

MULTIMEDIÁLNÍ A HYPERMEDIÁLNÍ SYSTEMY

4) Úprava nahraného zvuku

Petr Lobaz, 3. 3. 2015

MIXÁŽ

- míchání signálů záznamu jednoho nástroje
- několika mikrofony
- regulace úrovně
- frekvenční úpravy
- řízení dynamiky
- odstranění šumu
- časové korekce
- přeladování
- řízení stereoobrazu
- efektování, tvorba prostředí/dozvuku
- mix, zvýrazňování detailů
- cílem je dosáhnout srozumitelného zvuku
 - umístování zvuků do času a prostoru

MIXÁŽ

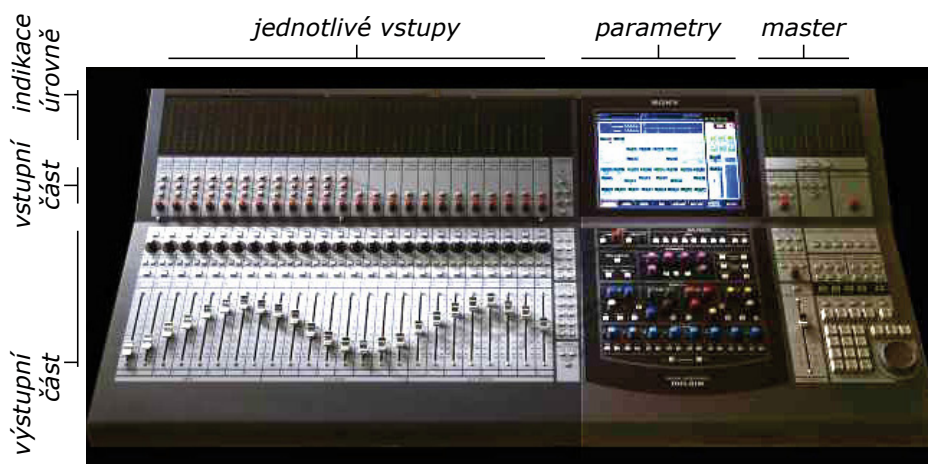
PROCESORY

- výstupem pouze zpracovaný zvuk
- ekvalizér, úprava dynamiky (kompresor, expander, ...), exciter, zkreslení, ...

EFEKTY

- výstup je kombinací
 - pozměněného zvuku (wet)
 - čistého vstupu (dry)
- zpožďovací linka (DDL), vibrato, chorus, změna ladění, změna rychlosti, dozvuk (reverb), ...
- dělení na procesory a efekty spíše tradiční než logické a systematické

MIXÁŽNÍ PULT



Malý mixážní pult DMXR100

MIXÁŽNÍ PULT

- vstupem mnoho stop – mikrofony, nástroje, nahrávky, zvuky zpracované externími zvukovými procesory, mixy některých stop, ...
- hlavním výstupem (master) několikastopý zvuk
- pomocným výstupem odposlechy

- sběrníková konstrukce – jednotlivé vstupy se míchají v několika sběrnících a odesílají do různých částí pultu
 - master sběrnice – stereofonní výstup
 - sběrnice 1, 2, ... – jednotlivé stopy výstupu
 - sběrnice aux 1, 2, ... – pro odposlechy
 - sběrnice send 1, 2, ... – pro zpracování externími zvukovými procesory

MIXÁŽNÍ PULT

VSTUPNÍ ČÁST

- konektor pro vstup z mikrofonu (in) / nástroje (line) / digitální (MIDI) / zvukových procesorů (send)
- vstupní zesilovač + indikátor překročení max. úrovně
- volitelné otočení fáze
 - přepínání fáze může zlepšit monofonní kompatibilitu
- volitelné směrování na odposlech
- volitelně insert – in/out konektor pro připojení externího zvukového procesoru

MIXÁŽNÍ PULT

KOREKČNÍ ČÁST

- mezi vstupní a výstupní částí (na fotografii není)
- interní ekvalizér (výšky/střední/basy)
 - tlačítko bypass (vypnutí ekvalizéru)
 - tlačítko pro vyloučení zvuků mimo slyšitelné frekvence

POMOCNÉ VÝSTUPY

- in/out konektor insert (inject) pro externí procesor
- aux výstup s volitelnou hlasitostí
 - všechny aux výstupy pultem smíchány do master aux (vhodné pro odposlech pro hudebníky)
 - někdy několik master aux výstupů pro různé odposlechy
- na fotografii je jejich řízení ve zvláštní části pultu

