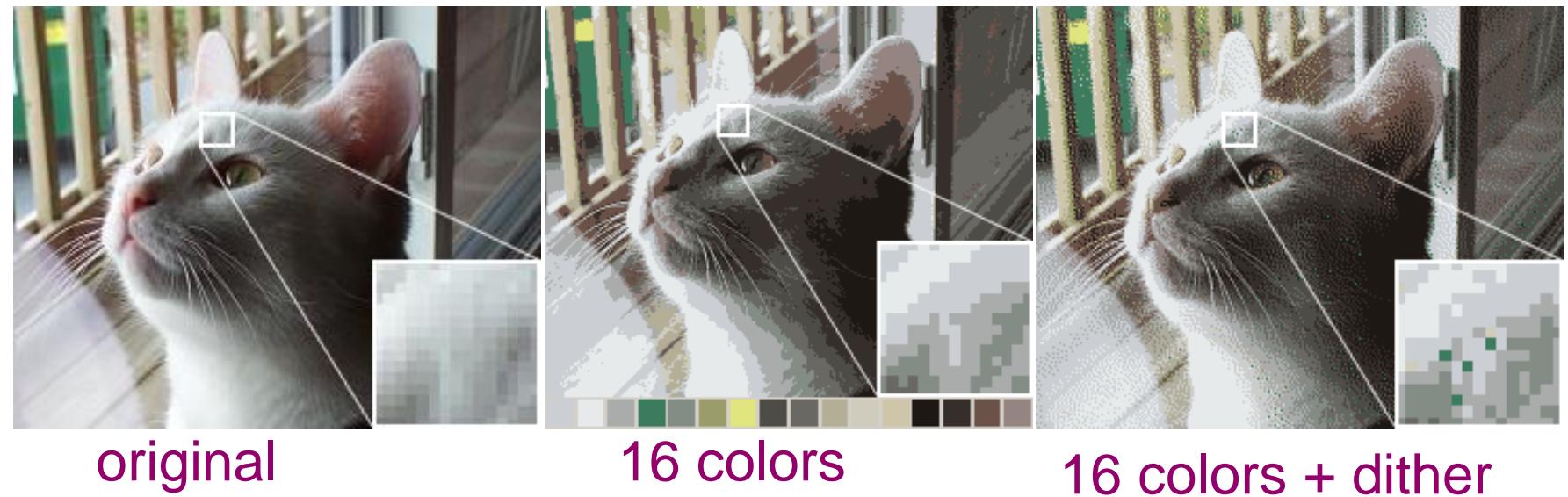
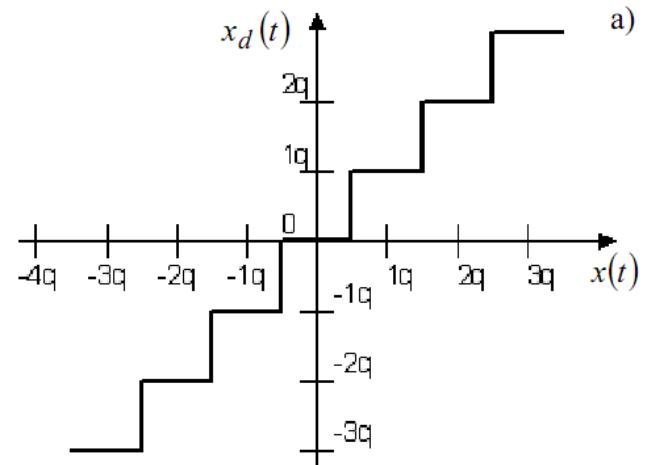
# Příklad – downsampling na 6 kHz





# Kvantizace

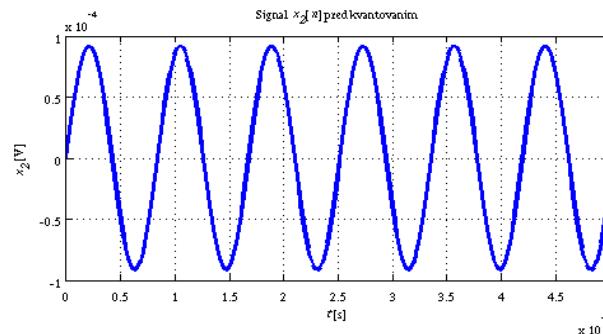
- Diskretizace v úrovních – omezený počet
- $x_d(t) = x(t) + e(t)$
- Kvantizační chyba
- Kolik bitů stačí? ( $6N$ )



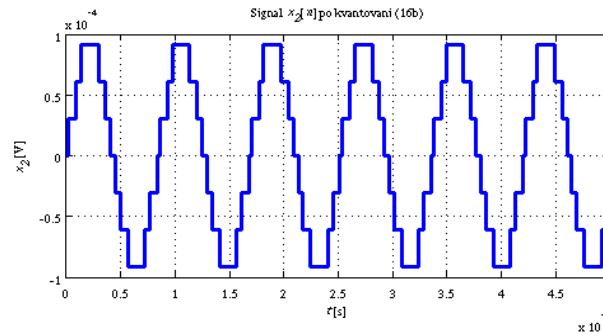


# Dither

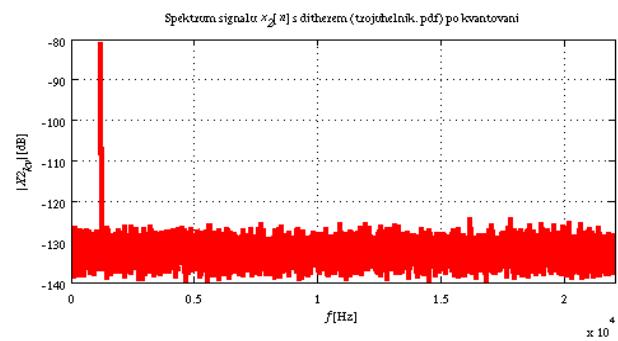
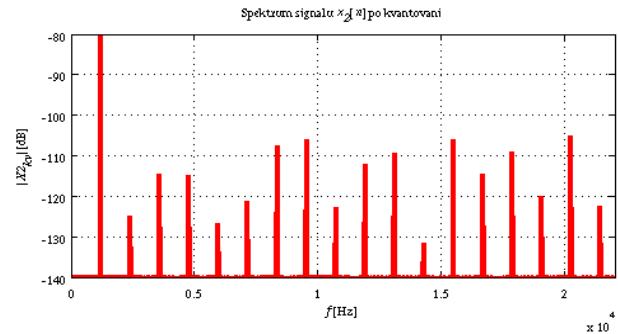
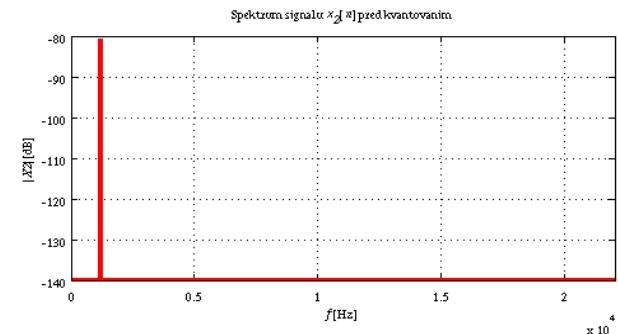
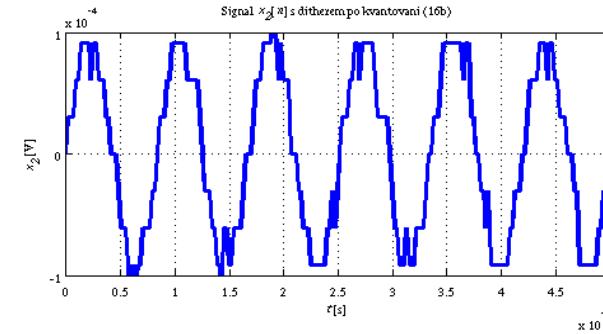
analog  
low level  
signal



digital low  
level signal

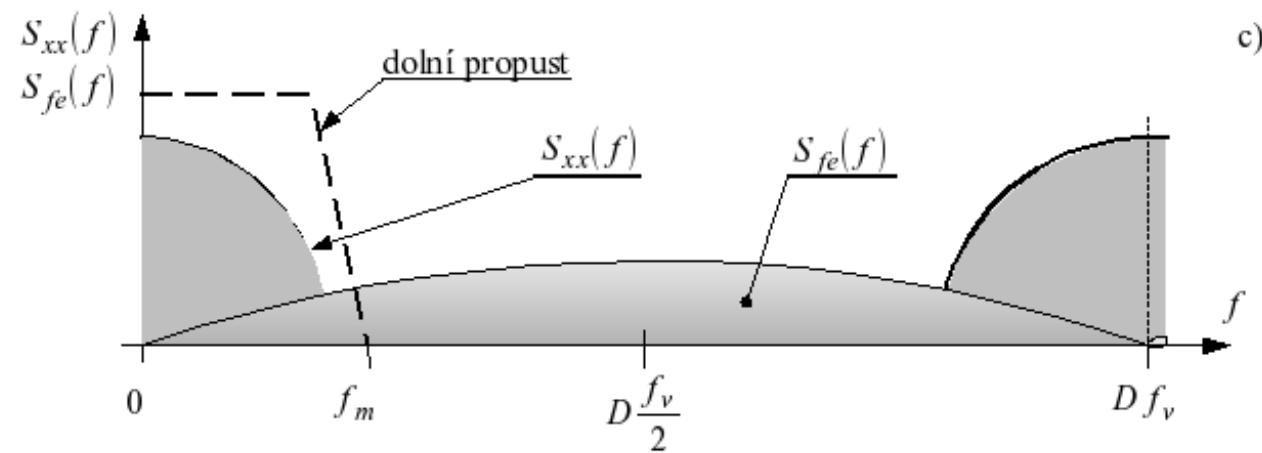
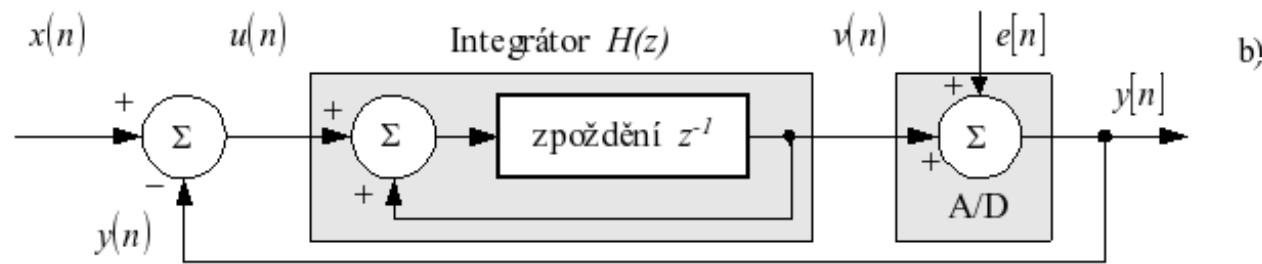
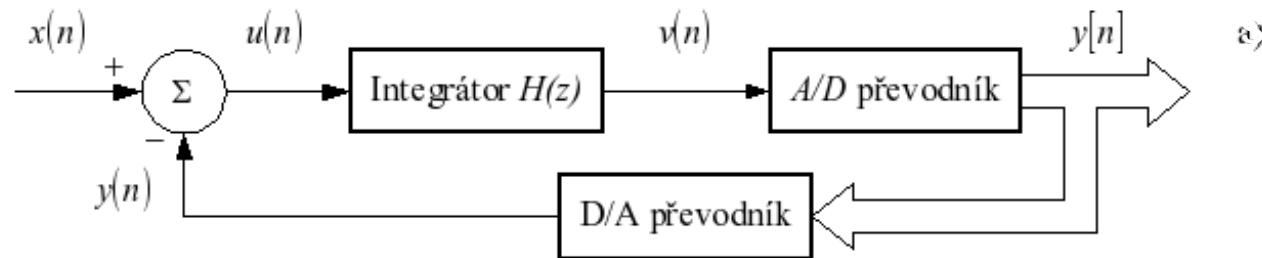


