

0 1:00 1:20 1:40 2:00 2:20 2:40 3:00 3:20 3:40 4:00 4:20

+0 dB

ÚPRAVY ZVUKU

Digitalizace zvuku

Time

0:00.000

Zoom



Selection/View

	Start	End	Duration
Selection	0:00.000	0:00.000	0:00.000
View	0:00.000	5:00.852	5:00.852

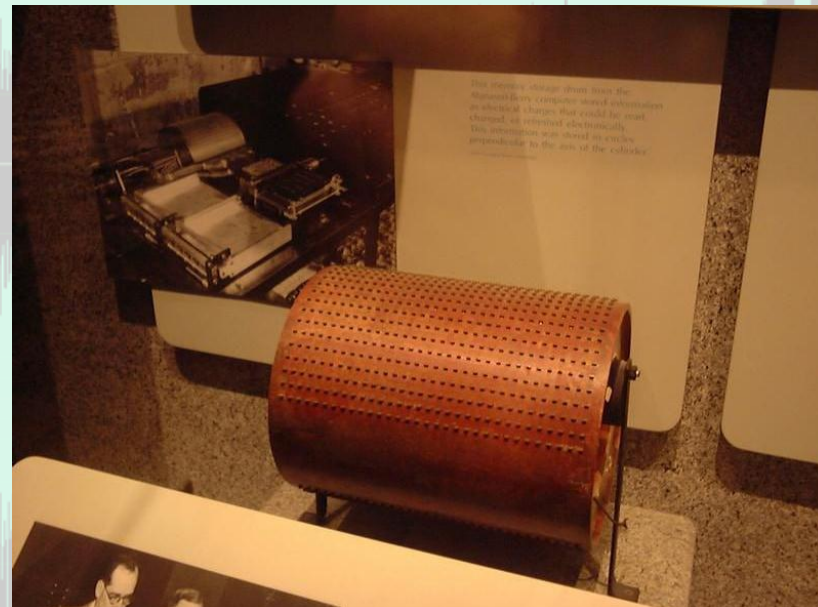
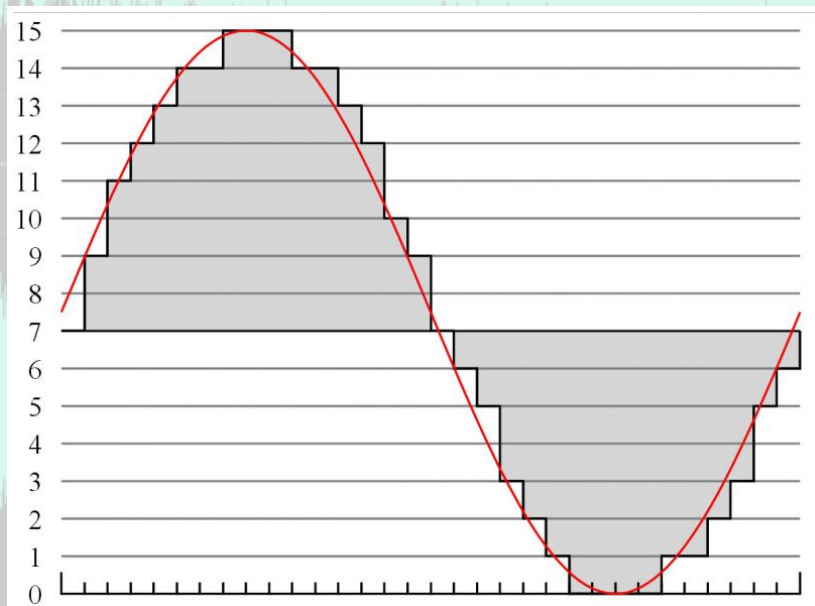
Historie

- **1937** objeven princip PCM – pulsně-kódové modulace (Alec Reeves)
- **1939** první elektronické digitální médium (kapacitní buben), 1942 magnetický buben
- **1943–1946** první využití PCM v telefonním šifrovacím systému SIGSALY
- **1947** vynález tranzistoru (William Shockley)
- **1962** komerční nasazení PCM pro digitální telefonní přenos (pásmo šířky 4000 Hz bylo vzorkováno 8 kHz)

10 100 120 140 200 220 240 300 320 340 400 420

Historie

- princip PCM
- bubnový disk



Time

Zoom

Selection/View

0:00.000

	Start	End	Duration
Selection	0:00.000	0:00.000	0:00.000
View	0:00.000	5:00.852	5:00.852

Historie

- replika prvního tranzistoru
- terminál SIGSALY (1943)



Historie

- **1962** první digitální audio nahrávka (sálový počítač)
- **1971** první mikroprocesor, první floppy disk
- **1972** optický videodisk s laserovou hlavou a 30 cm skleněným datovým médiem (Philips)
- **1975** první 16 bitový digitální rekordér s využitím vysokorychlostního magnetofonu (Tom Stockham)
- **1980** kompaktní disk 74 minut (Sony, Philips)

Historie

- Laserdisc:



- Compact Disc:



Time

0:00.000

Zoom

[a] [a] [a] [a] [a]
[a] [a] [a] [a] [a]

Selection/View

	Start	End	Duration
Selection	0:00.000	0:00.000	0:00.000
View	0:00.000	5:00.852	5:00.852

Digitalizace – princip

- **Digitalizace** je převod spojitého (analogového) signálu na nespojitý (diskrétní)
- provádí se ve dvou krocích:
 - **vzorkování** (sampling) – vstupní signál je rozdělen na jednotlivé vzorky
 - **kvantizace** – hodnota amplitudy každého vzorku je převedena na číslo obvykle v binárním tvaru

Digitalizace – princip

- Digitalizace se provádí pomocí A/D převodníků
 - A/D převodník = ADC = Analog-to-Digital Converter
- Zpětný převod na analogový signál se provádí pomocí D/A převodníků
 - D/A převodník = DAC = Digital-to-Analog Converter
- Oba typy převodníků jsou dnes běžnou součástí zvukových karet a dalších zařízení hudební a spotřební elektroniky

Digitalizace – parametry

- **Vzorkovací frekvence:**

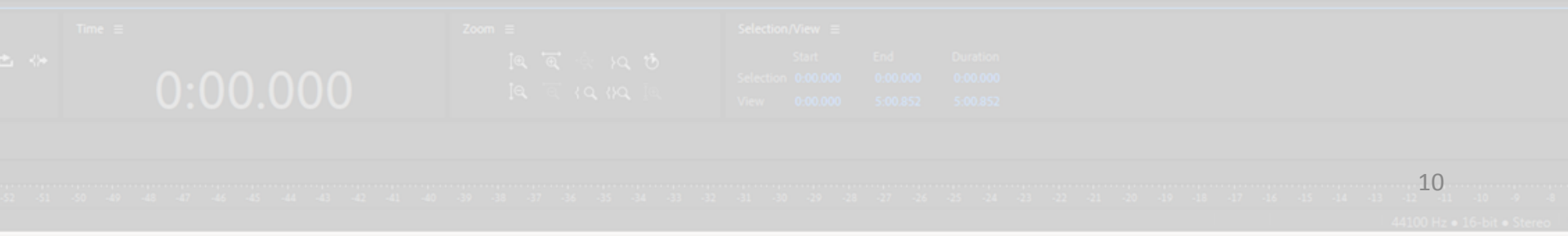
- ovlivňuje frekvenční rozsah zaznamenaného signálu
- platí Shannovova/Nyquistova/Kotělnikovova věta
- číslo vyjadřuje, kolik vzorků je za 1 s odebráno