MIXÁŽNÍ PULT

VÝSTUPNÍ ČÁST

- fader – hlasitost stopy
 - pro mixáž hotové nahrávky výhodný automation (záznam a zopakování posouvání faderu)
- řízení stereofonního obrazu stopy
 - jednoduché left, right, center
 - obecné (panorama) – využívání psychoakustických poznatků o lokalizaci zdroje zvuku
- routing (assign) – určení, do které stopy se bude signál odesílat
- tlačítka mute (vypnout stopu), solo (poslech samostatné stopy)
- odposlech před faderem i po něm

MIXÁŽNÍ PULT

MASTER SEKCE

- ovlivnění signálů smíchaných z jednotlivých výstupních sekcí
- změna celkové hlasitosti, insert pro zařazení zvukových procesorů
- každá sběrnice má svou master sekci

INDIKÁTORY ÚROVNĚ / HLASITOSTI

- VU indikátor – průměrná vnímaná hlasitost
- peak (ppm) indikátor – indikace maximální úrovně

ZPRACOVÁNÍ ZVUKU

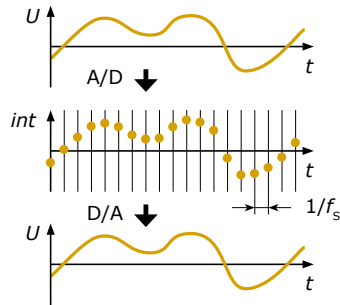
KLASICKÉ ZPRACOVÁNÍ

- výstup mikrofonu analogový (napětí)
- vstup do reproduktoru analogový (napětí)
- klasické zpracování zvuku v analogové oblasti
 - náročné na návrh, výrobu, údržbu ⇒ poměrně drahé
 - každý člen, kabel, konektor zanáší do signálu šum
 - i tak může dosáhnout vynikajících výsledků
- některé „analogové“ zvukové efekty vnitřně pracují číslicově!

ZPRACOVÁNÍ ZVUKU

ČÍSLICOVÉ ZPRACOVÁNÍ

- vstupy prochází A/D (analog → digital) převodníkem
- číslicový signál zpracován počítačově
- výsledný číslicový signál prochází D/A převodníkem
→ signál vhodný pro reproduktor
- kvalita zpracování závisí na
 - kvalitě A/D a D/A převodu – kvalitní převodníky drahé
 - kvalitě číslicového zpracování – při současném výkonu počítačů není problém zpracovat signál výrazně kvalitněji než při analogovém zpracování
- v současnosti dominuje



ZPRACOVÁNÍ ZVUKU

A/D PŘEVODNÍK

- pro správnou činnost číslicového zpracování signálu (např. zvuku) musí výstup A/D převodníku dobře reprezentovat původní signál:
- korektní reprezentace dostatečného rozsahu frekvencí
 - pro zvuk obvykle až 20 kHz (obecně f_{\min} až f_{\max})
 - dáno volbou vzorkovací frekvence f_s : $f_s > 2(f_{\max} - f_{\min})$
 - pro zvuk obvykle $f_s = 8$ kHz (telefonie), 44,1 kHz (hifi), ...
- výstup A/D převodníku je typicky celočíselný
 - zaokrouhlováním na celá čísla vzniká malý šum
 - dáno volbou počtu bitů na vzorek
 - pro zvuk obvykle 16 bitů, během zpracování float 32 bitů
- detaily později

INDIKÁTORY HLASITOSTI

DIGITÁLNÍ IMPLEMENTACE

- navzorkovaný signál $s[j]$
- VU indikátor – korektně viz norma IEC 268-17
jednoduché implementace ignorující psychoakustiku:
 - signál okamžitého výkonu: $p[j] = s[j]^2$
 - blokový indikátor: e = průměr $p[j]$ v krátkém bloku
$$e[j] = (p[j] + p[j - 1] + \dots + p[j - N + 1]) / N$$
 - nebo filtrovaný indikátor: $e[0] = p[0]$
$$e[j] = (1 - \beta) \cdot p[j] + \beta \cdot e[j - 1] \quad j > 0, \quad \beta \approx 0,998$$
 - převod $e[j]$ na hodnotu v dB: $VU = 10 \log(e[j]/e_{\max})$
- PPM (peak power meter) indikátor
 - $e[j] = \max(p[j], p[j - 1], \dots, p[j - N + 1])$
 - převod $e[j]$ na hodnotu v dB