digital low  
level signal  
with  
dither



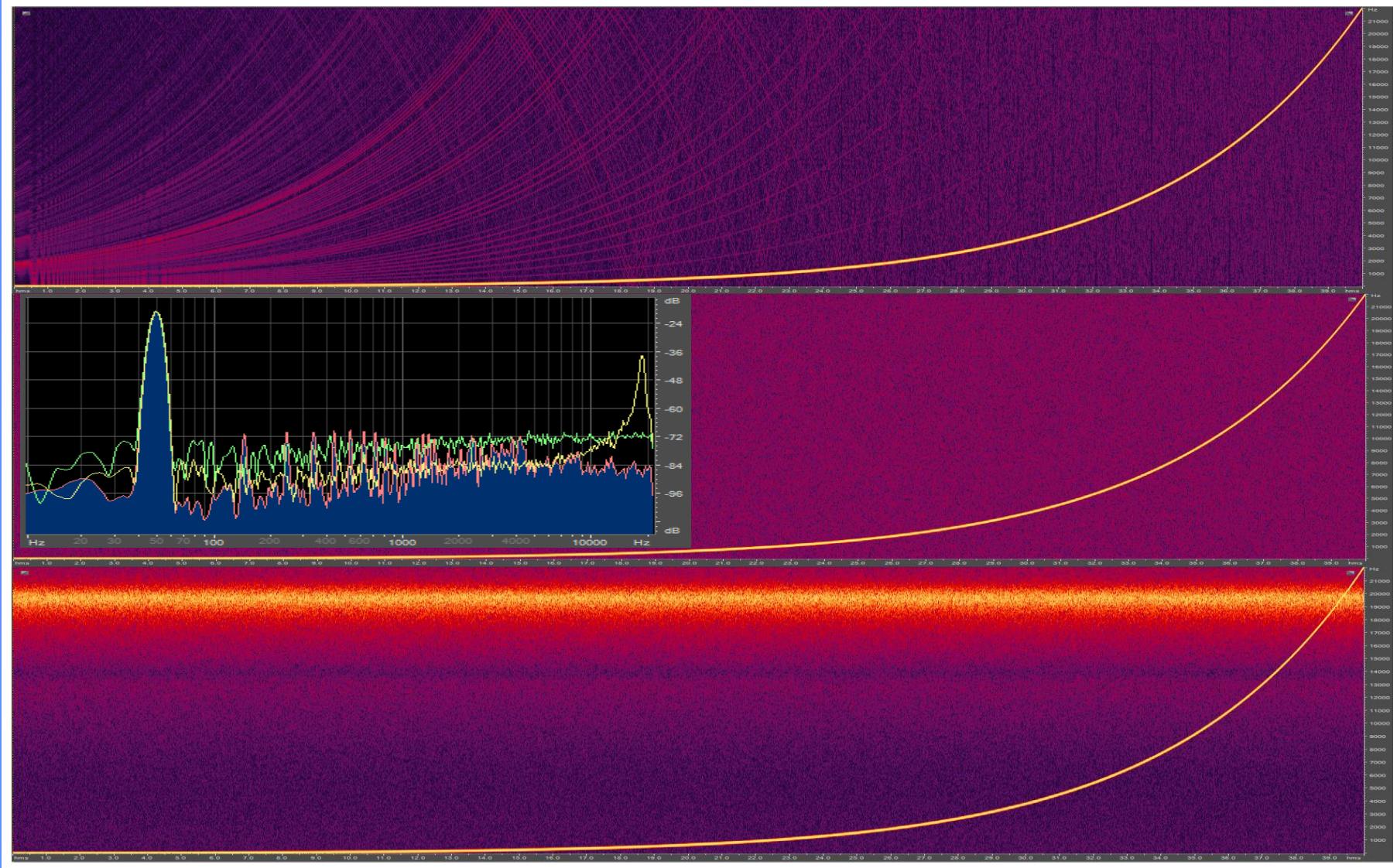


# Noise shaping



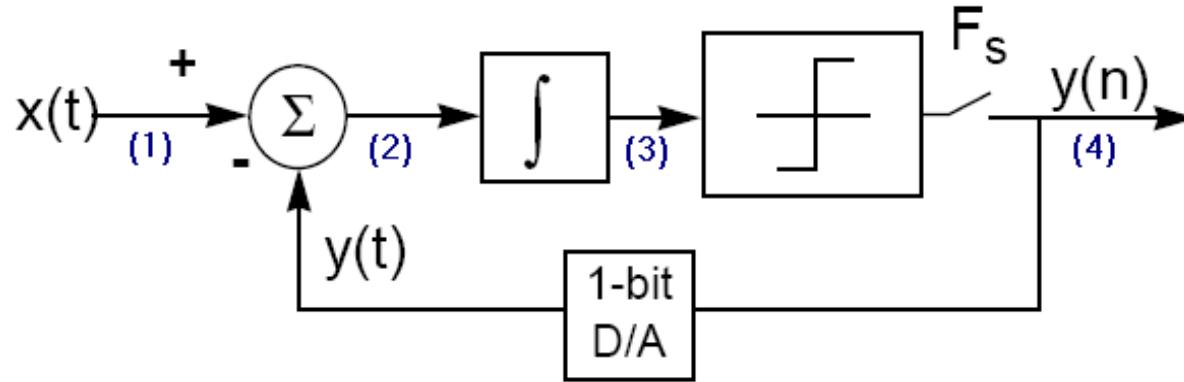


# Příklad

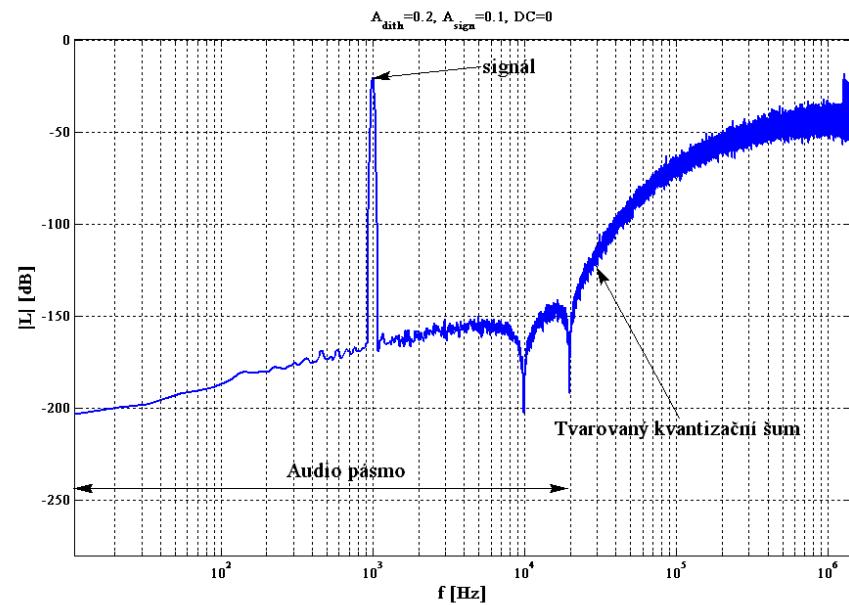




# Příklad: Sigma-delta modulace



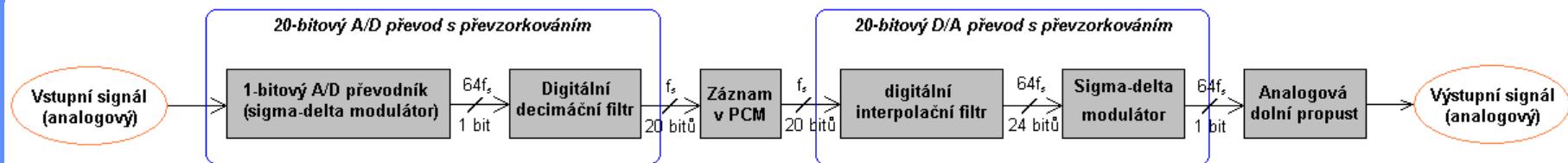
- 1 bit**
- High sample rate**
- Simple, cheap**
- D/A – filter**



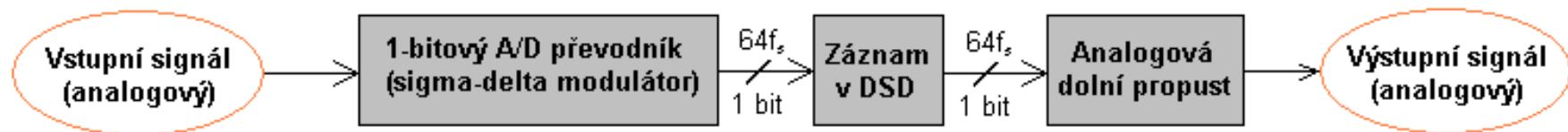


# One-bit audio

## PCM recording (DVD)



## One-bit recording

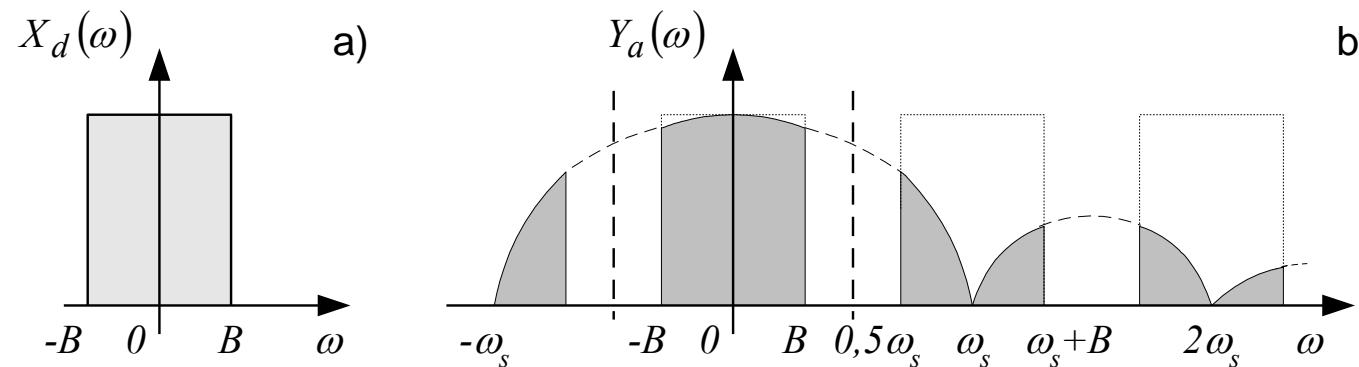
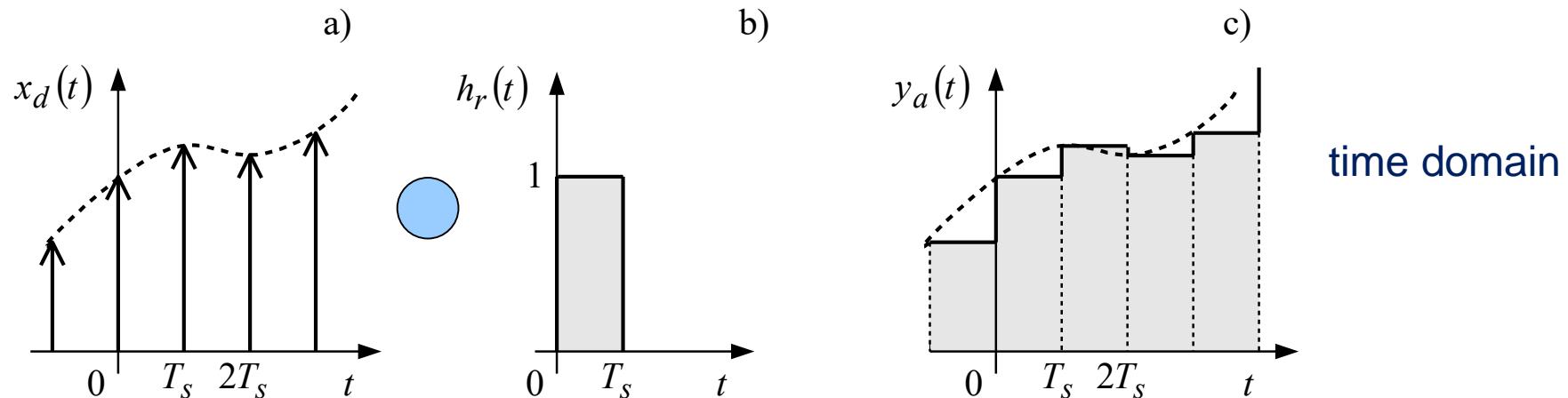


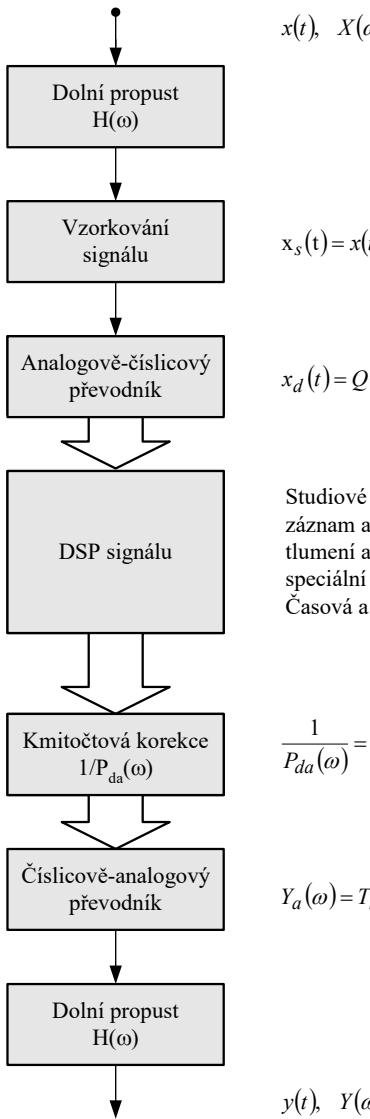
- SACD – DSD, DST
- HW recorders (Korg)





# D/A převod





$$x_s(t) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s), \quad X_s(\omega) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\omega + k\omega_s)$$

$$x_d(t) = Q\{x_s(t)\} = x_s(t) + e[x_s(t)]$$

Studiové zpracování zvukových signálů:  
záznam a reprodukce signálů, číslicová filtrace,  
tlumení a směšování signálů, zpožďování signálů,  
speciální efekty, ...  
Časová a kmitočtová analýza signálů

$$\frac{1}{P_{da}(\omega)} = \frac{1}{T_s} \frac{\omega T_s}{2} \cdot \sin \frac{\omega T_s}{2} \cdot e^{-j \frac{\omega T_s}{2}}, \quad -0.5 \omega_s \leq \omega \leq 0.5 \omega_s$$

$$Y_a(\omega) = T_s \frac{\sin \frac{\omega T_s}{2}}{\frac{\omega T_s}{2}} \cdot e^{-j \frac{\omega T_s}{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_d(\omega - k\omega_s)$$

**anti-aliasing**

**sampling**

**quantising**

**DSP**

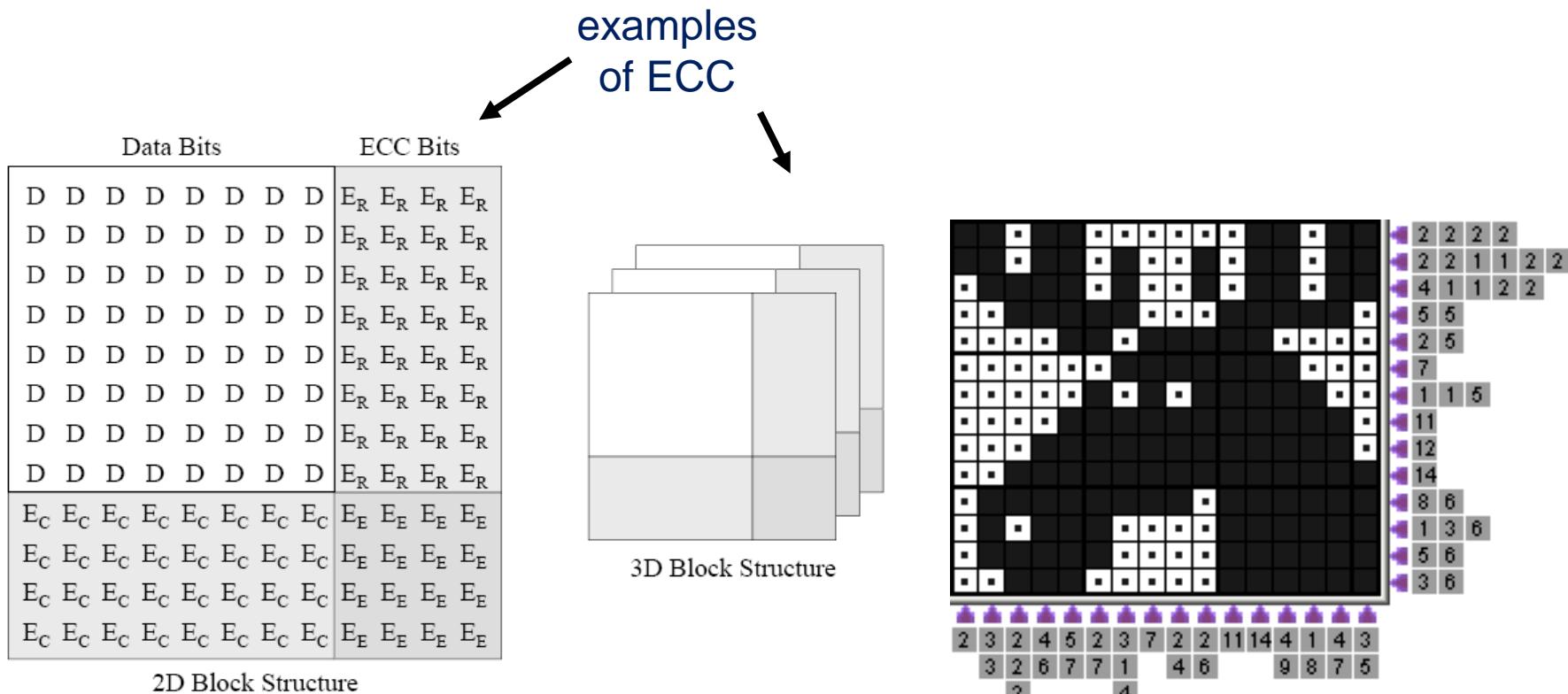
**precorrection (D/A)**

**D/A conversion**

**filter**



# Protichybové zabezpečení





# Proklad (změna sledu)

## Without interleaving:

Error-free transmission:

aaaabbbbccccddddeeeeffffgggg

transmission with a burst error:

aaaabbbbccc\_\_\_\_\_deeeeffffgggg

4 errors

## With interleaving:

Error-free transmission:

abcdefgabcdefgabcdefgabcdefg

transmission with a burst error:

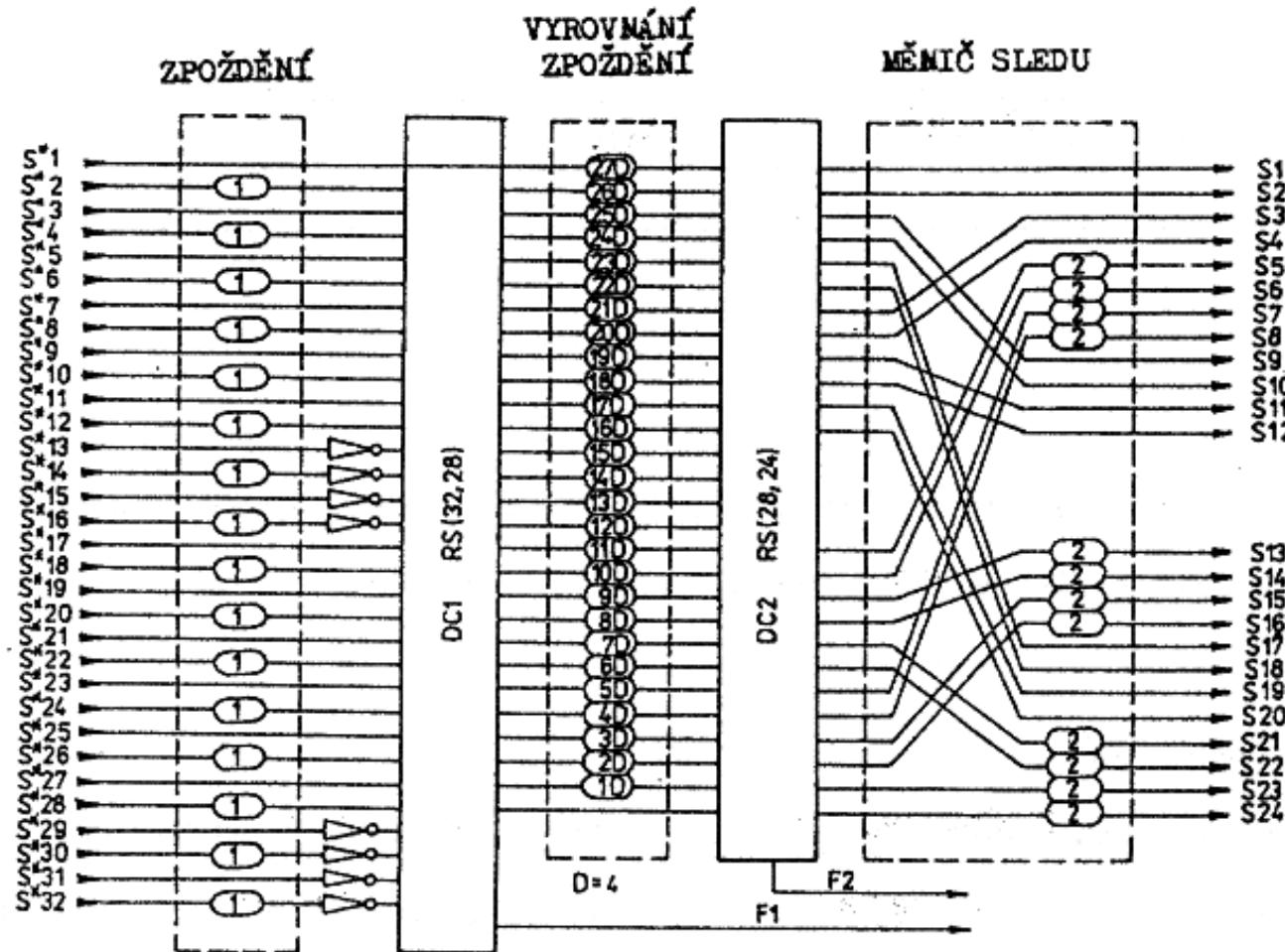
abcdefgabcd\_\_\_\_\_bcdefgabcdefg

De-interleaved transmission with one burst error: aa\_abbbbccccdddde\_eef\_ffg\_gg