- **Kvantizační rozsah (bitová hloubka):**

- jde o počet úrovní, které rozlišuje převodník
- určuje „jemnost“ rozlišení amplitudy signálu
- má vliv na množství detailů zachycených v nahrávce
- ovlivňuje dynamický rozsah a odstup signálu od šumu

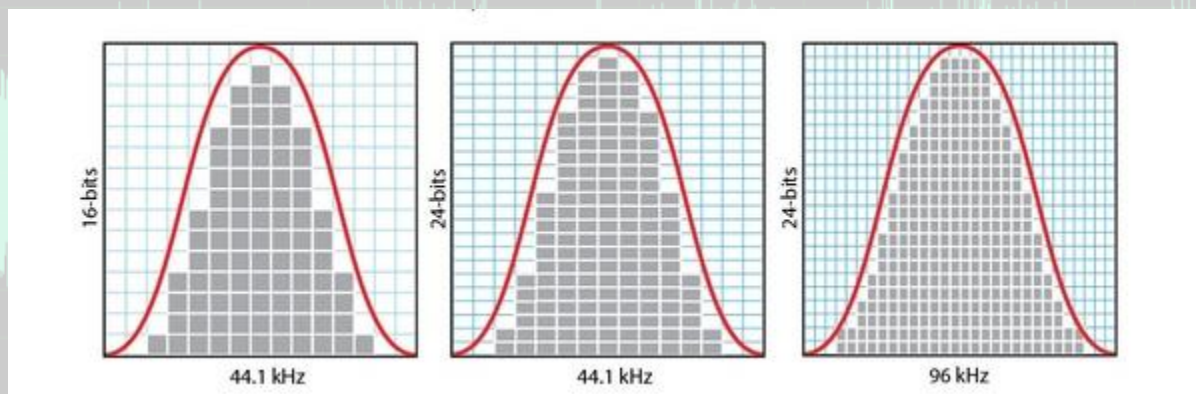
Digitalizace – parametry

- Původní problém digitálního záznamu, kterým bylo jeho nízké rozlišení, a tím i určitá degradace zvuku, je již minulostí
 - kvalita je při rozlišení 96 kHz/24 bitů, 192 kHz/24 bitů a vyšším při použití kvalitních převodníků z hlediska zvukové věrnosti dostatečná
 - srovnejte s parametry CD – 44.1 kHz, 16 bitů (65 536 úrovní), 24 bitů = 16 777 216 úrovní



Digitalizace – parametry

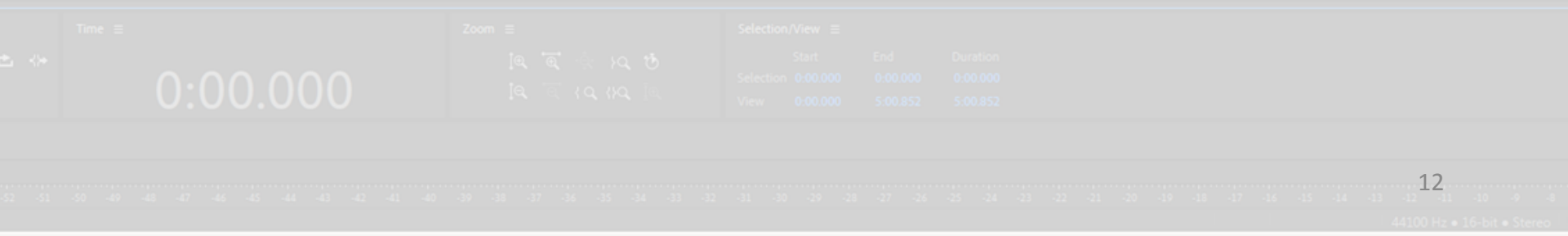
- porovnání různé vzorkovací frekvence a bitové hloubky – první obrázek zleva je CD:



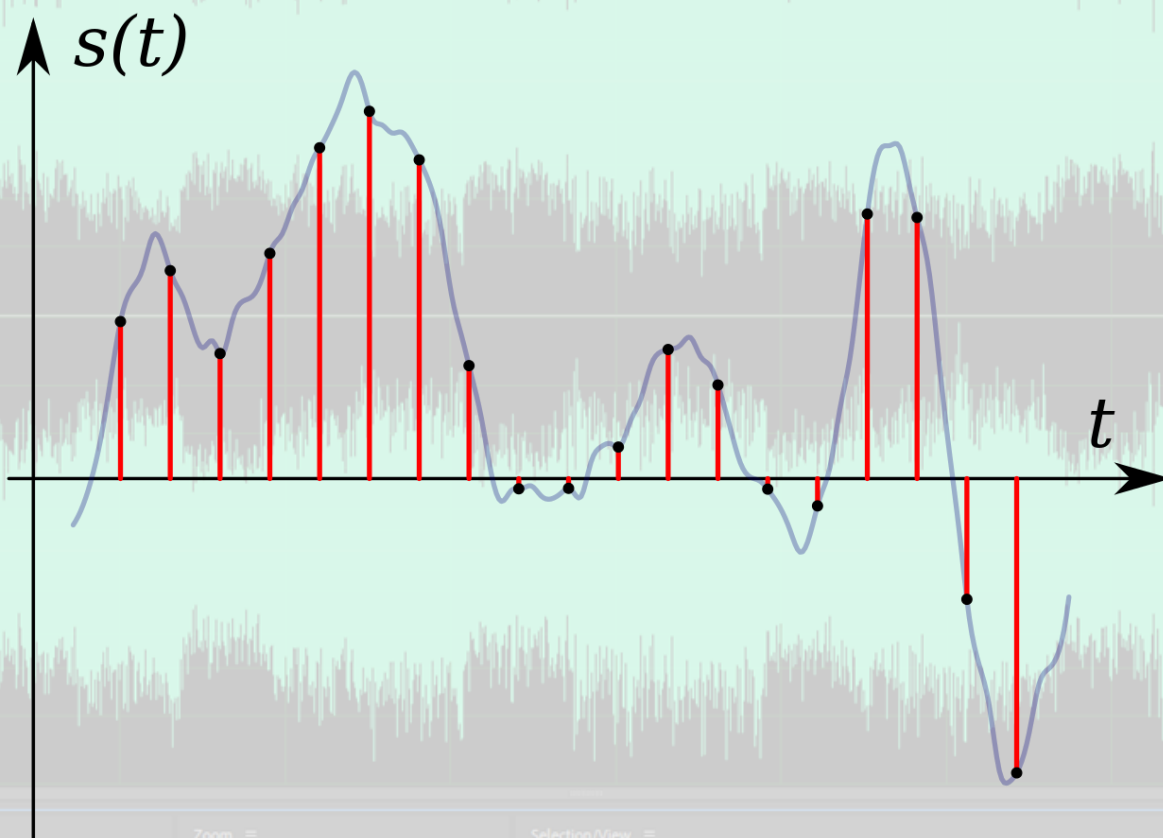
Vzorkovací teorém

- **Shannonova – Nyquistova – Kotělnikovova věta:**

Dokonalá rekonstrukce signálu je možná pouze tehdy, když je vzorkovací frekvence větší než dvojnásobek maximální frekvence vzorkovaného signálu.