FILTRACE SIGNÁLU

- uvedené metody jsou jednoduchými příklady filtrace signálu
- obecně vstup $x[]$, výstup $y[]$

FIR FILTR

- finite impulse response (s konečnou odezvou na impuls)
- definován operací diskrétní konvoluce (vysvětlení později)

$$y[j] = \sum_{k=0}^{K-1} b[k]x[j - k]$$

- v příkladu s hlasitostí (bloková indikace): $K = N$, $b[k] = 1/N$
- čísla $b[]$ – jádro filtru (též konvoluční jádro, kernel)
- obecnější formulace

$$y[j] = \sum_{k=-K_1}^{K_2} b[k]x[j - k]$$

FILTRACE SIGNÁLU

IIR FILTR

- infinite impulse response (s nekonečnou odezvou na impuls)
– též zván rekurzivní
- k vytvoření vzorku výstupu $y[j]$ jsou zapotřebí vzorky vstupu $x[]$ a starší vzorky výstupu $y[]$:

$$y[j] = \sum_{k=0}^{K-1} b[k]x[j - k] + \sum_{k=1}^Q a[k]y[j - k]$$

- v příkladu s hlasitostí (filtrovaná indikace):
 $K = 1, b[0] = (1 - \beta), Q = 1, a[1] = \beta$
- filtry IIR i FIR jsou lineární: pro reálná čísla ξ, η platí
 $\text{filtr}(\xi \cdot x_1[] + \eta \cdot x_2[]) = \xi \cdot \text{filtr}(x_1[]) + \eta \cdot \text{filtr}(x_2[])$
⇒ mnohem jednodušší konstrukce a analýza

FILTRACE SIGNÁLU

NELINEÁRNÍ FILTRACE

- obecný vztah
 $y[j] = \text{funkce}(x[j], x[j - 1], \dots, x[j - P + 1])$
- v příkladu s hlasitostí (PPM indikace): funkce = max, $P = N$
- často využívána pro redukci impulsního šumu
(ve zvuku redukce praskání)
pro umělé efekty (zkreslení zvuku el. kytary apod.)
- časté funkce maximum, minimum, medián

- je-li jen trochu možné, je výhodnější použít lineární filtry

FILTRACE SIGNÁLU

LINEÁRNÍ FILTRY

- víme, že spojité signál lze rozložit na součet sinových průběhů

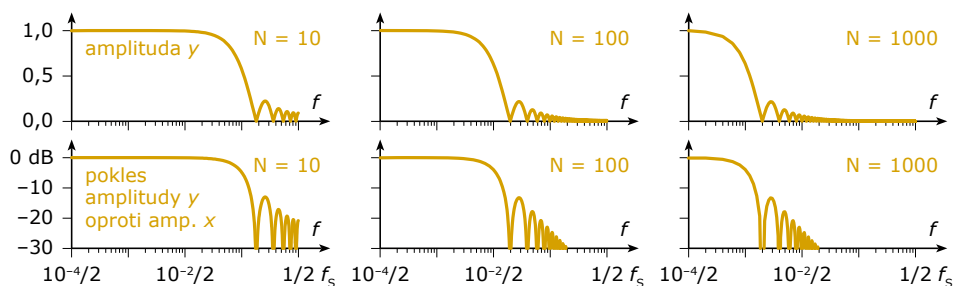
$$x(t) = \int_0^{\infty} a(f) \sin(2\pi f t + \varphi(f)) df$$

- po převodu na číslicový signál rozklad stále platí
- FIR / IIR filtrace sinového průběhu změní jen jeho amplitudu a fázi (a nezmění frekvenci)
- ⇒ k vyšetření vlastností lineárního filtru stačí znát jeho odezvu na sinový (kosinový) průběh různých frekvencí
- ⇒ vlastnosti filtru jsou určeny *frekvenční charakteristikou*
 - říká, jakou amplitudu má filtrovaný vstup frekvence f