1 error

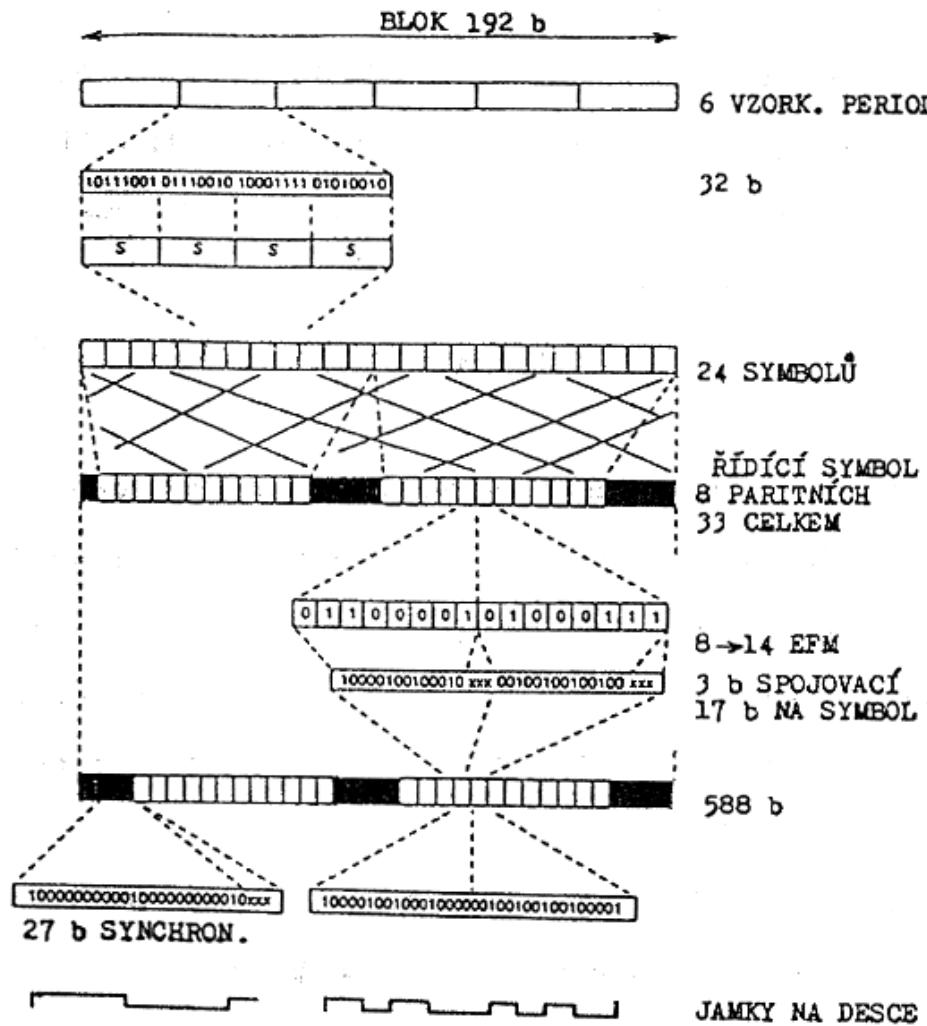


# Příklad: CD Audio





# Příklad: CD Audio format



6 stereo 16bit samples  
= 1 frame

6x2x2B = 24bytes  
+8B CIRC  
+1B subcode  
= 33bytes

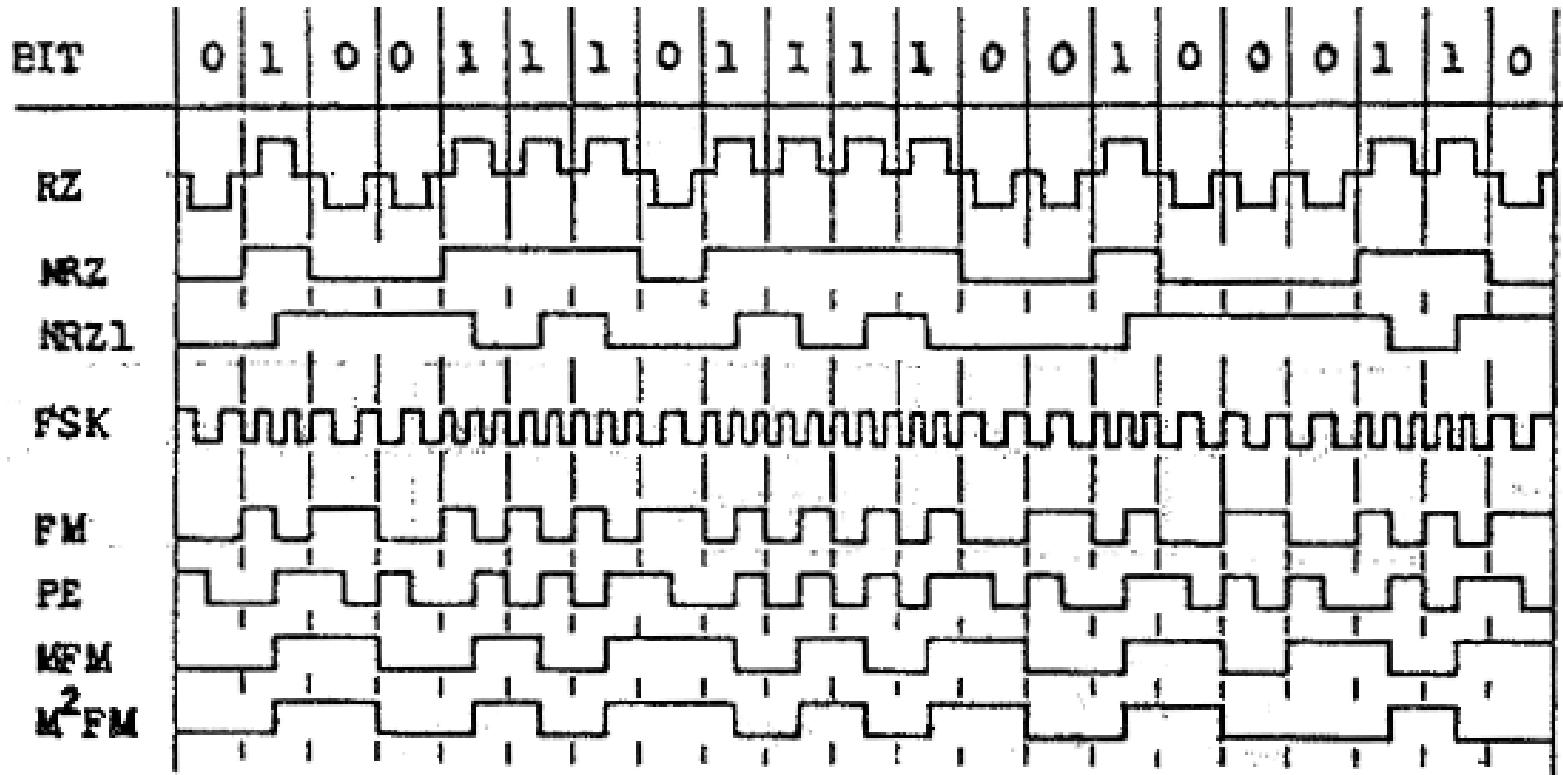
Eight to Fourteen Modulation + 3 connect

$$33B \times (14+3) = 561 \text{ bits} \\ + 27 \text{ synchro bits} \\ = 588 \text{ bits}$$

Pits - NRZ1



# Binární modulace





# Ochrana proti nelegálnímu kopírování

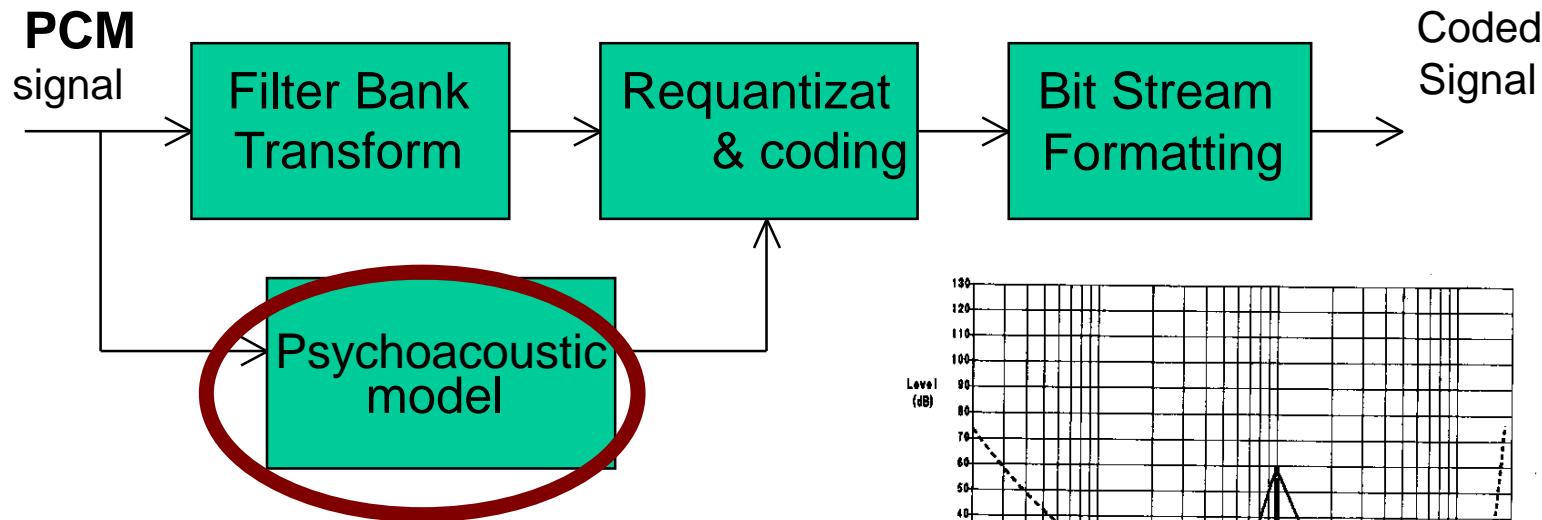
- **Watermarking (vodoznak)**
  - ❖ PSP - Pit Signal Processing – struktura jamek – viditelný vodoznak
  - ❖ Modulace datového proudu (neviditelný)
  - ❖ Modulace audio obsahu (je i v analogu)
- **Šifrování – více klíčů**
- **Nekompatibilita s počítačovými mechanikami (SACD)**



# Datová komprese

16 bit, 2 channels, 44.1 kHz  
 $2 \times 16 \times 44 \text{ 100 bit/s} \approx 1.4 \text{ Mbit/s}$

- Bezeztrátové metody
- Ztrátové metody



**Principy:**  
Křivky stejné hlasitosti  
maskování

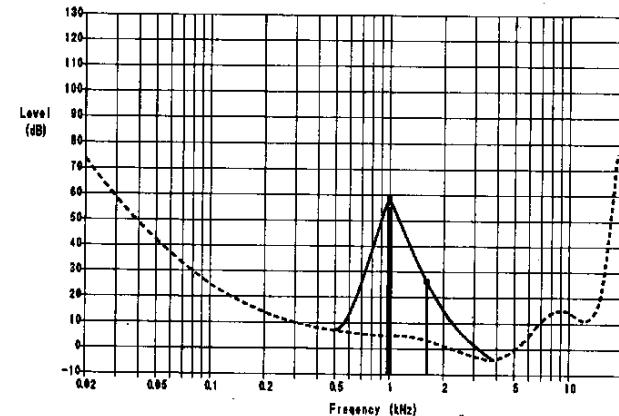
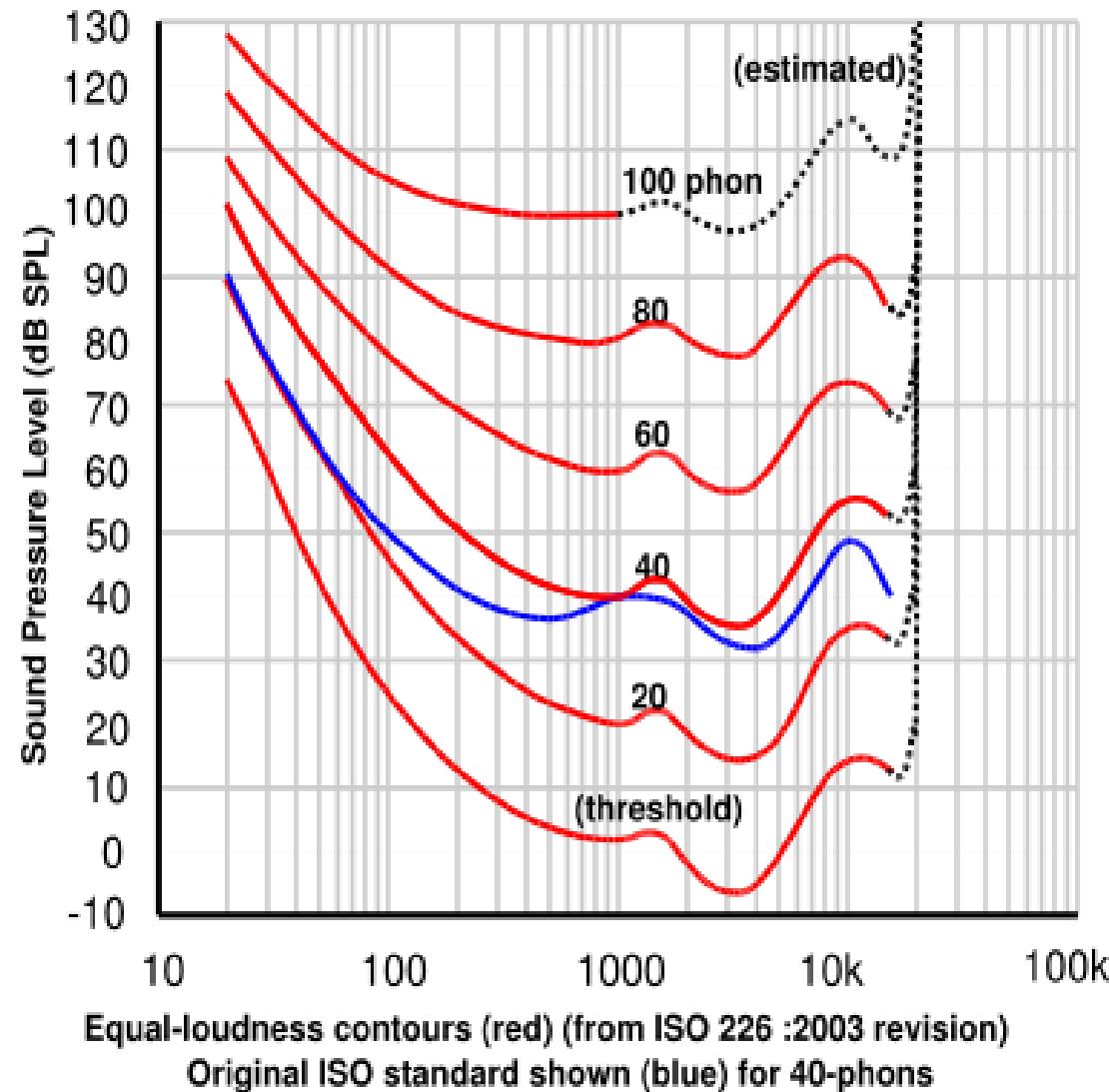


Figure 2: Simultaneous masking curve, including narrow-band noise and masked tone (adapted from [8]).