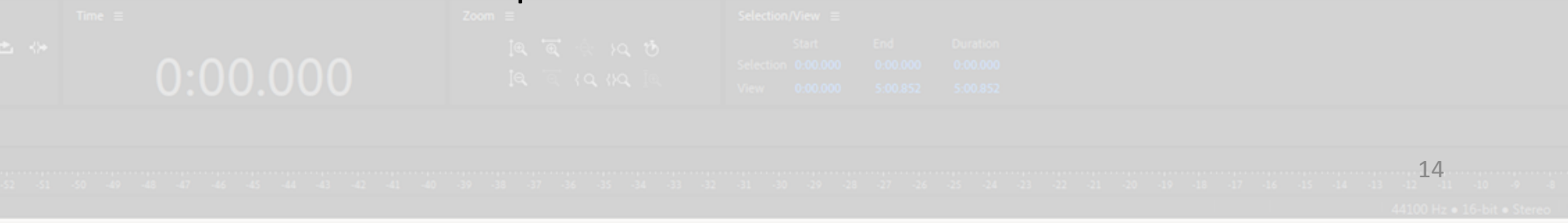
Vzorkování



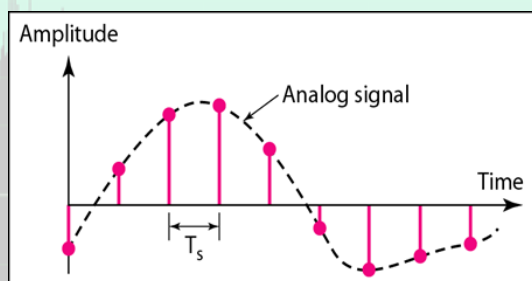
analogový signál vzorkovaný signálem s konstantní vzorkovací frekvencí

Vzorkování

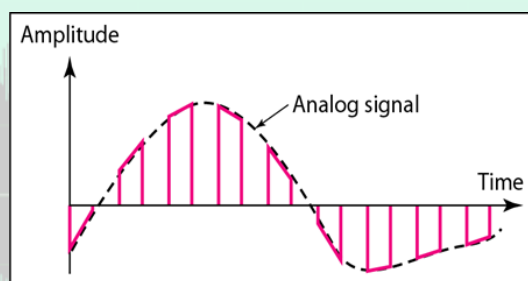
- V principu můžeme signál vzorkovat dvěma způsoby:
 - **klíčováním**
 - při klíčování signál prochází přes bránu, která se otevírá a zavírá podle taktu hodin. Špička impulsů je nepravidelná, kopíruje vstupní signál
 - **impulsní modulací**
 - signál je nahrazen krátkými impulsy, jejichž amplituda odpovídá úrovni kvantovaného signálu. Šířka a perioda impulsů je vždy konstantní po celou kvantizační dobu.



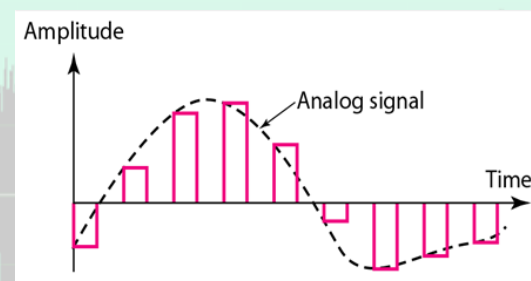
Vzorkování



ideální vzorkování



*klíčování – gating,
natural sampling*



*impulsní modulace
(flat-top sampling)*

Tzv. ideální vzorkování předpokládá, že doba vzorkování je nekonečně krátká. Jeho výstupem jsou ideální impulsy s jednoznačně určenou amplitudou. Takový přístup je vhodný při provádění výpočtů a odvozování.

Vzorkování

- Běžně používané vzorkovací frekvence:
 - 8000 Hz – digitální telefonie
 - 16000 Hz – VoIP, VVoIP
 - 32000 Hz – kamery miniDV, bezdrátové mikrofony
 - 44100 Hz – audio CD
 - 48000 Hz – profesionální videozařízení, DV, DTV, DVD, filmy
 - 88200 Hz – některá zařízení pro vytváření CD
 - 96000 Hz – DVD-audio, Blu-Ray, HD DVD, nahrávací zařízení
 - 192000 Hz – DVD-audio, Blu-Ray, HD DVD, nahrávací zařízení, software pro editaci audia

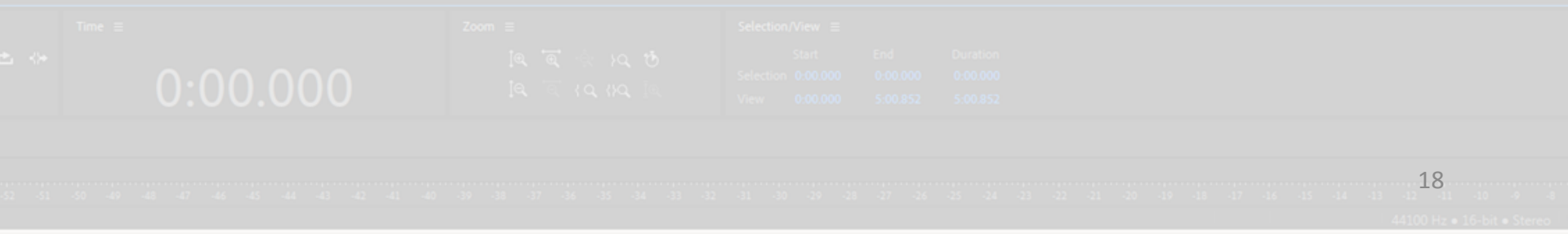
Vzorkování

- **Příklad:**

- při vzorkovací frekvenci 44100 Hz je vzorkovací perioda (vzdálenost mezi vzorky) 22,7 μ s
- při vzorkování sinusového signálu o frekvenci 100 Hz, jehož perioda je 0,01 s, budeme mít k dispozici cca 441 vzorků. Pro frekvenci 1000 Hz to bude 44 vzorků, pro 10000 Hz přibližně čtyři vzorky
- pro 20000 Hz, teoretický strop rozsahu lidského sluchu, půjde již pouze o dva vzorky, což není mnoho
- dalším zvyšováním frekvence vzorkovaného signálu tak vzorky „dojdou“ a nezbude ani jeden vzorek na periodu

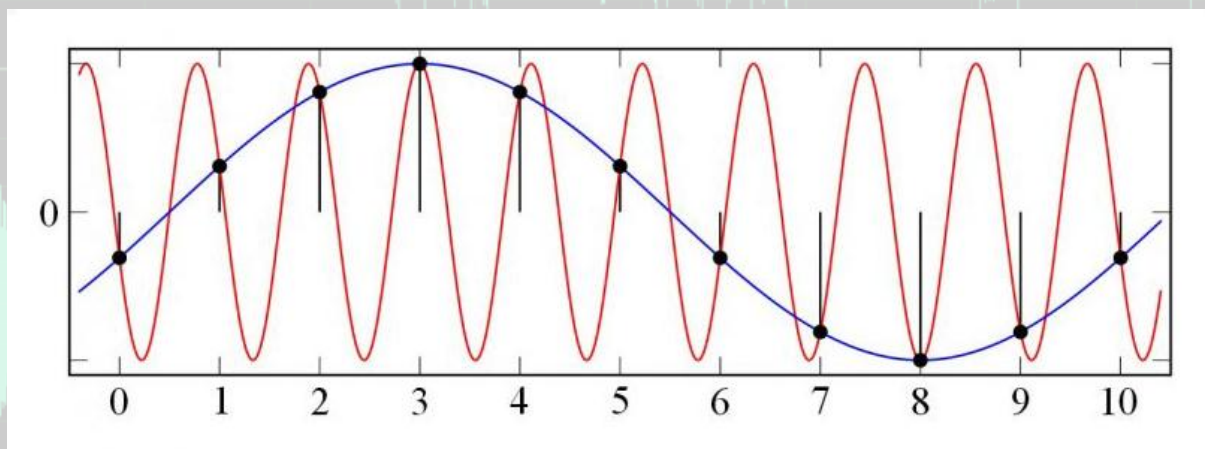
Aliasing

- Při použití nižší vzorkovací frekvence se po převodu zpátky na analogový signál mohou v důsledku tzv. aliasingu objevit ve výsledném signálu frekvence, které v původním signálu nebyly