FILTRACE SIGNÁLU

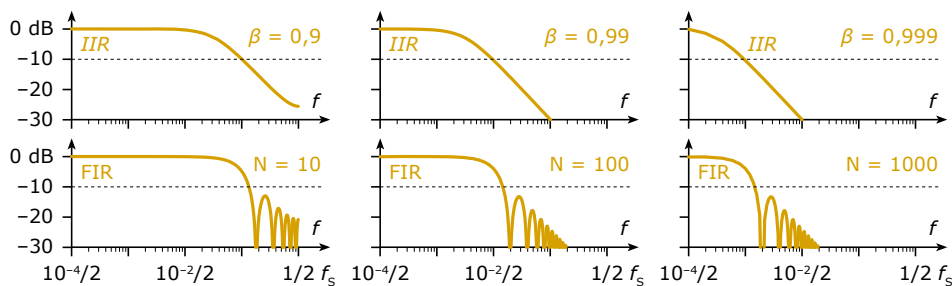
PŘÍKLAD

- pro zvuk je $f_{\max} < 20$ kHz \Rightarrow stanovíme $f_s = 40$ kHz
- vzorkovací interval $\Delta t = 1 / f_s = 0,025$ ms
- vstupní signál: $x(t) = \sin(ft)$
číslicová podoba: $x[j] = x(j \times \Delta t) = \sin(f \times j \times \Delta t)$
- číslicový filtr: $y[j] = (x[j] + x[j - 1] + \dots + x[j - N + 1]) / N$



FILTRACE SIGNÁLU

- z grafů vidíme, že pro $N = 1000$ jsou zachovány frekvence menší než 20 Hz ($= 10^{-3}/2 \times f_s$ pro $f_s = 40$ kHz), vyšší frekvence jsou potlačeny o více než 10 dB
 - kolísání hlasitosti rozpoznáváme při frekvenci < 20 Hz
 - ⇒ pro indikátor průměrné hlasitosti je $N = 1000$ vhodná volba
- podobně zjistíme, že pro IIR filtr budeme volit $\beta \approx 0,998$



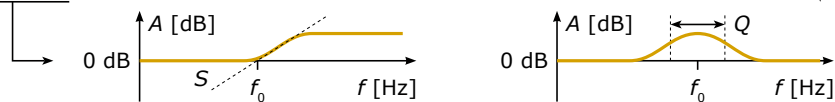
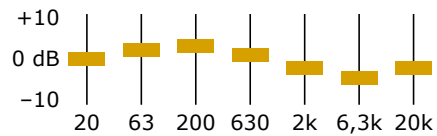
EKVALIZACE ZVUKU

- frekvenční úpravy zvuku
- technické
 - omezení frekvenčního rozsahu (např. šum je často vysokofrekvenční signál)
 - odstranění jisté frekvence (např. 100 Hz rušení z elektrické sítě)
- tvůrčí
 - projasnění zvuku nástroje (zesílení vysokých frekvencí)
 - potlačení frekvencí, kde soupeří více nástrojů (pak budou od sebe nástroje dobře rozeznatelné)
 - základem je ovšem dobré aranžmá, ekvalizace nezachrání špatný základ

EKVALIZACE ZVUKU

TYPY EKVALIZÉRŮ

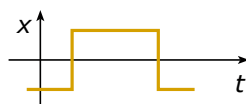
- základní v mixážním pultu – výšky/středry/basy
- grafický
 - typicky 10 až 30 jezdců
 - každé pásmo typicky změna ± 10 dB
 - nastavení jezdců připomíná graf frekvenční úpravy
 - pro obecnou tvůrčí úpravu zvuku
- parametrický – volba střední frekvence f_0 , stupně zesílení (zeslabení) A , šířky frekvenčního pásma (Q faktor)
- shelving – volba A , mezní frekvence f_0 a strmosti S



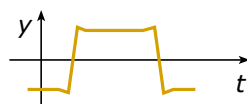
EKVALIZACE ZVUKU

DIGITÁLNÍ IMPLEMENTACE

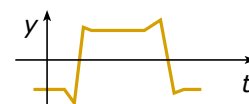
- na rozdíl od analogových ekvalizérů lze vytvořit prakticky libovolnou frekvenční charakteristiku
- pomocí FIR filtrů
 - snadný návrh, ale poměrně výpočetně náročné
 - lineární fázová charakteristika
- pomocí IIR filtrů
 - náročný návrh, ale výpočetně efektivní
 - při neopatrném návrhu nelineární fázová charakteristika



vstupní signál



lineární fázová ch.



nelineární fázová ch.