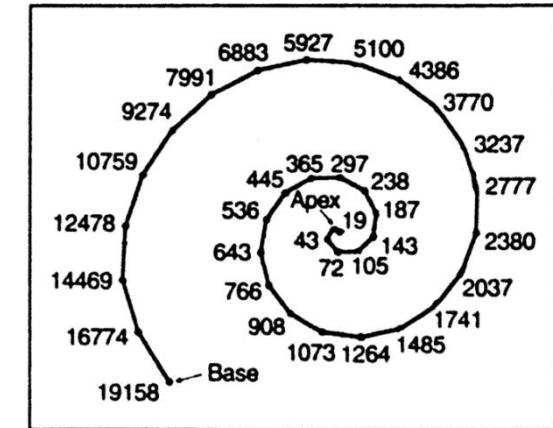
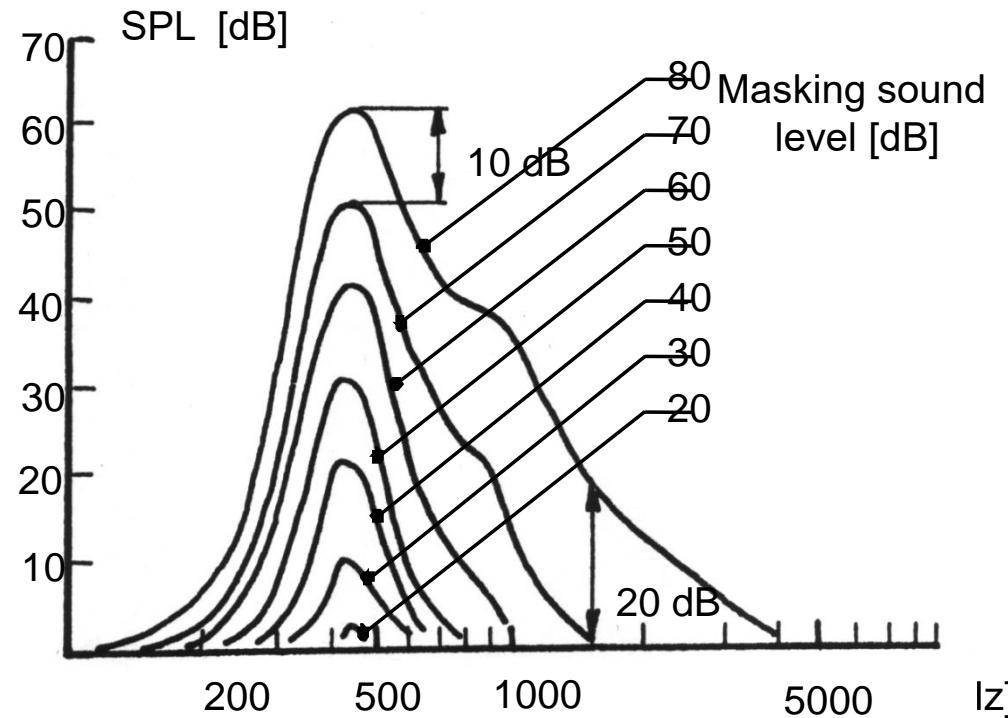
# Křivky stejné hlasitosti



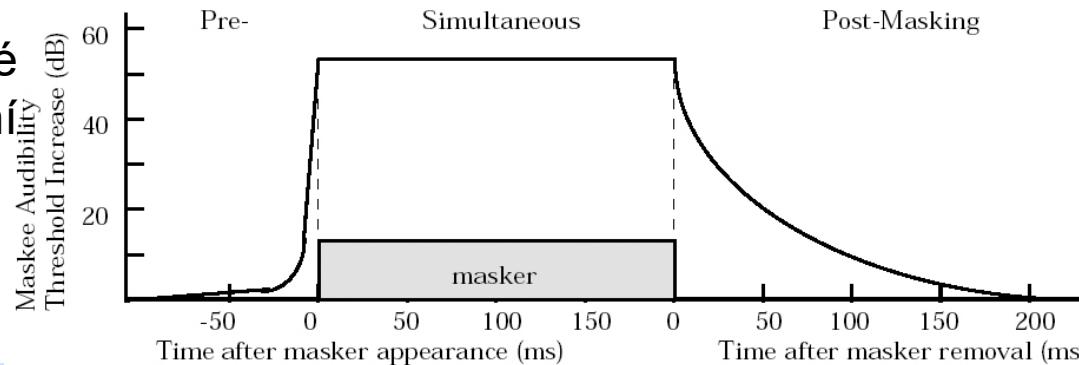


# Maskování

Současné  
maskování



Nesoučasné  
maskování





# Příklad: ATRAC (MD)

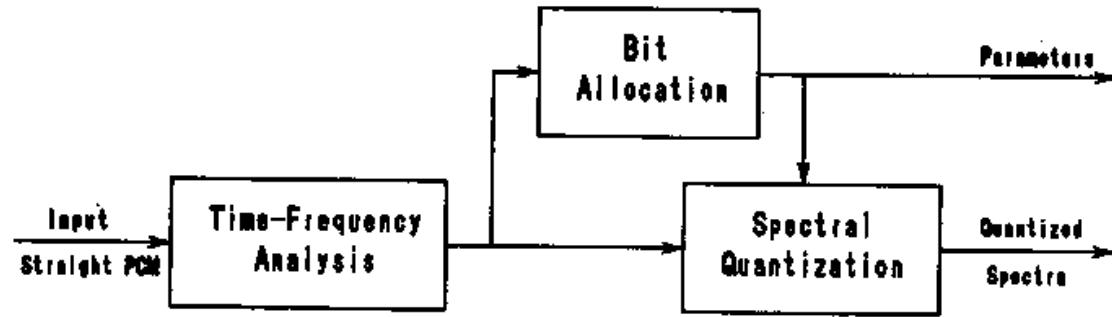


Figure 4: Block diagram of ATRAC encoder.

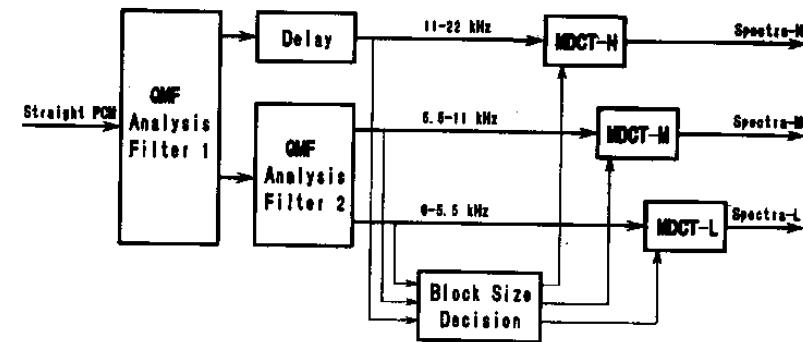


Figure 6: Time-frequency analysis structure.

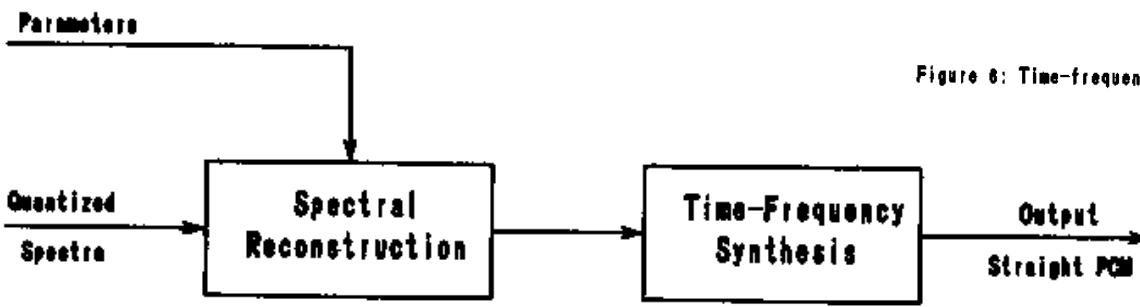
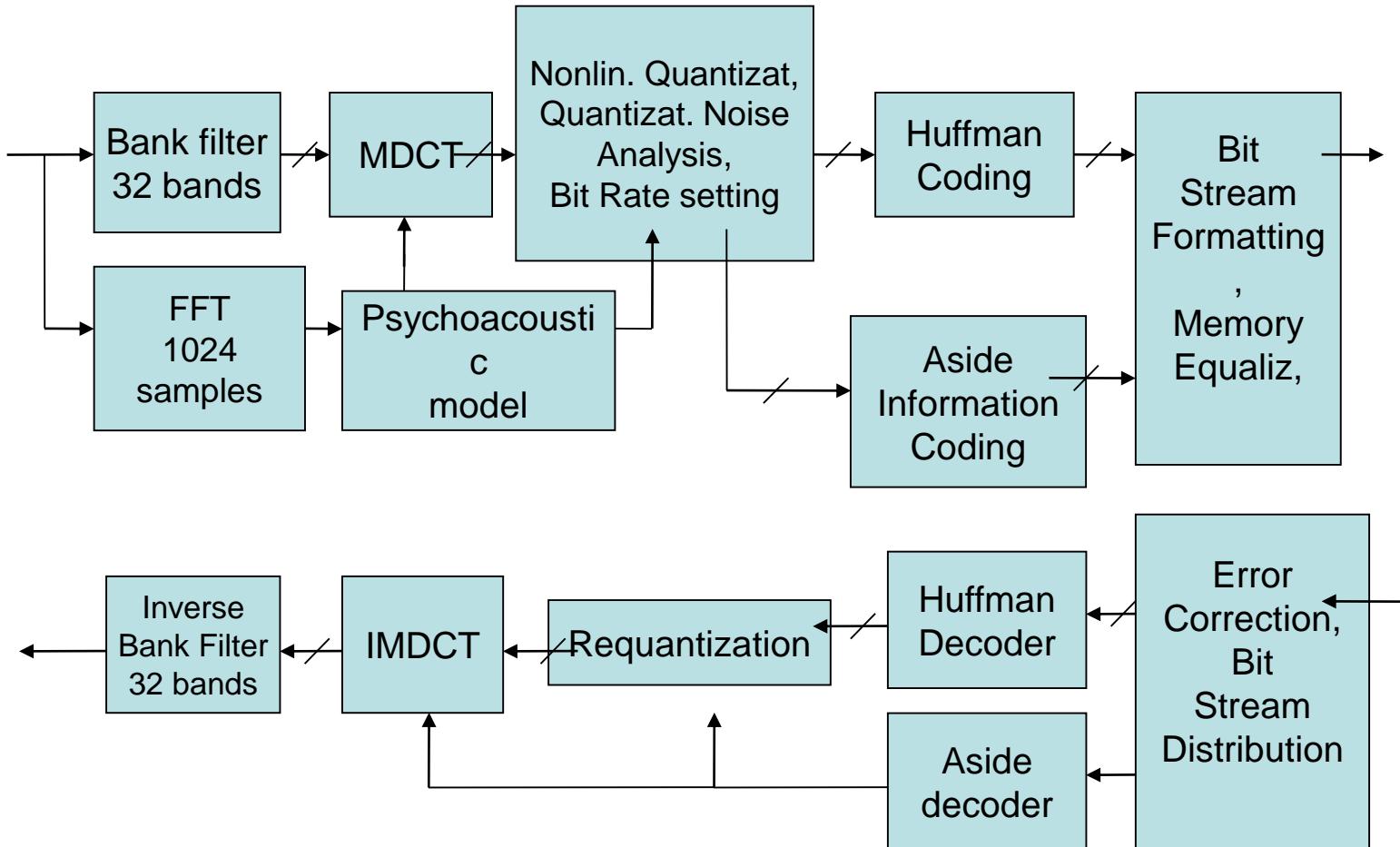


Figure 5: Block diagram of ATRAC decoder.

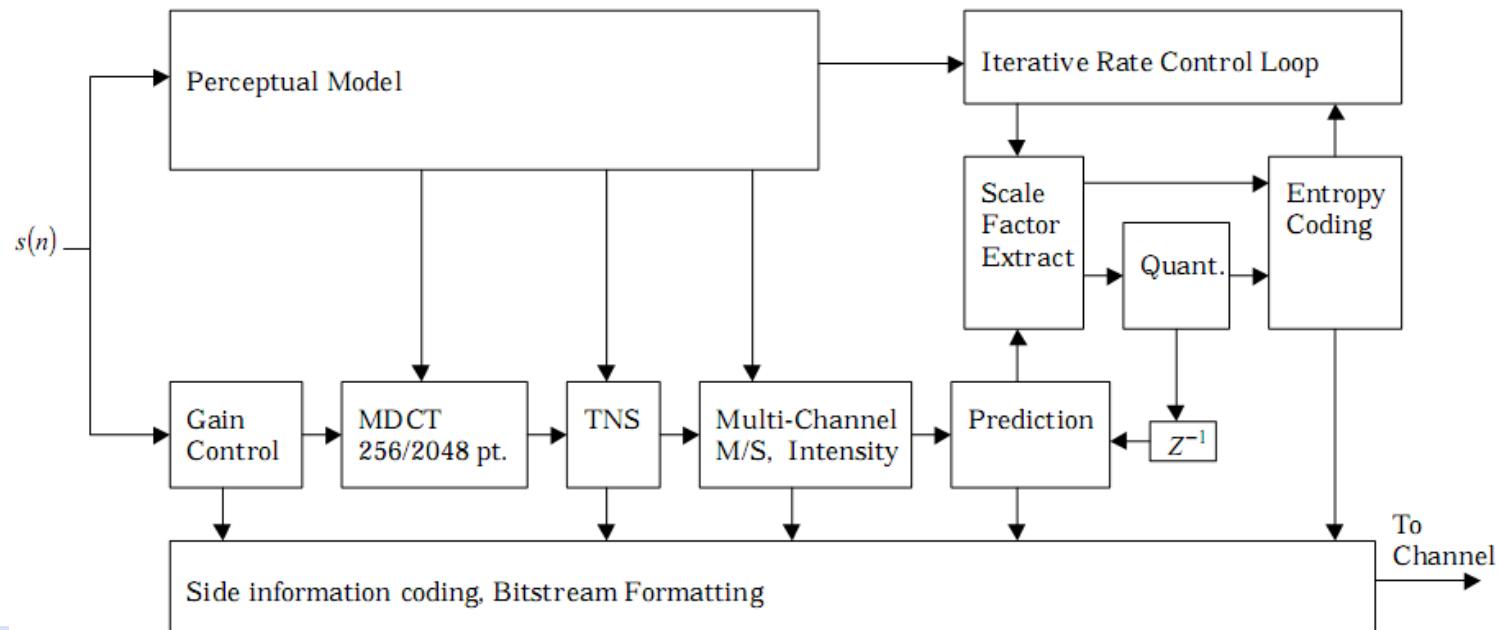
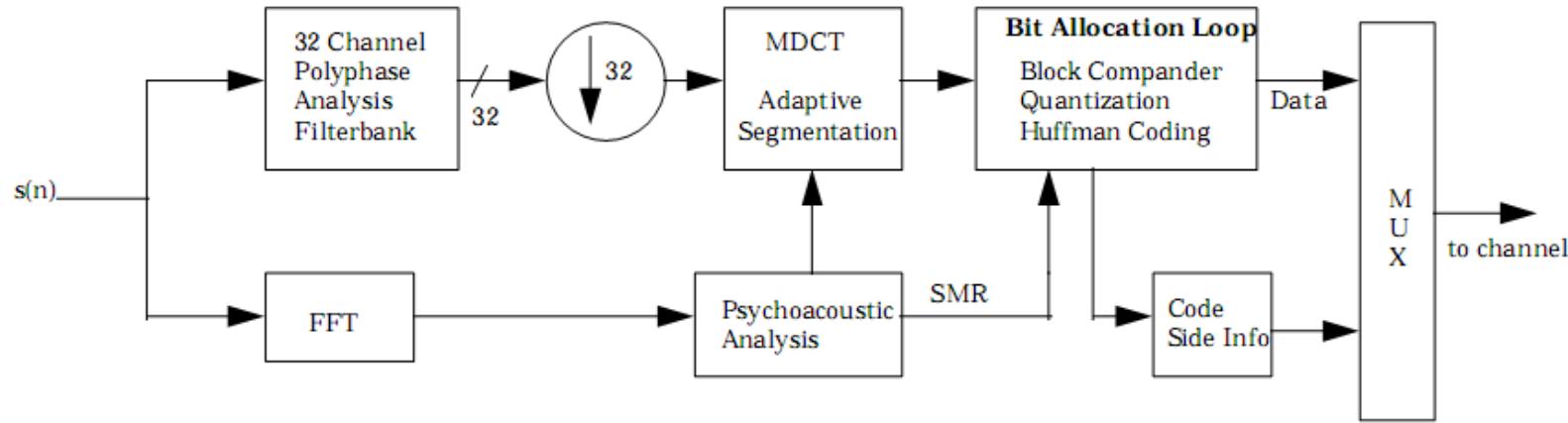