Aliasing

- Červený vstupní signál byl navzorkován frekvencí menší než dvojnásobnou:



označené vzorkovací body „přeložily“ původní frekvenci do propustného pásma. Výsledkem je zcela jiná, mnohem nižší frekvence (modrá křivka)

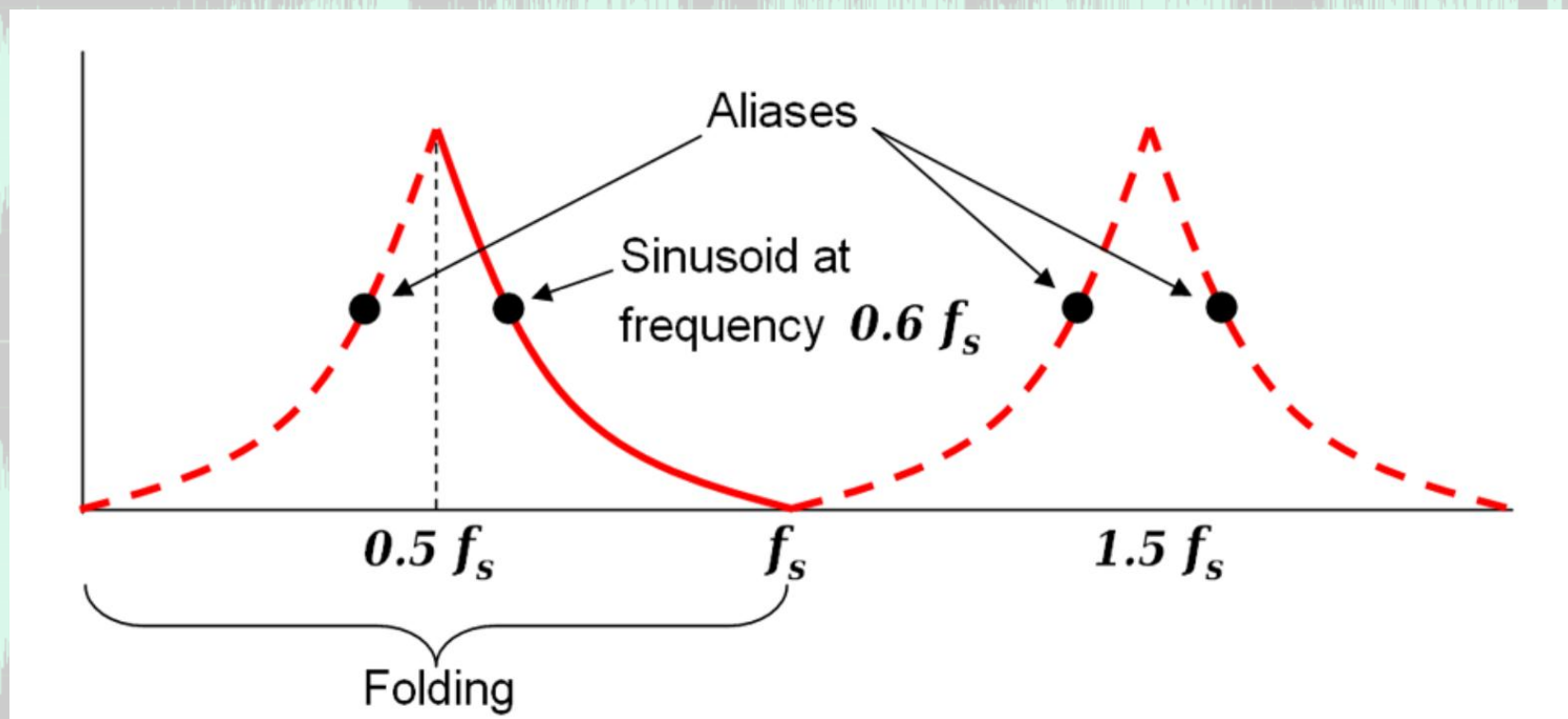
Aliasing

- Příklad:

- při vzorkování frekvencí 44100 Hz jsme schopni uchovat složky do frekvence 22050 Hz. Vyšší složky by se nám tzv. zrcadlily, kdy pomyslné zrcadlo je umístěno na frekvenční ose v místě poloviny vzorkovací frekvence a odráží nám informace o složkách za zrcadlem zpátky mezi správně vzorkované frekvence
- např. informace získaná vzorkováním signálu o frekvenci 34100 Hz dopadne ve spektru na místo vyhrazené pro 10000 Hz ($44100 - 34100 = 10000$)



Aliasing



Zrcadlení ve spektru signálu - bod 0,6 vzorkovací frekvence má ještě 3 „alias“

Time \equiv 0:00.000

Zoom \equiv [Icons]

Selection/View \equiv

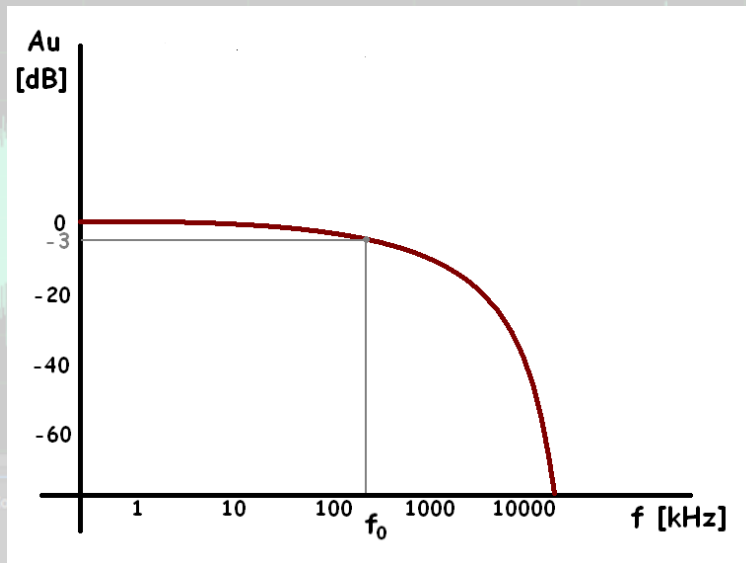
	Start	End	Duration
Selection	0.00.000	0.00.000	0.00.000
View	0.00.000	5.00.852	5.00.852

Dolní propust

- Vzniku aliasingu se bráníme omezením frekvence vzorkovaného signálu pomocí tzv. antialiasingového filtru, což je filtr typu *dolní propust*
- Jako dolní propust se označuje lineární filtr, který nepropouští signály vyšších frekvencí
- Filtr se používá především v audio technice
- Využívá se také při zpracování signálu pro eliminaci nežádoucího šumu na vyšších frekvencích

Dolní propust

- požadavky na filtr: co nejvyšší strmost, a současně co nejmenší útlum v okolí poloviny vzorkovací frekvence
- kvalita řešení tohoto filtru určuje jeden z rozdílů mezi levnými a dražšími převodníky



frekvenční charakteristika filtru typu dolní propust

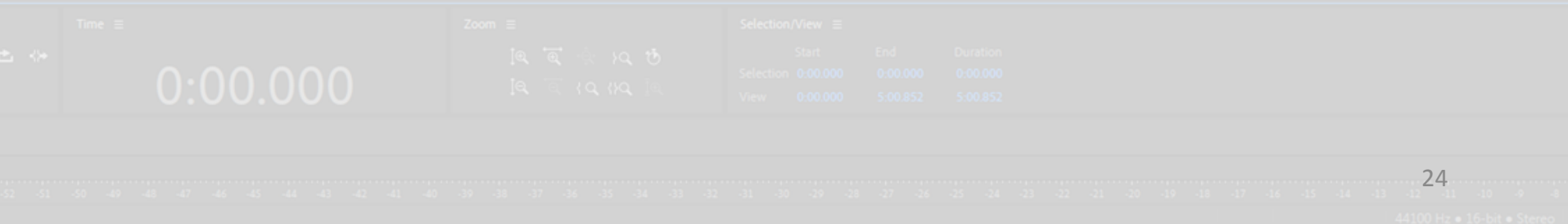
Vzorkovací frekvence

- **Význam vyšší vzorkovací frekvence:**

- máme k dispozici více informací o signálu, a proto jsme schopni ho mnohem více a lépe měnit a transformovat (přeladování, změny časové délky, opravy, odšumování)