EKVALIZACE ZVUKU

MATEMATICKÁ VSUVKA

- převedení spojité Fourierovy transformace do praktičtější (komplexní) podoby
- operace konvoluce funkcí
- diskrétní Fourierova transformace
- diskrétní konvoluce \Leftrightarrow FIR filtr
- \Rightarrow možná implementace ekvalizace (frekvenční úpravy) zvuku

- nebudeme precizně matematicky odvozovat, půjde jen o princip

FOURIEROVA TRANSFORMACE

ZÁKLADNÍ MYŠLENKA

- spojitý signál $x(t)$ můžeme rozložit na (ko)sinové průběhy:

$$x(t) = \int_0^{\infty} a_s(f) \sin(2\pi ft) + a_c(f) \cos(2\pi ft) df$$

$$a_s(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin(2\pi ft) dt$$

$$a_c(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(2\pi ft) dt$$

- nesymetrie vztahů (rozdílné meze, odlišný tvar) nepříjemná

FOURIEROVA TRANSFORMACE

- Eulerova identita: $e^{iz} = \cos(z) + i \sin(z)$ $i^2 = -1$

$$\Rightarrow \cos(z) = (e^{iz} + e^{-iz}) / 2$$

$$\sin(z) = (e^{iz} - e^{-iz}) / (2i)$$

$$\begin{aligned} x(t) &= \int_0^{\infty} a_s(f) \frac{e^{i2\pi ft} - e^{-i2\pi ft}}{2i} + a_c(f) \frac{e^{i2\pi ft} + e^{-i2\pi ft}}{2} df \\ &= \int_0^{\infty} \frac{a_c(f) - i a_s(f)}{2} e^{i2\pi ft} df + \int_0^{\infty} \frac{a_c(f) + i a_s(f)}{2} e^{-i2\pi ft} df \\ &= \int_0^{\infty} \frac{a_c(f) - i a_s(f)}{2} e^{i2\pi ft} df + \int_{-\infty}^0 \frac{a_c(f) - i a_s(f)}{2} e^{i2\pi ft} df \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{a_c(f) - i a_s(f)}{2} e^{i2\pi ft} df = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df \end{aligned}$$

FOURIEROVA TRANSFORMACE

- obdobně odvodíme: srovnej s:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df$$

(*dopředná Fourierova transformace*) (*zpětná Fourierova t.*)

- je jen věcí dohody, který vztah nazveme dopředný

- píšeme

$$X(f) = \text{FT}\{ x(t) \}$$

$$x(t) = \text{IFT}\{ X(f) \}$$

- komplexní Fourierova transformace uvažuje kladné i záporné frekvence
- amplitudové spektrum signálu $x(t)$: $|X(f)|$
fázové spektrum signálu $x(t)$: $\arg(X(f))$
- pro reálné signály je spektrum „symetrické“ kolem 0

KONVOLUCE

SPOJITÝ PŘÍPAD

- operace \otimes nad funkcemi $x(t)$, $b(t)$:

$$x(t) \otimes b(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) b(t - \tau) d\tau$$

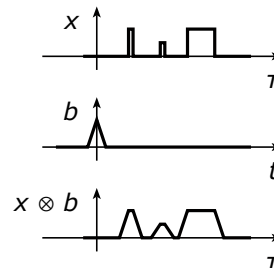
- součet kopií funkce $b(t)$ posunutých o τ a vynásobených $x(\tau)$
- konvoluce je komutativní a lineární:

$$x(t) \otimes b(t) = b(t) \otimes x(t)$$

$$x(t) \otimes [a b_1(t) + \beta b_2(t)] = a[x(t) \otimes b_1(t)] + \beta[x(t) \otimes b_2(t)]$$

- dále platí:

$$FT\{ x(t) \otimes b(t) \} = FT\{ x(t) \} \times FT\{ b(t) \}$$



KONVOLUCE

- potřebujeme-li frekvenčně upravit signál $x(t)$:
 - převedeme do frekvenční oblasti
 - vynásobíme spektrum vhodnou funkcí $B(f)$
 - převedeme zpět do časové oblasti na signál $y(t)$

$$y(t) = IFT \{ FT\{x(t)\} \times B(f) \}$$

- je-li $B(f) = FT\{b(t)\}$, pak
 $y(t) = x(t) \otimes b(t)$

DFT

DISKRÉTNÍ FOURIEROVA TRANSFORMACE

- signál $x(t)$ budeme uvažovat v intervalu $[-T/2, T/2)$
reprezentace N vzorky \Rightarrow perioda vzorkování $\Delta t = T / N$
vzorkovací frekvence $f_s = 1 / \Delta t$