# Příklad: MPEG (MP3)



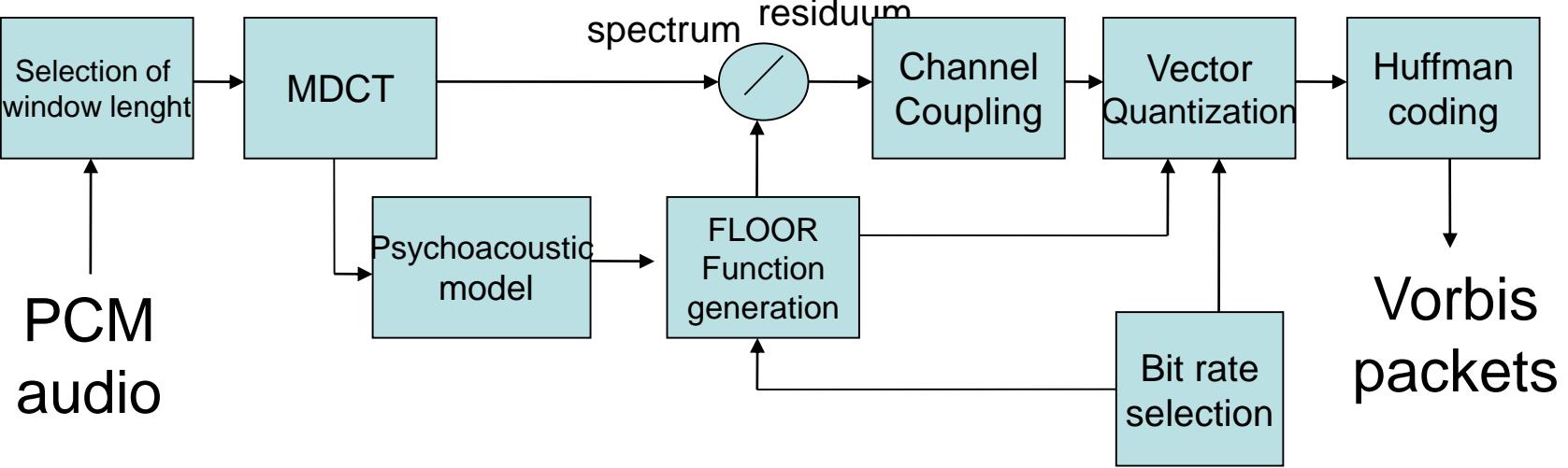


# Příklad: MP3 vs AAC



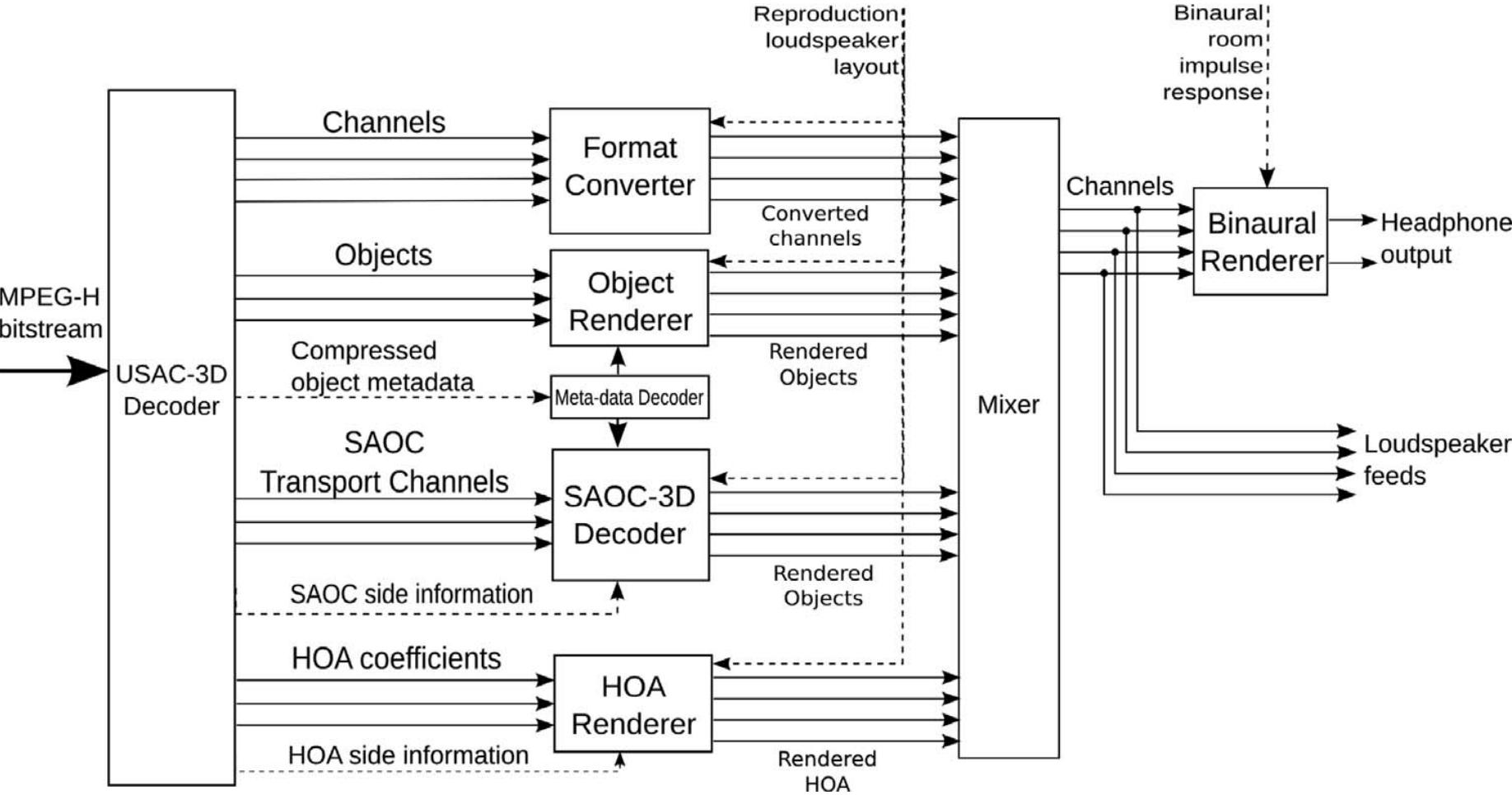


# Příklad: Ogg Vorbis





# Příklad: MPEG-H 3D audio

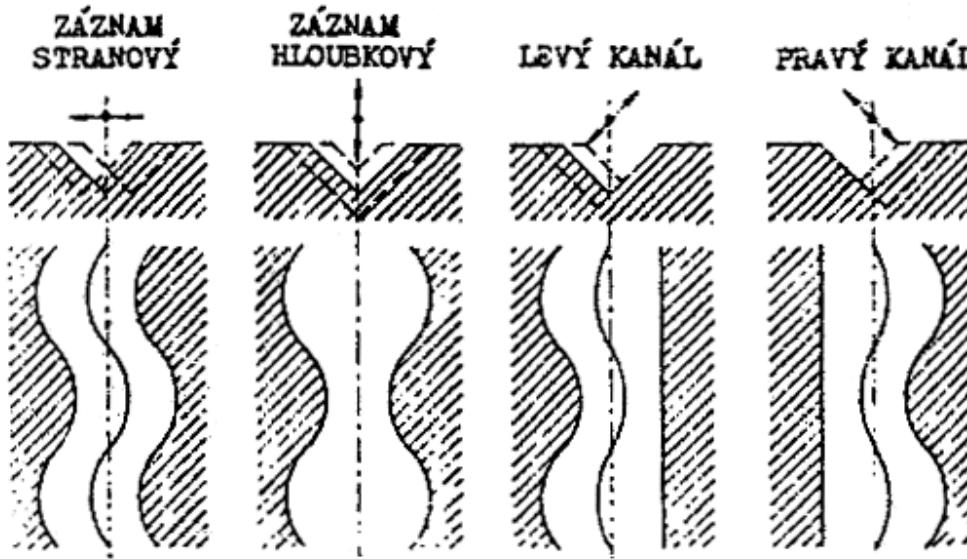


# Záznamové principy

& příklady



# Mechanický záznam



**Přenosky:**

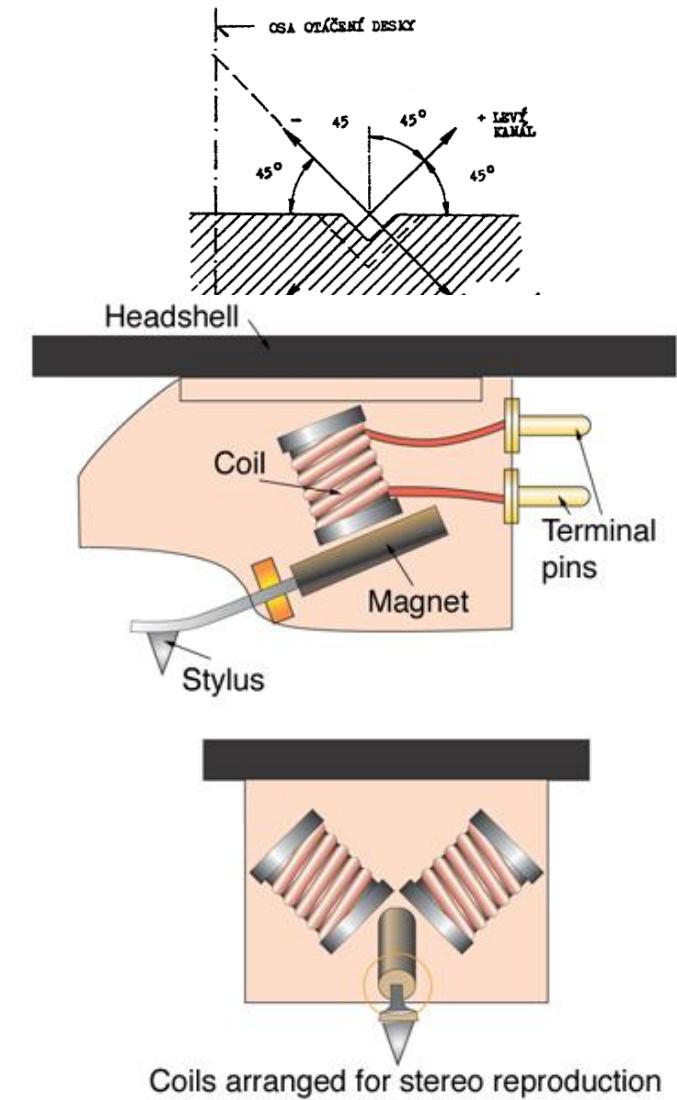
Piezoelektrická

Elektromagnetická (kotva v poli magnetu)

Elektrodynamická (cívka v poli magnetu)

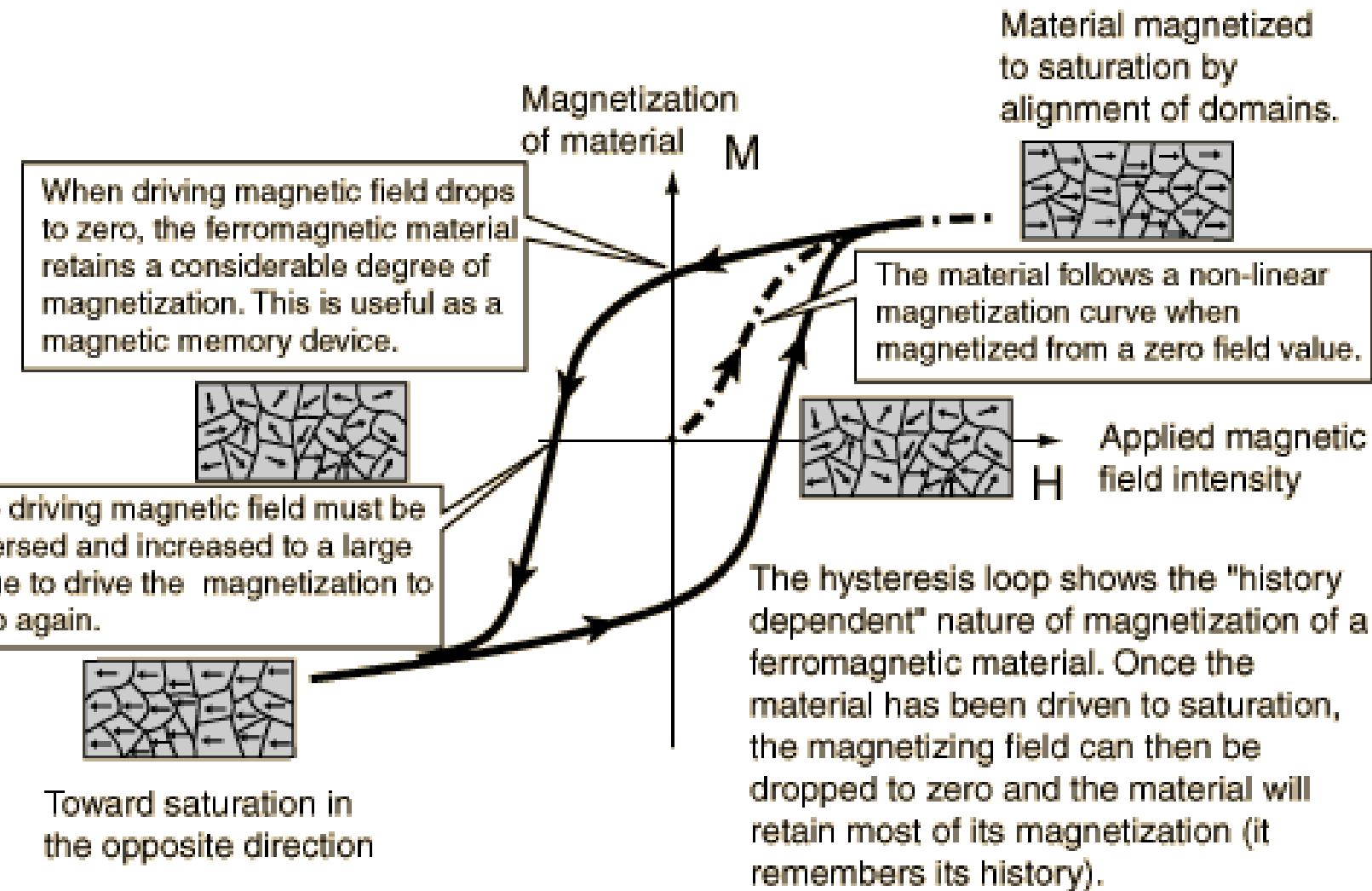
Magnetodynamická (magnet v poli cívky)

Jiné (elektrostatická, fotoelektrická ...)