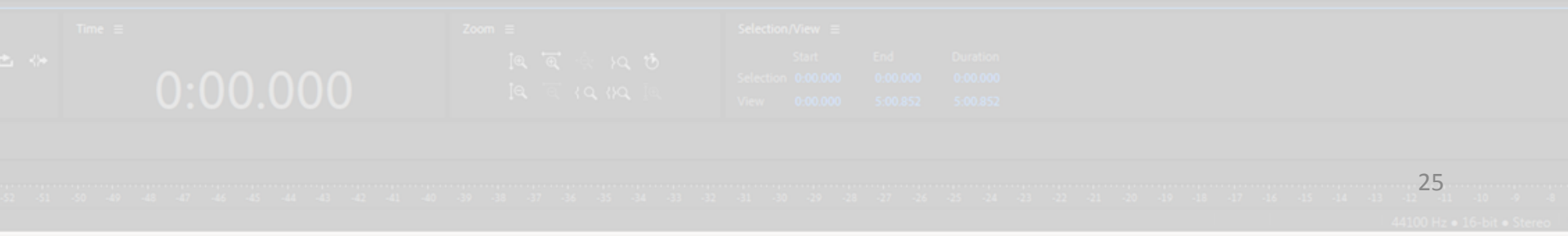
- **Kdy vyšší vzorkovací frekvenci použít:**

- při požadavku dalšího zpracování (postprodukce)
- plánujeme-li se zvukem značně kreativně pracovat



Vzorkovací frekvence

- **Nevýhoda použití vyšší vzorkovací frekvence:**
 - nárůst objemu dat (zejména při 96 nebo 192 kHz)
 - minuta 24 bit 48 kHz zabírá cca 16.5 MB
 - u složitých výpočtů a transformací (při čištění zvuku z pásu nebo desky ve 192 kHz můžeme narazit na výkonový strop počítače)
 - převod na nižší frekvenci nemusí být bez problémů (96 či 192 kHz → 44.1 kHz nedává celé číslo), vznikají nežádoucí artefakty, aliasing, dithering



Kvantizace

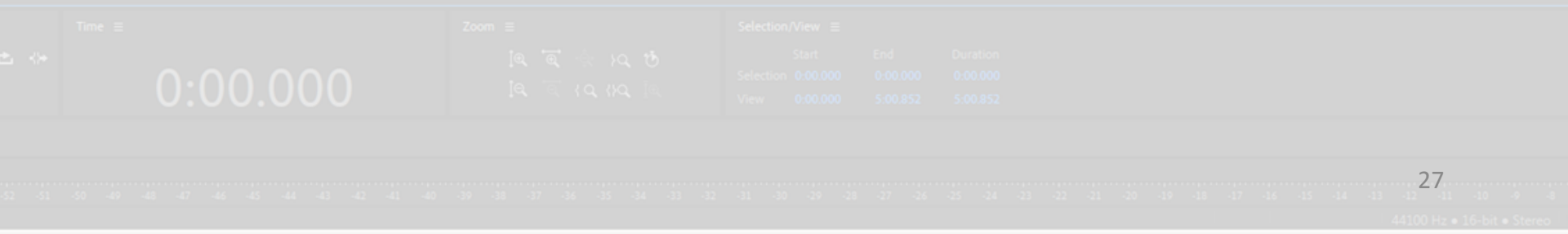
- Při **kvantizaci** je vzorkovanému signálu přiřazeno číslo odpovídající amplitudě:



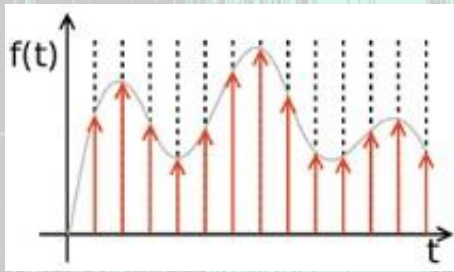
- kvantovaný signál může mít nejednoznačnou úroveň, pokud se během jeho trvání amplituda mění. Tím, že mu přiřazujeme pouze jedno číslo, musí nutně dojít k tzv. kvantizační chybě. Tato chyba má za následek přítomnost kvantizačního šumu ve výsledném signálu

Kvantizace

- Pokud není převodník vhodně navržen, může být přítomnost kvantizačního šumu problematická
- Tato chyba je jednou z hlavních nevýhod principu převodu A/D
 - existuje několik metod, jak ji potlačit



Kvantizace



*vzorkovaný signál
bez kvantizace*



*kvantizovaný signál
bez vzorkování*



*výsledný digitální
signál*

Time

0:00.000

Zoom



Selection/View

	Start	End	Duration
Selection	0:00.000	0:00.000	0:00.000
View	0:00.000	5:00.852	5:00.852