spojitý čas $t \Rightarrow$ diskrétní časové okamžiky $t_j = j \Delta t$

index $j \in \{-N/2, -N/2 + 1, \dots, +N/2 - 1\}$

- pokusíme se jej nahradit součtem průběhů

$\cos(2\pi \frac{0}{T}t), \cos(2\pi \frac{1}{T}t), \sin(2\pi \frac{1}{T}t), \cos(2\pi \frac{2}{T}t), \sin(2\pi \frac{2}{T}t), \dots$

resp. $\exp(i 2\pi \frac{k}{T}t)$

\Rightarrow diskrétní frekvence $f_k = k / T, \Delta f = 1 / T = f_s / N$

index $k \in \{-N/2, -N/2 + 1, \dots, +N/2 - 1\}$

DFT

- spojitá Fourierova transformace

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi f t} df$$

- náhrada integrálu za sumy, diferenciálů za derivace

$$x(j\Delta t) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} X(k\Delta f) \exp\left(i2\pi j \frac{T}{N} k \frac{1}{T}\right) \frac{1}{T}$$

$$\Rightarrow x[j] = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} X[k] \exp\left(i2\pi \frac{jk}{N}\right) \frac{1}{T}$$

$$X[k] = \sum_{j=-N/2}^{N/2-1} x[j] \exp\left(-i2\pi \frac{jk}{N}\right) \frac{T}{N}$$

DFT

- obvykle se člen $1/T$ z $x[j]$ „schová“ do $X[k]$
obvykle se indexy chápou (mod N): index $(-1) \Leftrightarrow (N - 1)$
- zpětná a dopředná diskretní Fourierova transformace:

$$x[j] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \exp\left(i2\pi \frac{jk}{N}\right) \quad \text{IDFT}\{ X[] \}$$

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x[j] \exp\left(-i2\pi \frac{jk}{N}\right) \quad \text{DFT}\{ x[] \}$$

$$\text{index } k \Leftrightarrow \text{frekvence } f_k = \begin{cases} k/T & 0 \leq k \leq N/2 - 1 \\ (k-N)/T & N/2 \leq k \leq N - 1 \end{cases}$$

$$\text{index } j \Leftrightarrow \text{čas } t_j = j\Delta t = j / f_s = j T / N$$

– absolutní pozice v čase ($t_0 = 0$) je obvykle nepodstatná

DFT

- diskretní FT má podobné vlastnosti jako spojitá FT
- zejména platí $x[] = \text{IDFT}\{ \text{DFT}\{ x[] \} \}$
- výpočet $X[k]$ vyžaduje N operací
⇒ výpočet všech $X[k]$ vyžaduje N^2 operací
- existuje efektivní algoritmus, jak počítat všechny $X[k]$ naráz
 - rychlá Fourierova transformace (fast FT, FFT)
 - vyžaduje $N \log N$ operací
 - nejjednodušší algoritmy FFT (radix 2 Cooley-Tukey) vyžadují $N = 2^w$, ale existují i algoritmy pro obecná N

DISKRÉTNÍ KONVOLUCE

- spojité případ:

$$y(t) = x(t) \otimes b(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau) b(\tau) d\tau$$

- diskretizace: délka konvolučního jádra B vzorků

$$y[j] = \sum_{k=0}^{K-1} x[j - k] b[k]$$

- diferenciál $d\tau$ jsme „schovali“ do definice $b[k]$
- signál $x[]$ jen N vzorků $\Rightarrow (j - k)$ se chápe jako (mod N)
- k eliminaci cyklického chování indexu se na konec signálu $x[]$ často připojí $(K - 1)$ nulových vzorků