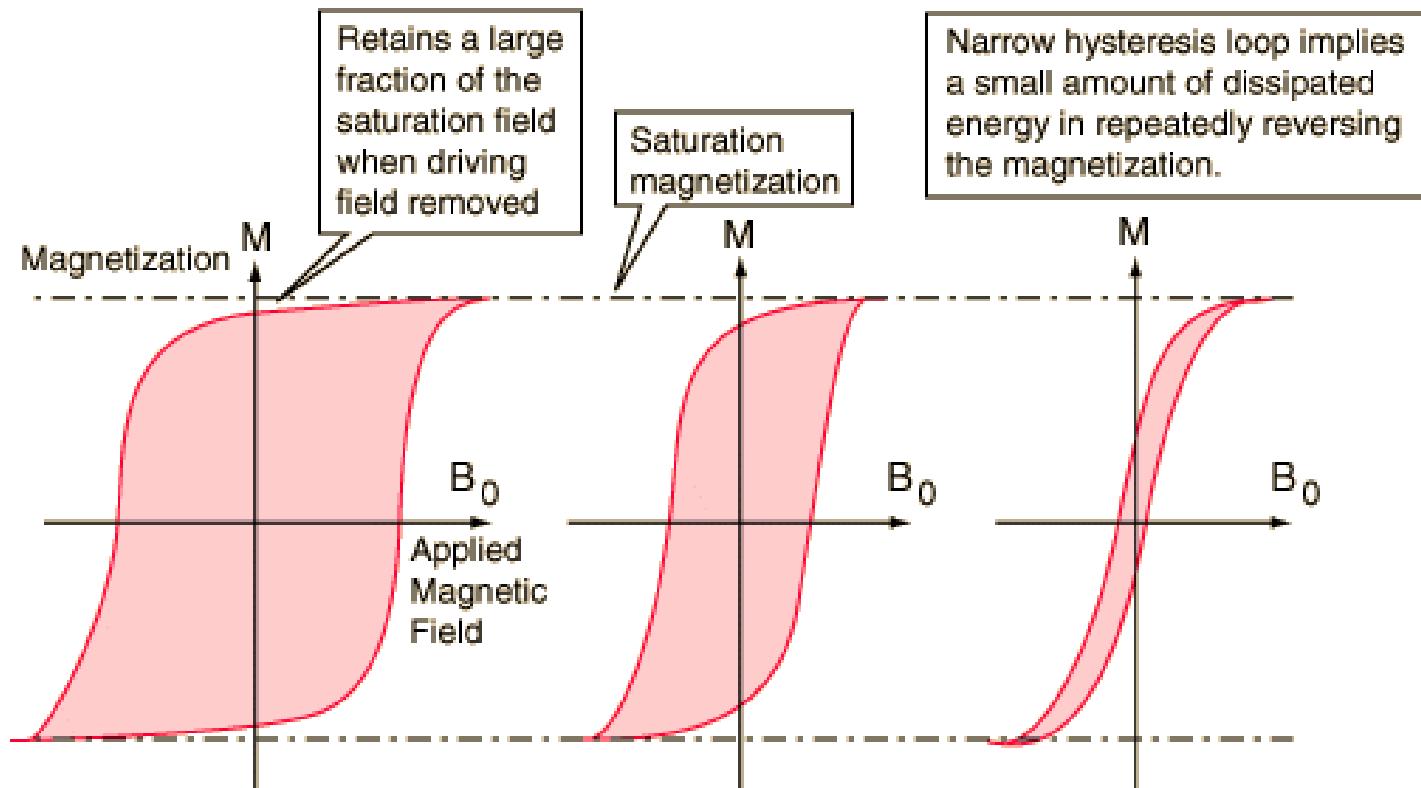


# Magnetický záznam - feromagnetikum



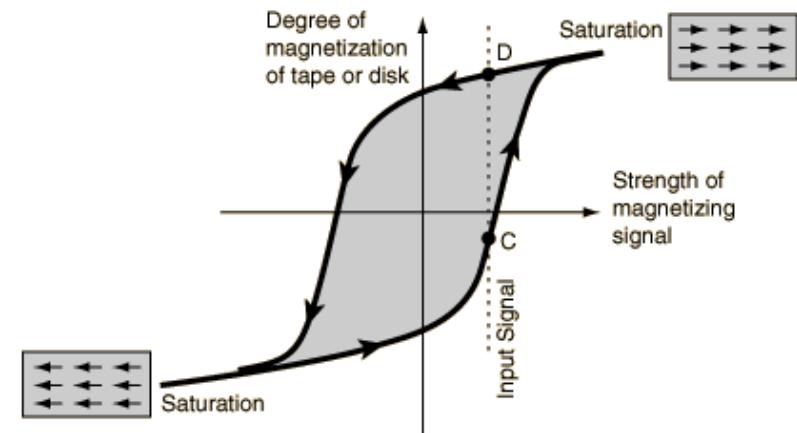
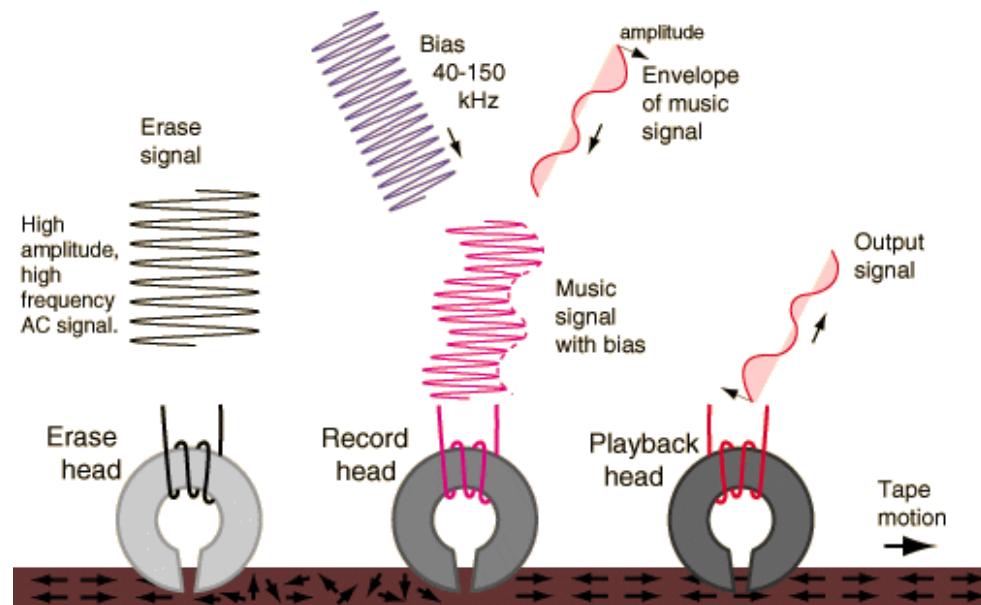


# Magnetický záznam - materiály



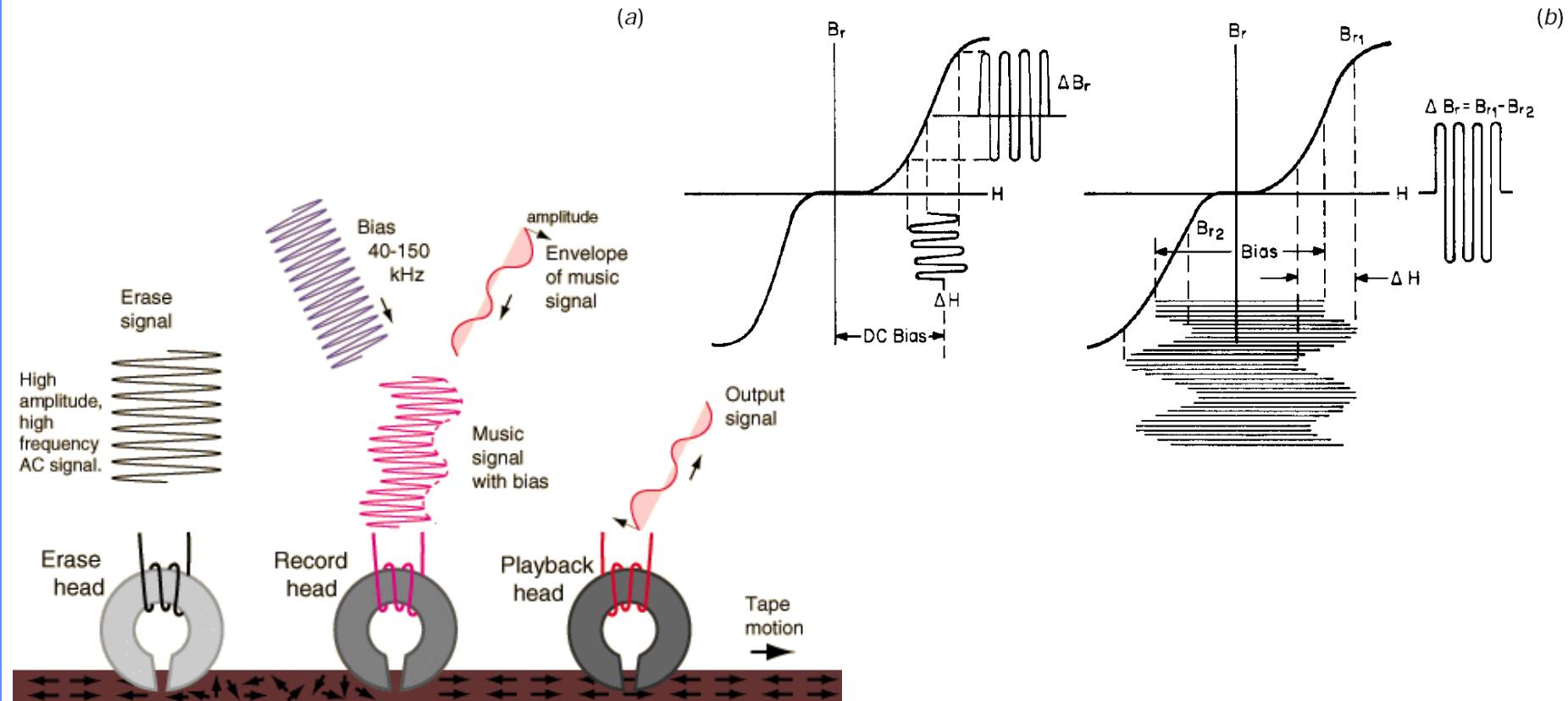


# Magnetický záznam - mazání





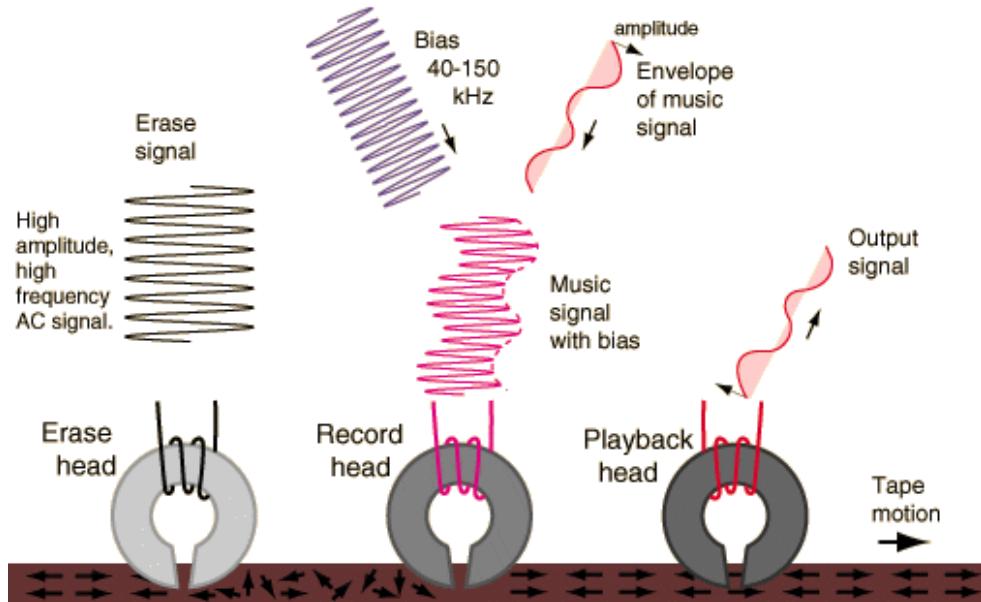
# Magnetický záznam - záznam



$$B_r(t) \sim u_r(t)$$



# Magnetický záznam - reprodukce

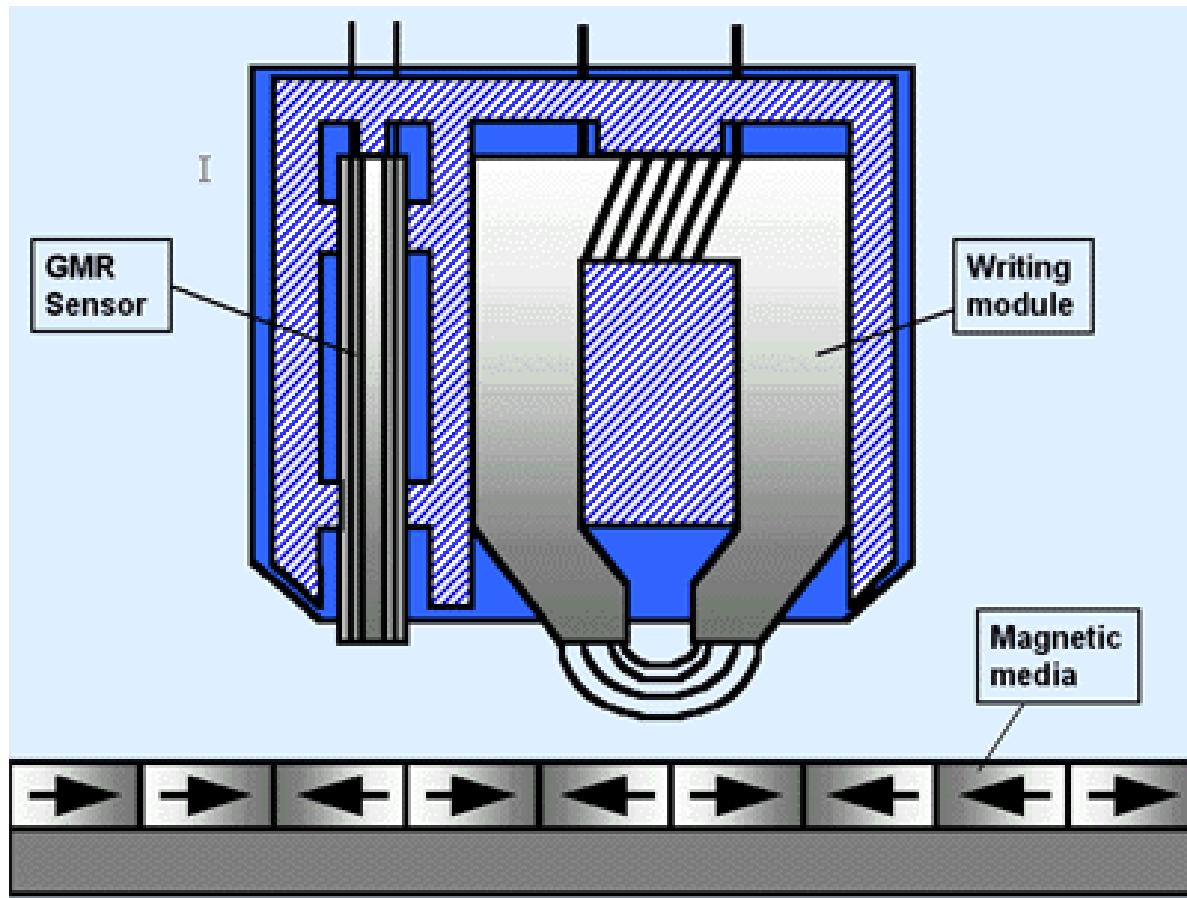


- Kmitočtová charakteristika
- Nutný pohyb

$$B_r(t) \sim u_r(t) \quad u_o(t) \sim dB_r(t)/dt \sim du_r(t)/dt$$



# Magnetický záznam - reprodukce



$$u_o(t) \sim B_r(t) \sim u_r(t)$$



# Magnetický záznam - souhrn

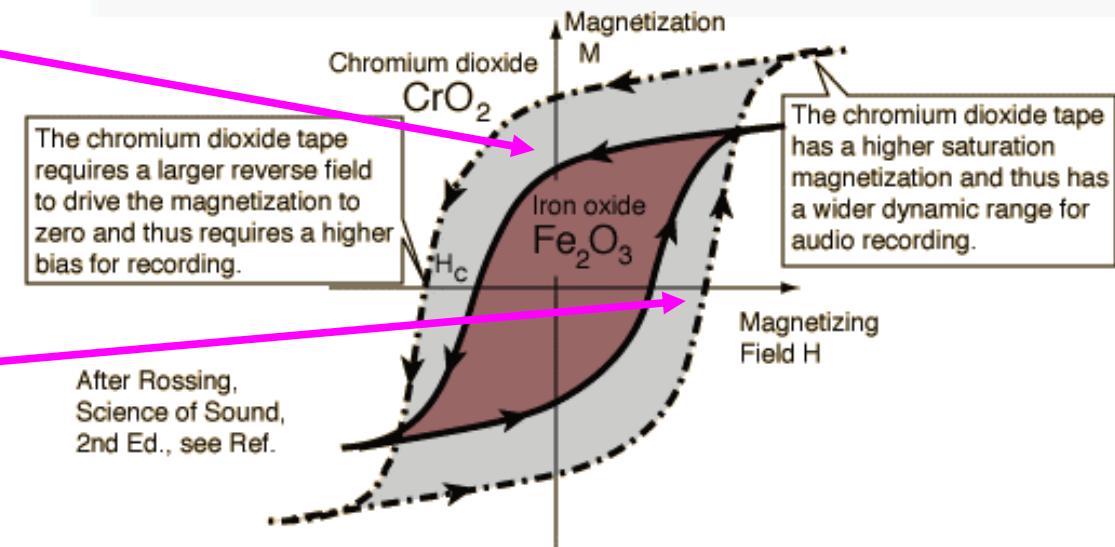
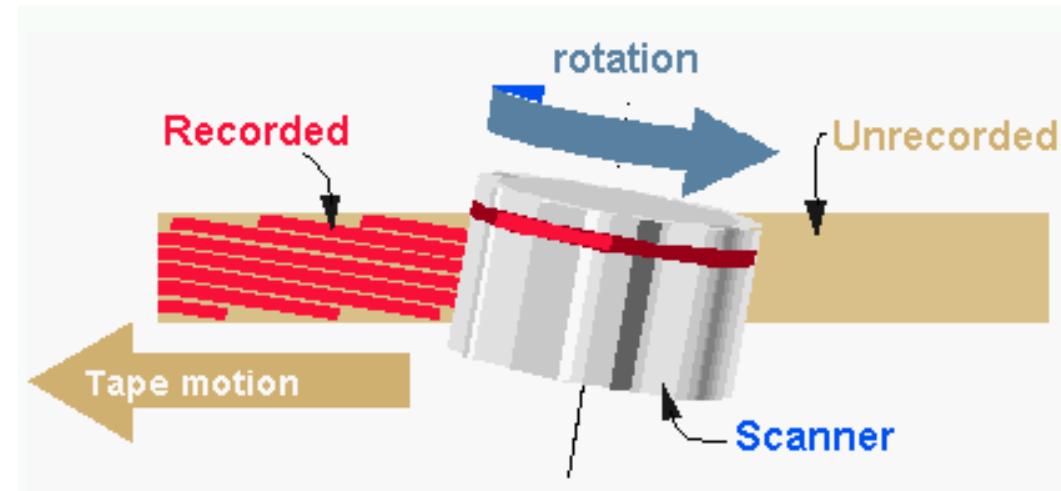
From Computer Desktop Encyclopedia  
© 1999 The Computer Language Co., Inc.