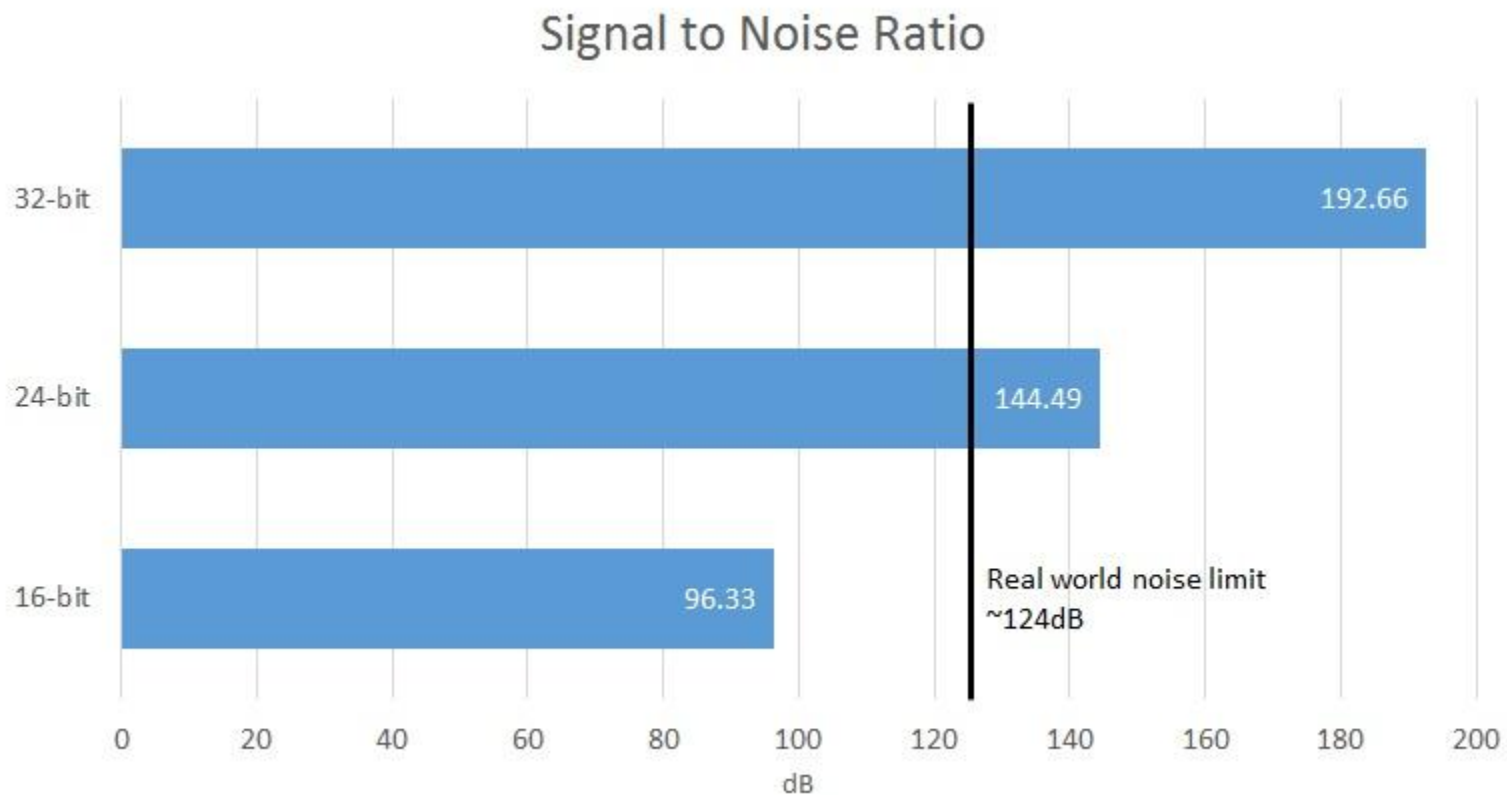
Kvantizace

- Kvalita převodníků je do značné míry určena odstupem užitečného signálu od šumu
 - odstup od šumu je vyjádřen poměrem S/N (Signal/Noise), případně parametrem SNR (Signal-to-Noise Ratio)
- Tento parametr vyjadřuje, jak velkou dynamiku může signál mít

Bitová hloubka

- Odstup signálu od šumu lze spočítat ze vztahu:
- $SNR = 6,02 n + 1,76 [dB]$
 - vztah platí pro harmonický signál
 - n je počet bitů převodníku
 - zvýšení n o 1 bit tak přinese zlepšení SNR přibližně o 6 dB
- 16 bitový převodník má teoretický SNR asi 98 dB
 - v praxi je to o něco méně, přibližně 96 dB
- 24 bitový převodník má teoretický SNR 146 dB
 - v praxi se běžně se udává 144 dB

Bitová hloubka



vliv bitové hloubky na odstup od šumu (SNR)

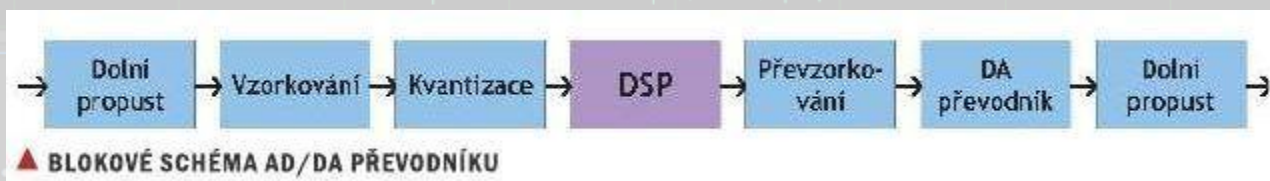
Bitová hloubka



vliv bitové hloubky na jemnost vykreslení zaznamenaného signálu

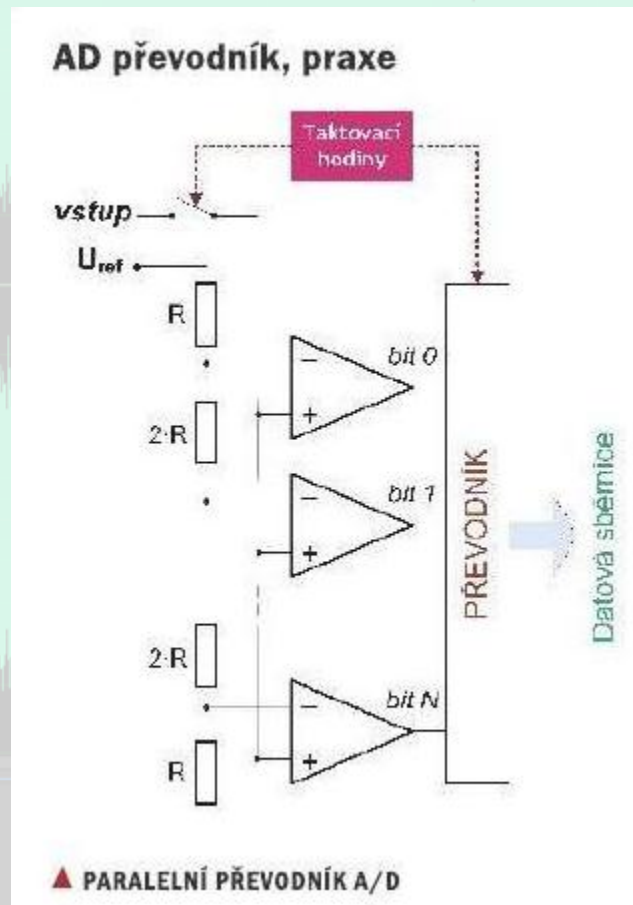
Blokové schéma AD/DA převodu

- Na vstupu je dolní propust, která potlačí frekvence nad vzorkovaným pásmem (Nyquistův teorém)
- Vzorkováním signál rozdělíme na jednotlivé vzorky
- Kvantizací převedeme vzorky na čísla v binárním tvaru
- Digitální signál je zpracován procesorem (DSP, DAW...), převeden zpět na analogový a ošetřen dolní propustí



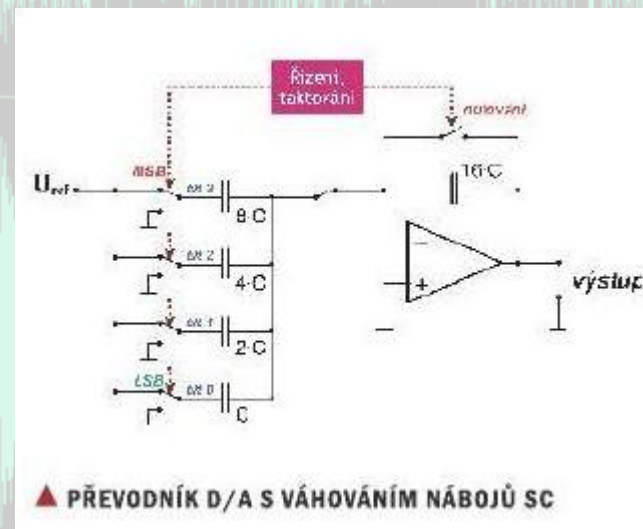
Paralelní převodník

- Referenční napětí z děliče je přivedeno na jeden vstup komparátoru
- Na druhý vstup je přiveden signál určený ke zpracování
- Pokud je signál vyšší než váhová část referenčního napětí, bude výstupem tohoto bitu logická „1“
- Pokud je menší, získáme logickou „0“
- Výstupem každého taktu je tedy jedno slovo o N bitech



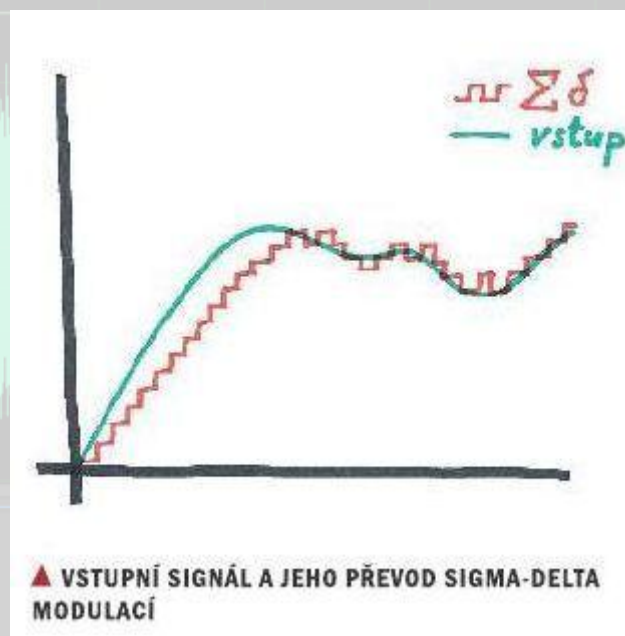
Převodník s váhováním nábojů

- Činnost probíhá ve dvou cyklech
- Spínače odpovídají jednotlivým bitům datového slova
- Kondenzátor vpravo pracuje jako integrátor a sčítá jejich váhované náboje
- V prvním cyklu jsou náboje kondenzátorů vynulovány
- Následně se sepnou ty spínače, jejichž bit je „1“
- Tím dojde k nabití příslušných kondenzátorů a ke sčítání jejich nábojů na integrátoru
- Na výstupu zesilovače se objeví výstupní napětí



Převodník Sigma-Delta

- Hlídá změnu mezi dvěma po sobě jdoucími vzorky
- Periodicky kontroluje amplitudu signálu, zda je aktuální hodnota větší nebo menší oproti předchozímu stavu
- Tuto změnu pak převádí na nuly a jedničky
- Převodník má pouze dva stavy: „-1“ a „1“
- Napětí na jeho výstupu tak napětí neustále kmitá nahoru a dolů



Převodník Sigma-Delta

- označován též jako „jednobitový“
- výhoda: snížení kvantizačního šumu a lepší poměr S/N než klasický převodník
- nevýhoda: aby dokázal zachytit rychlé změny signálu, musí být vzorkovací frekvence mnohem vyšší než u klasického A/D
- vzorkovací frekvence se u sigma-delta modulace pohybuje řádově v MHz

Převodník Sigma-Delta

- Proč tento převodník dosahuje menšího šumu:
 - šum je rozvrstven přibližně rovnoměrně v celém frekvenčním pásmu. U klasického převodníku je to mezi 0–20 kHz, ale u sigma-delta třeba až do 2 MHz. Díky tomu se výkon šumu rozprostře na mnohem větší plochu
 - užitečný signál leží jen v malé části tohoto frekvenčního rozsahu
 - protože se na konci řetězce nachází dolní propust, vyřízne se s užitečným signálem také menší porce šumu

Zlepšování parametru S/N

1. Zvyšování počtu bitů převodníku

- tento postup naráží na technické meze použitých součástek. S vyšším počtem bitů musí být vylepšeny vnitřní obvody (DSP, datová sběrnice apod.). To má negativní vliv na náklady výroby celého zařízení

2. Nelineární kvantizace

- vychází z předpokladu, že úroveň signálu je jen zřídka na nejvyšší úrovni, častěji se pohybuje ve středních a nižších hodnotách. Z toho vyplývá myšlenka zjemnit kvantování pro rozsah, kde se signál nachází častěji, na úkor méně využívaného pásma

Zlepšování parametru S/N

- jiný postup využívá doplnění převodníku o řízený zesilovač. Ten má zesílení nastavitelné jenom v několika málo krocích, např. 1x, 10x a 100x. Jeho ovládání zajišťuje vlastní A/D převodník. Při nastavení na „1x“ nedochází k žádné změně
 - je-li je detekován slabý signál, zesílení se mění na 10x nebo na 100x. Slabý signál je zesílen (takže jsou zesíleny i jeho změny), detekce je přesnější
 - z A/D převodníku nevystupuje pouze digitální signál, ale také informace o nastavení zesilovače (také v digitální formě)
 - zapojení se využívá mimo jiné u zvukových karet

Time

0:00.000

Zoom



Selection/View

	Start	End	Duration
Selection	0:00.000	0:00.000	0:00.000
View	0:00.000	0:00.852	0:00.852

Zlepšování parametru S/N



princip činnosti A/D převodníku s řízeným zesilovačem

Zlepšování parametru S/N

3. Zvyšování vzorkovací frekvence

- teoreticky by mělo mít každé zdvojnásobení frekvence stejný vliv jako zvýšení počtu bitů o 0,5. V praxi je však dosažené zlepšení o něco menší

4. Převzorkování signálu

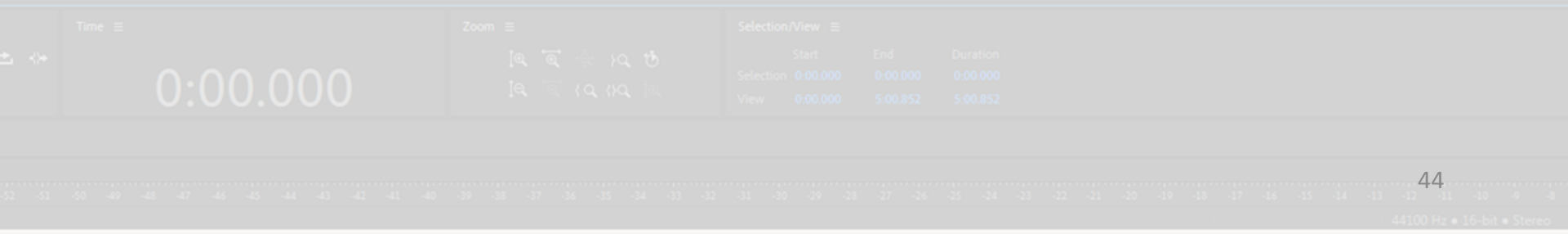
- jedná se o velmi důležitou metodu jak zlepšit odstup S/N. Převzorkování se využívá při převodu digitálního signálu zpátky na analogový a setkáme se s ním téměř ve všech audio aplikacích
- mezi každé dva vzorky vložíme jeden či více dalších tak, aby se výstupní signál zjemnil a připomínal skutečnou analogovou křivku

Zlepšování parametru S/N

- D/A převod signálu na analogovou formu není prováděn se stejnou vzorkovací frekvencí jako u A/D, ale frekvencí vyšší, která je jejím celistvým násobkem
- je-li např. frekvence D/A trojnásobně vyšší, musíme si dva vzorky vymyslet, protože reálně neexistují. V jazyce matematiky říkáme, že tyto vzorky *interpolujeme*
- tímto postupem získáme lepší odstup S/N, než kdybychom přímo na začátku použili vyšší vzorkovací frekvenci
- např. D/A převodník u klasického CD využívá frekvenci 352,8 kHz, což je osminásobek hodnoty 44,1 kHz

Kompaktní disk (CD)

- byl standardizován po téměř desetiletém vývoji v roce 1980
- parametry byly stanoveny takto:
 - vzorkovací frekvence 44,1 kHz
 - 16 bitová hloubka (65536 úrovní)



Kompaktní disk (CD)

- původně plánován na 60 minut záznamu (analogová LP deska)
- firma Sony prosadila 74 minut (Beethovenova Devátá symfonie)
- dnešní standard je 80 minut
- existují i delší varianty (90 a 99 minut), které ale nemusí být čitelné na všech zařízeních

Kompaktní disk (CD)

- Sony CDP-101, světově první komerční CD přehrávač (1982, \$730, 1x 16 bit DAC)