Kmitočtová  
charakteristika/ kapacita

dynamika, SNR

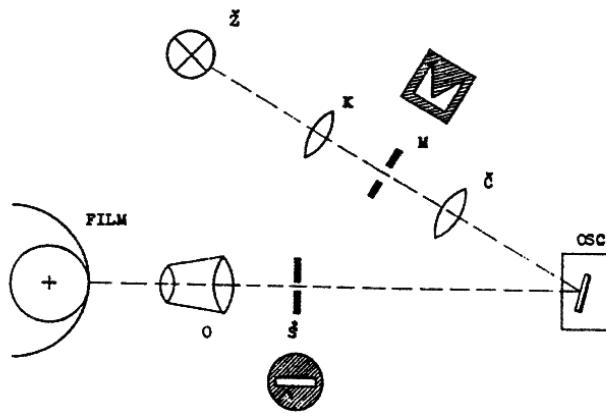
THD

Stálost záznamu

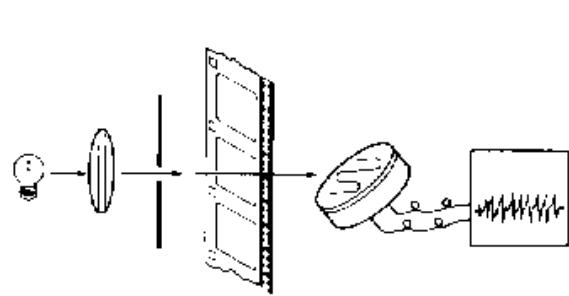




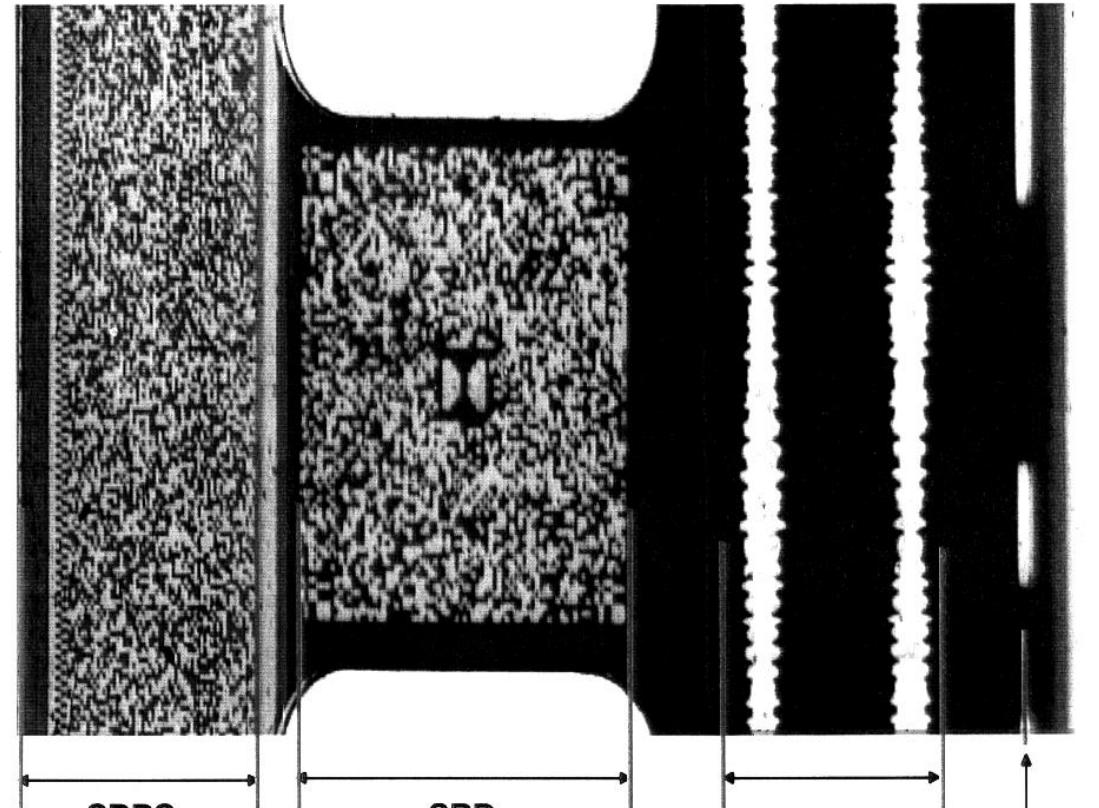
# Optický záznam - film



analog  
recording



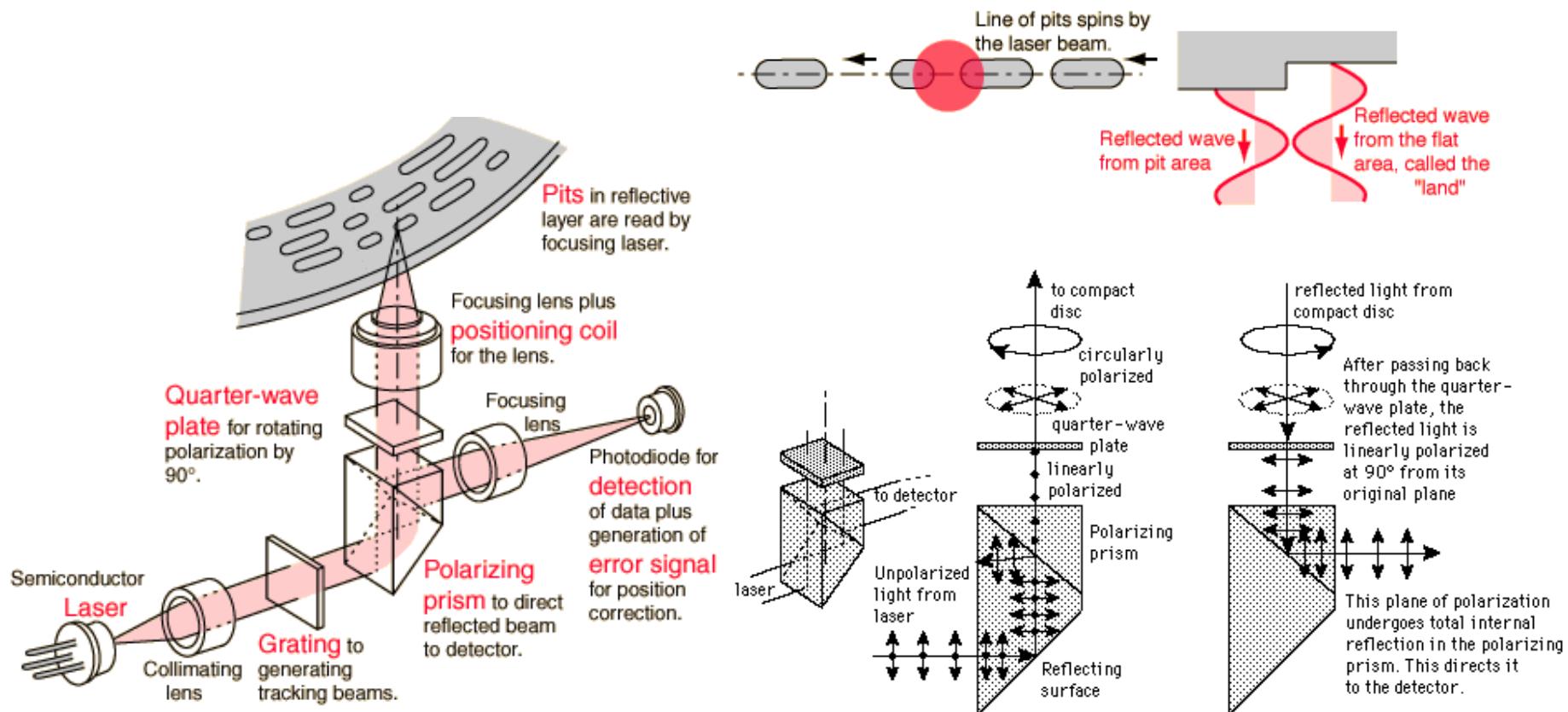
Schematic of optical sound reproduction.





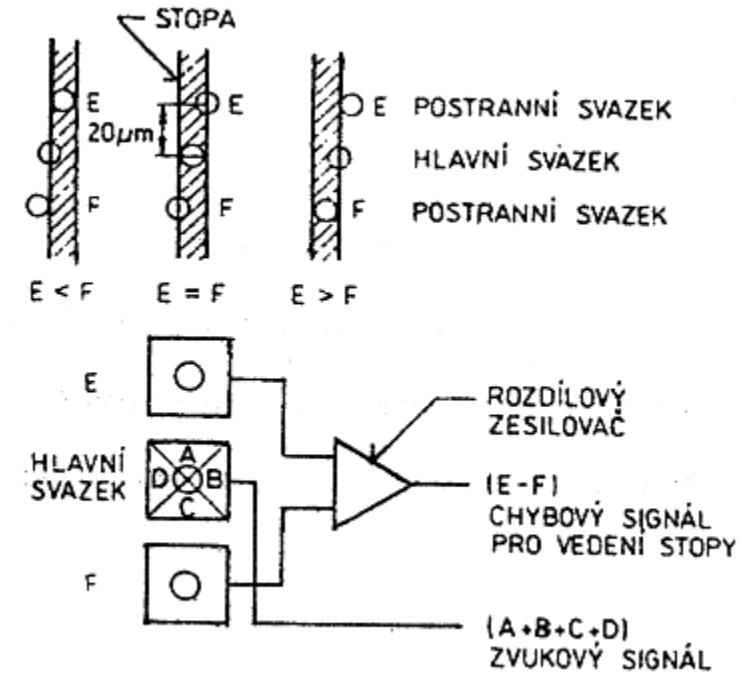
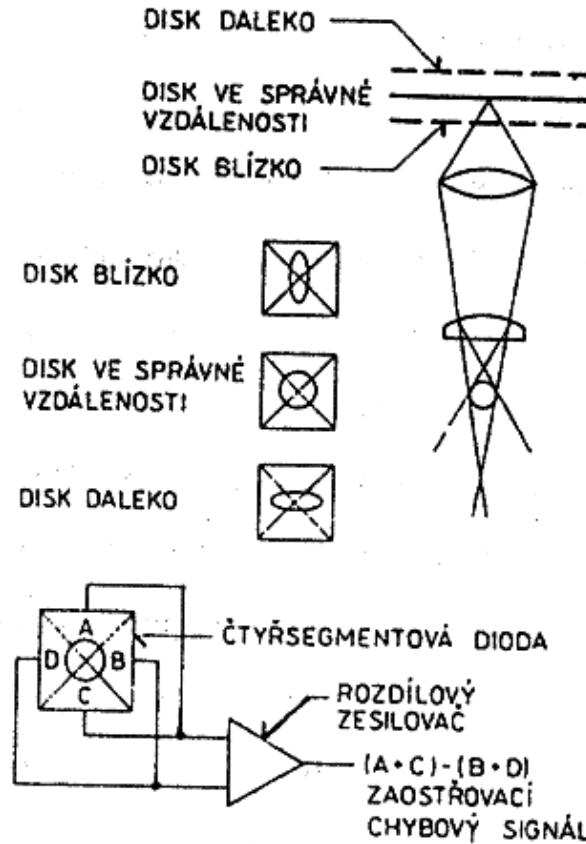
# Optický záznam CD

## Hloubka jamky (pit)?





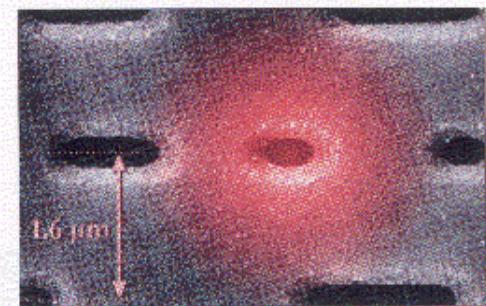
# Tracking & focusing



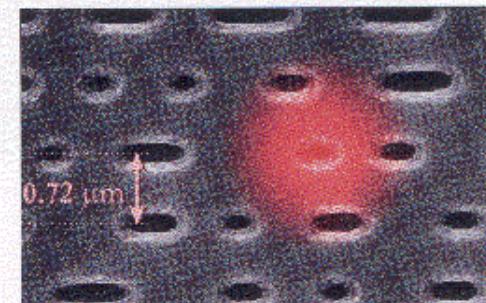


# Optické disky

Medium	CD	DVD	DVR-blue
Layer capacity	0,65 GB	4,7 GB	22,5 GB
wavelength	780 nm	650/635 nm	405 nm
Rozteč stop	1,5 um	0,72 um	0,5 um
Num. apertura	0,45	0,6	0,85
Tl. vrstvy	1,2 mm	0,6 mm	0,1 mm



Bei CD: Der infrarote Laser braucht eine relativ breite Spur.



Bei DVD: Der Laser im roten Bereich erlaubt wesentlich kleinere Pits.

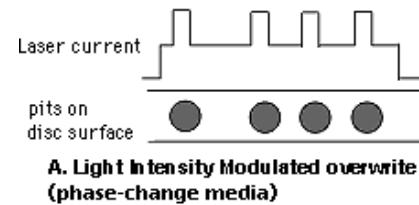
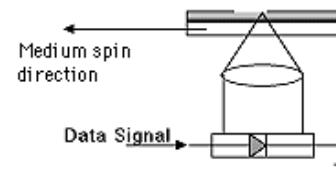
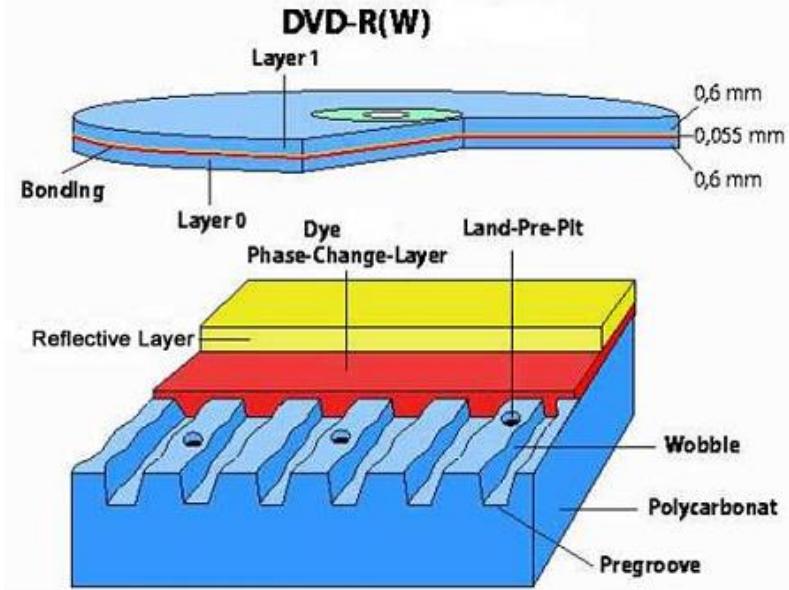


Bei DVR-blue: Der blau-violette Laser liest die extrem schmalen Spuren sicher aus.



# Optické disky

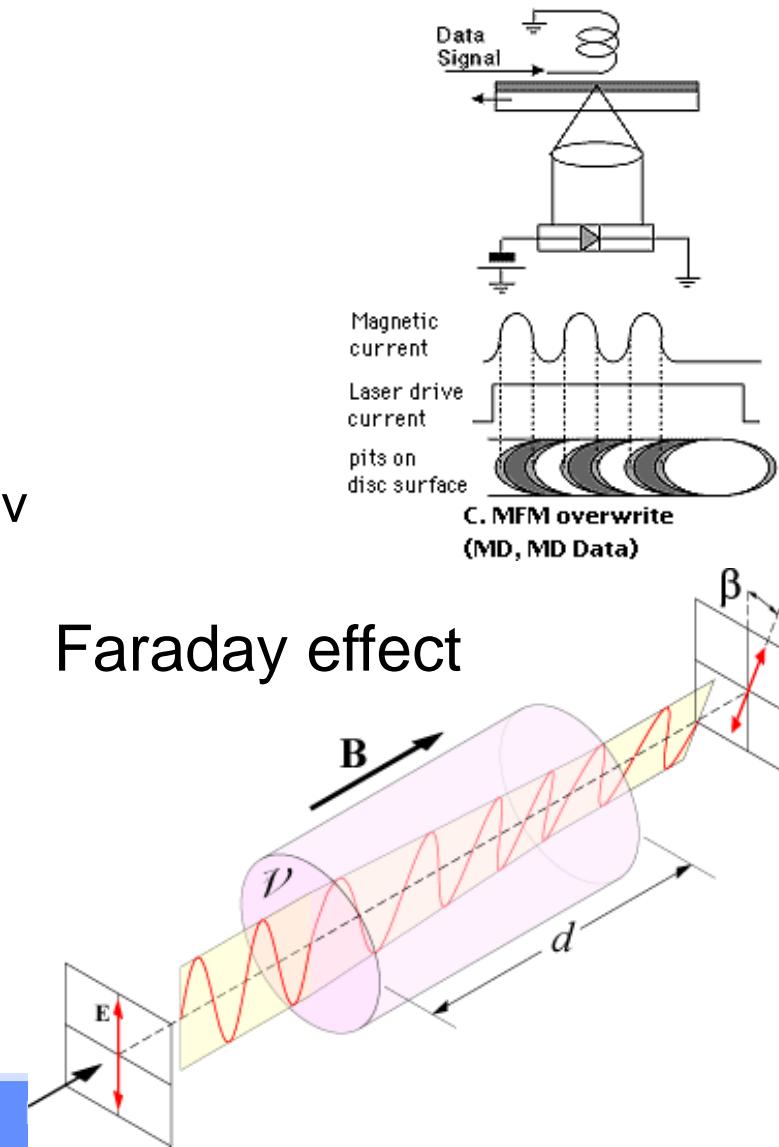
- **Lisované**
  - ❖ Fázový rozdíl mezi 0 a 1
- **Zapisovatelné –R**
  - ❖ Barvivo (dye) pohlcuje světlo
    - „propálené“ barvivo – silný odraz
    - „nepropálené“ barvivo – slabý odraz
- **Přepisovatelné –RW, +RW, RAM**
  - ❖ Materiál dvě fáze
    - Krystalická – silný odraz
    - Amorfní – slabý odraz