Kompaktní disk (CD)

- Philips CD-100, první sériově vyráběný CD přehrávač (1983, 2000 DM, 2x 14 bit DAC, převzorkování)



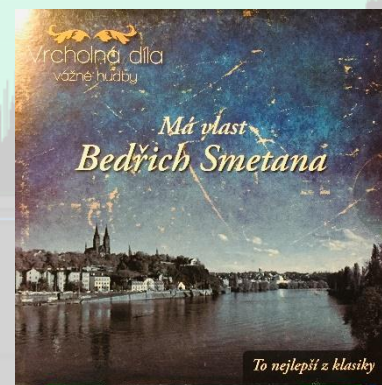
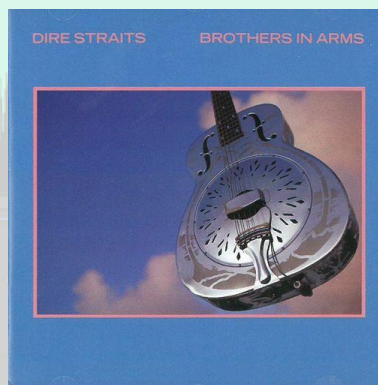
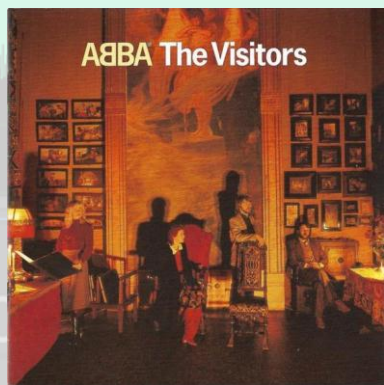
Kompaktní disk (CD)

- Tesla MC 900 (Philips CD204), první československý CD přehrávač (1985)

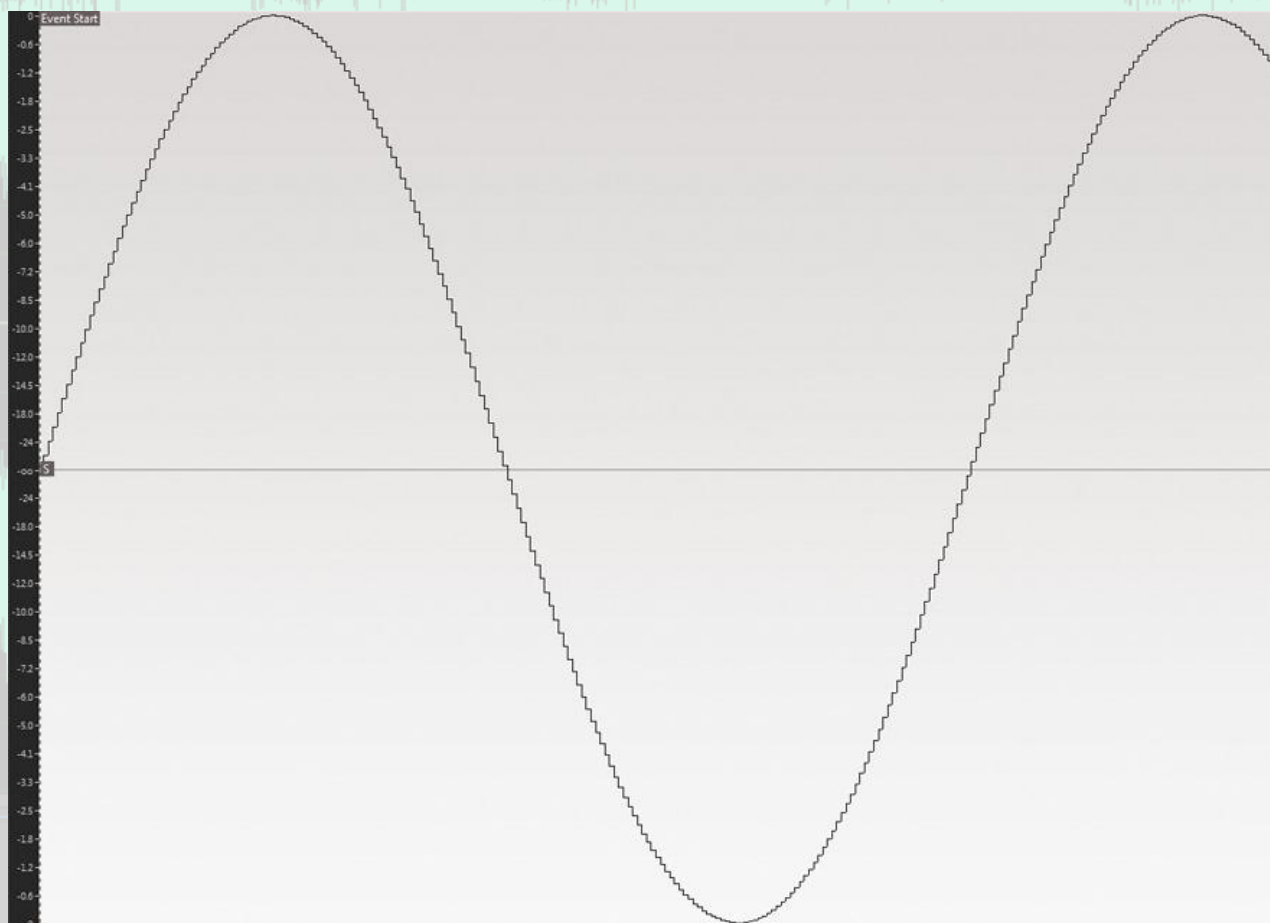


Kompaktní disk (CD)

- prvním vydaným titulem bylo album The Visitors od skupiny ABBA
- první plně digitální album bylo Brothers in Arms od Dire Straits (DDD)
- první titul lisovaný v GZ Loděnice u Berouna byl cyklus Má vlast od Bedřicha Smetany (1988)



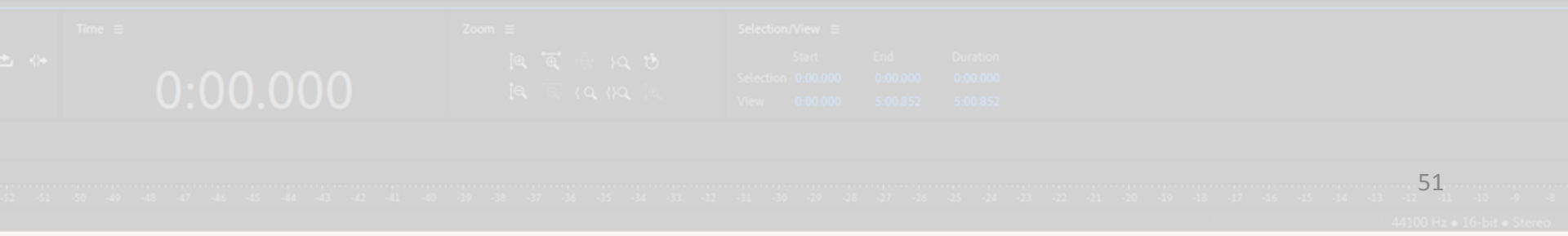
Kompaktní disk (CD)



sinusový signál o frekvenci 220 Hz v kvalitě 16 bitů, 44,1 kHz

Zdroje

- muzikus.cz
- audiozone.cz
- archiv autora



0 1:00 1:20 1:40 2:00 2:20 2:40 3:00 3:20 3:40 4:00 4:20

+0 dB

... a to je z této kapitoly vše 😊

Time 0:00.000

Zoom

Selection/View

	Start	End	Duration
Selection	0:00.000	0:00.000	0:00.000
View	0:00.000	5:00.852	5:00.852