# Magneto-optický záznam - MD

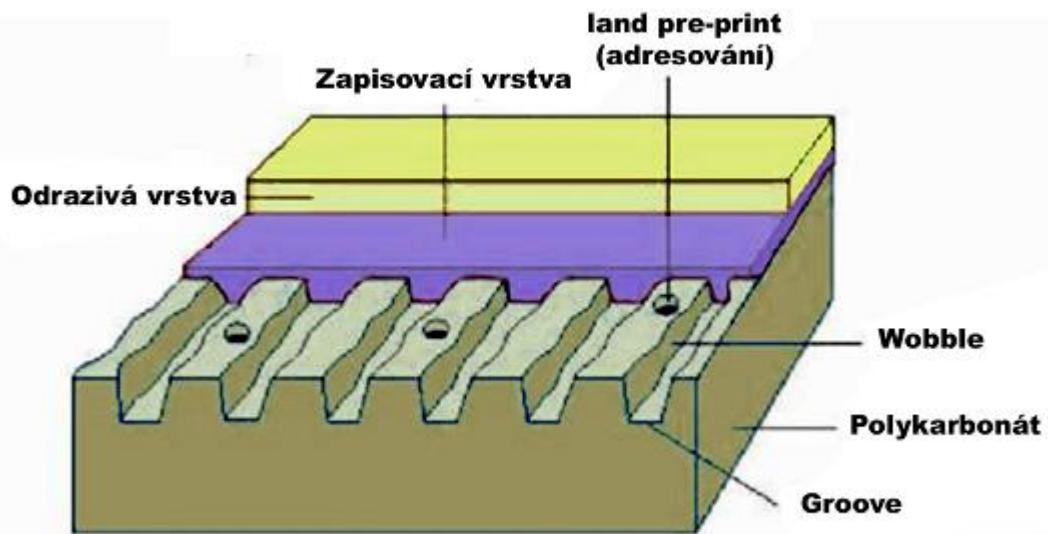
- **Záznam (termo)magnetický**
  - ❖ Magnetizaci lze měnit nad určitou teplotou
    - Ohřev laserem
    - Záznam mg. hlavou
  
- **Čtení optické**
  - ❖ Změna (natočení) polarizace světla v mg. poli
  - ❖ Detekce změny





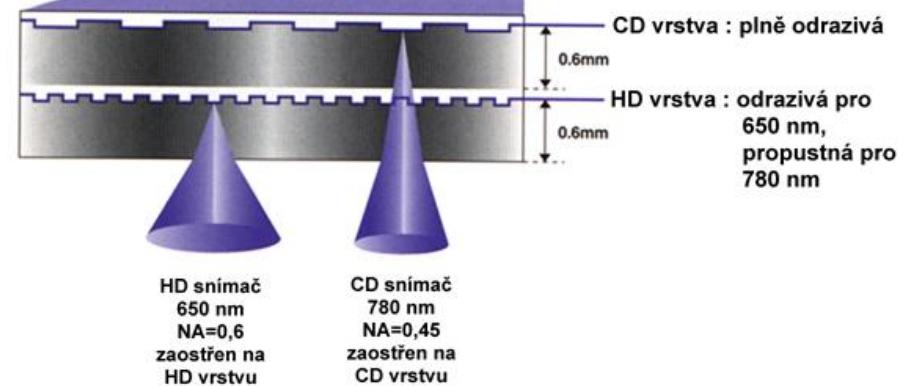
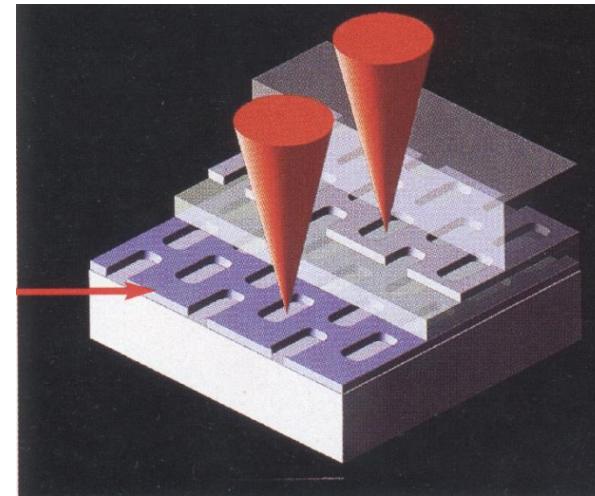
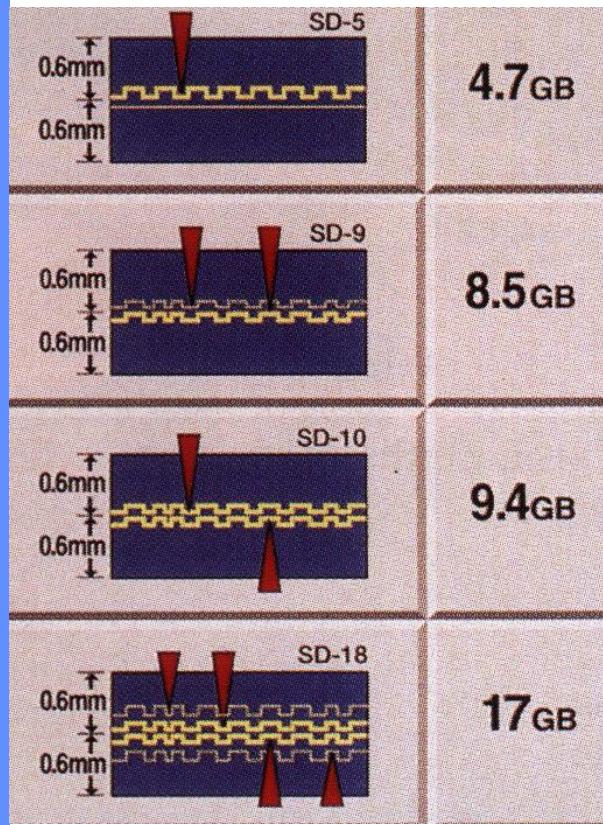
# Adresace přepisovatelných disků

- Na rozdíl od lisovaných disků nutnost „vodicích drážek“ (pregrooves)
- Tvar „drážky“ modulován vf – informace o adrese



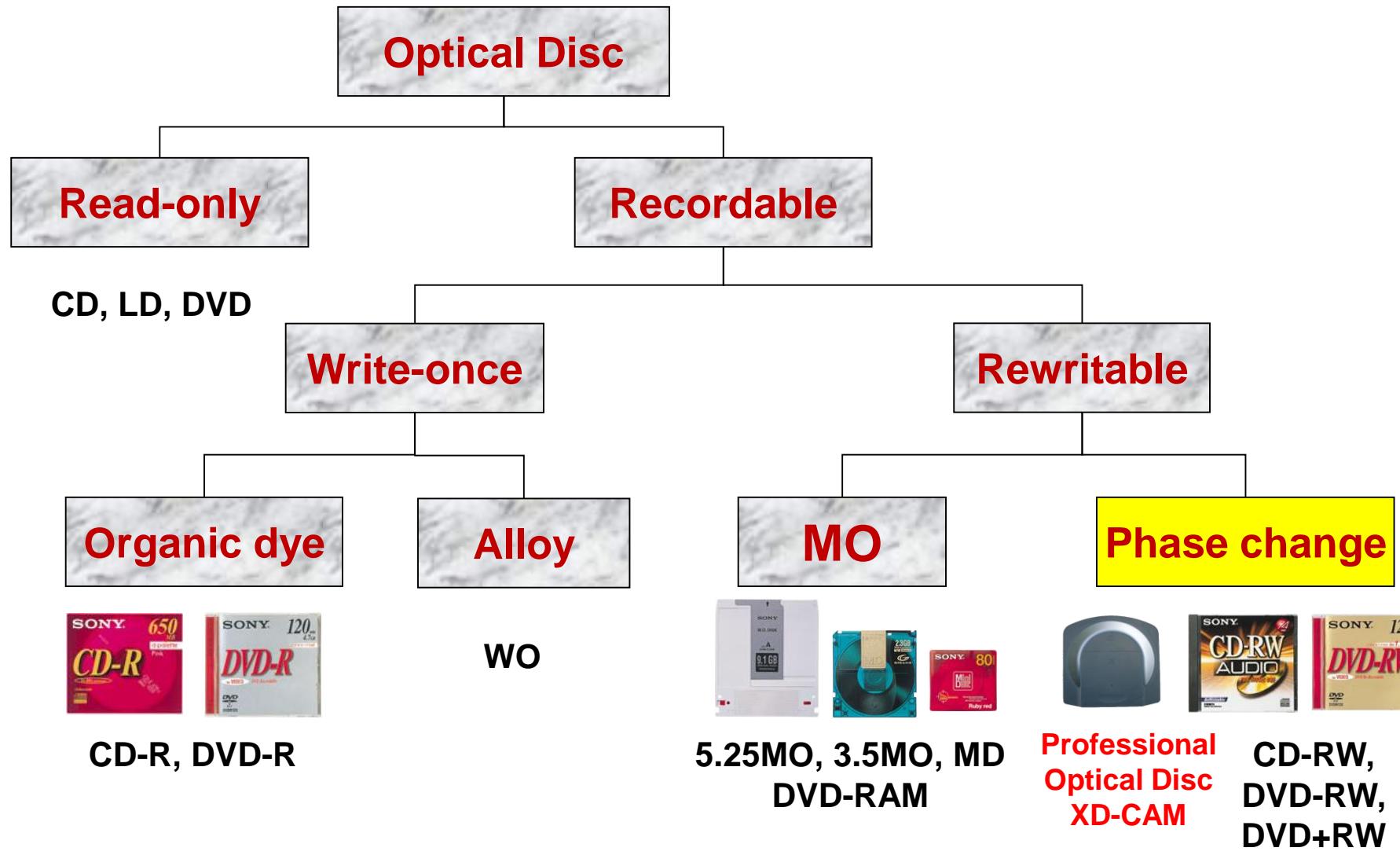


# Vícevrstvé disky





# Optické disky





# FLASH

floating gate transistors = cells

„MOSFET“ –

control gate,  
floating gate

electrons trapped on FG – information

**reading:**

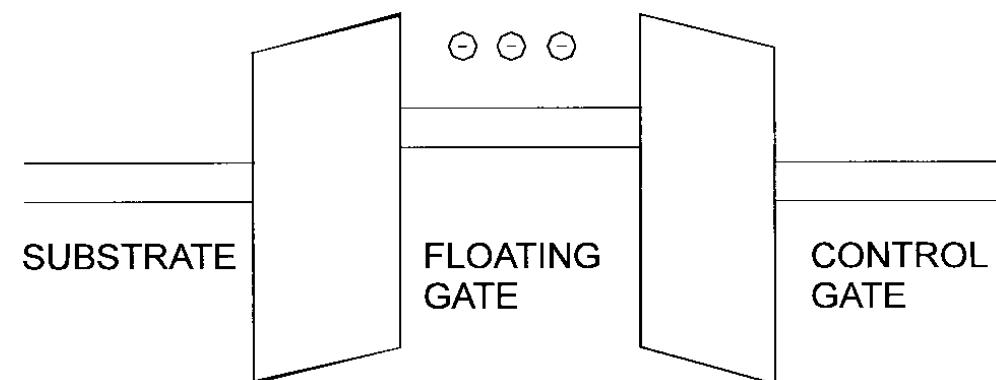
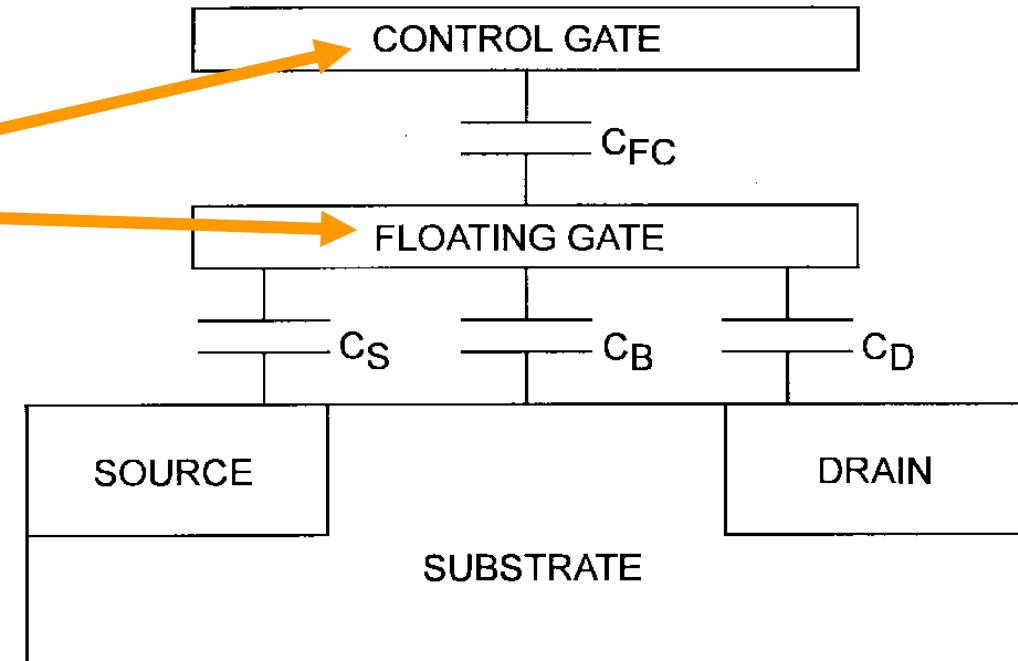
$U_{CG}$

**programming:**

hot-electron injection –  $I_{S-D}$  + large  $U_{CG}$

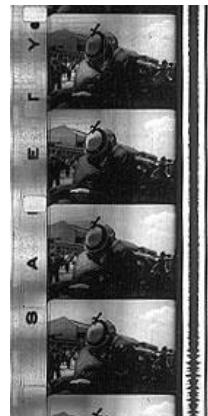
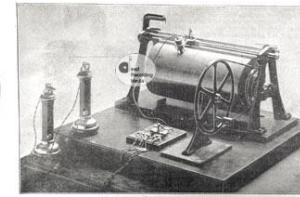
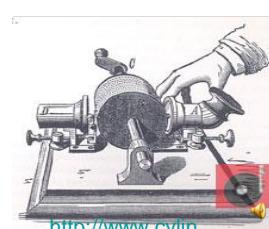
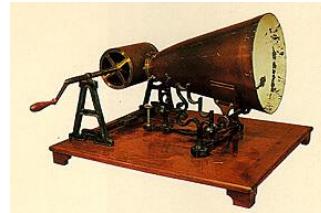
**erasing:**

tunneling -  $U_{CG-S}$



# Shrnutí

- Mechanický p~(u)~ξ**
- Magnetický p~(u)~B**
- Opticky čtený – film**
- Opticky čtený – disk**
- Magneto-optický**
- Flash Memory**



[http://en.wikipedia.org/wiki/Reel\\_to\\_reel](http://en.wikipedia.org/wiki/Reel_to_reel)

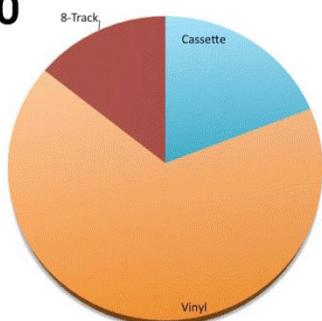


DAT  
Digital Audio Tape



# DOTAZY?

1980



<http://www.recording-history.org/HTML/musictech1.htm>, [http://en.wikipedia.org/wiki/Voyager\\_Golden\\_Record](http://en.wikipedia.org/wiki/Voyager_Golden_Record),



Blu-ray Disc



# Shrnutí

- **Vzorkování a jeho důsledky**
- **Kvantování a jeho důsledky**
- **Zdrojové kódování – princip ztrátové audio komprese**
- **Analogový magnetický záznam (vč. předmagnetizace)**
- **Optický záznam**
  - ❖ Záznam na CD-DA
  - ❖ Rozdíly CD – DVD – BD
  - ❖ Typy optických disků (rozdíly –ROM, -R, -RW, MO)



# Kam dál?

- **Připravovaný předmět LAV**
  - ❖ Prakticky zaměřený HW předmět (0+4)
  - ❖ Experimenty s RPI, měření
- **PV předměty ZST a UAK**
- **Projekt PROJ, BP**
- **Magistr EK-AVZS**
- **Workshopy a exkurze v AV oblasti** <https://mmtg.fel.cvut.cz/avt/>
- **Zahraniční stáže**
  - ❖ Erasmus – IMDEA Francie
- **Otevřená audio laboratoř** – [honzikp@fel.cvut.cz](mailto:honzikp@fel.cvut.cz)
- **Audiologické experimenty** – [vencovac@fel.cvut.cz](mailto:vencovac@fel.cvut.cz)