- *diskrétní konvoluce popisuje činnost FIR filtru*

DISKRÉTNÍ KONVOLUCE

- podobně jako ve spojitém případě platí (operace \times je násobení vektorů složku po složce)

$$\text{DFT}\{ y[] \} = \text{DFT}\{ x[] \} \times \text{DFT}\{ b[] \}$$

- čili FIR filtr $b[]$ je dán jako $b[] = \text{IDFT}\{ B[] \}$
kde $B[] = \text{DFT}\{ b[] \}$ popisuje frekvenční odezvu filtru $b[]$
jeho frekvenční rozlišení je dáno Δf v $\text{IDFT}\{ B[] \}$
- v praxi je postup mírně odlišný, ale myšlenka je stejná
- filtr $b[] = [b_0, b_1, \dots, b_{K-1}]$ je ekvivalentní filtru
 $b'[] = [b_0, b_1, \dots, b_{K-1}, 0, 0, \dots, 0]$ (K' koeficientů)
 \Rightarrow frekvenční charakteristika $\text{DFT}\{ b'[] \}$ je ekvivalentní,
ale má jemnější rozlišení $\Delta f = f_s / K'$
 \Rightarrow doplnění filtru nulami se hodí pro jeho analýzu chování

DISKRÉTNÍ KONVOLUCE

PŘÍKLAD

- $f_s = 40$ kHz
- chceme filtr délky $K = 8$ (např. kvůli rychlosti výpočtu)
 \Rightarrow pro DFT $\{ b[] \}$ platí $\Delta f = f_s / K = 5$ kHz
 (frekvenční rozlišení filtru)

- chceme utlumit frekvence $f > 5$ kHz
 $\Rightarrow B[] = \{ 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1 \}$

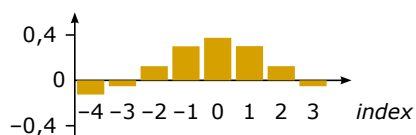
index 0 1 2 3 -4 -3 -2 -1
 frekvence [Hz] 0 5k 10k 15k -20k -15k -10k -5k

$$\Rightarrow b[] = \text{IDFT}\{ B[] \} = [3,75; 3,02; 1,25; -0,52; -1,25; -0,52; 1,25; 3,02]/10$$

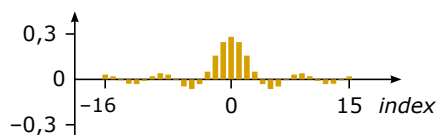
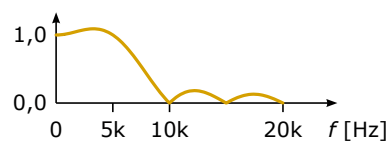
index 0 1 2 3 -4 -3 -2 -1

$$y[j] = \sum_{k=-4}^3 x[j-k] b[k]$$

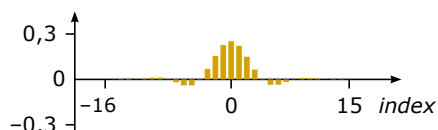
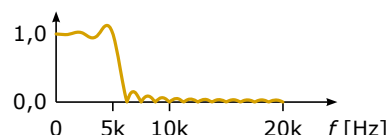
DISKRÉTNÍ KONVOLUCE



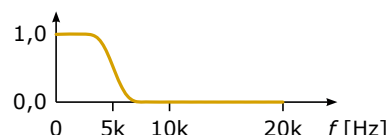
lowpass filtr, $f_s = 40$ kHz, $f_{\text{CUT}} = 5$ kHz, $K = 8$



lowpass filtr, $f_s = 40$ kHz, $f_{\text{CUT}} = 5$ kHz, $K = 32$



lowpass filtr, $f_s = 40$ kHz, $f_{\text{CUT}} = 5$ kHz, $K = 32$, *pečlivý návrh*



EKVALIZACE ZVUKU

PARAMETRICKÝ EKVALIZÉR

- uživatelská volba střední frekvence, šířky pásma
- odvození koeficientů FIR filtru $b[]$
- aplikace filtru $\beta \times b[]$, reálné číslo β je stupeň zesílení

GRAFICKÝ EKVALIZÉR

- návrh filtrů $b_1[], b_2[], \dots, b_N[]$ (pro každý jezdec ekvalizéru)
- uživatelská volba zesílení $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$
- výpočet filtru $b[] = \beta_1 \times b_1[] + \beta_2 \times b_2[] + \dots + \beta_N \times b_N[]$
- aplikace filtru $b[]$

EXCITER

- též enhancer
- změna úrovně harmonických frekvencí, přidávání nových harmonických frekvencí
- projasnění zvuku i z méně kvalitních nástrojů
- zesílení zvuku

- nelineární filtr
- ořez vstupního zvuku na volitelnou úroveň
⇒ vznik harmonických frekvencí, jejich frekvenční úprava
⇒ upravený, tzv. „wet“ signál
- volitelný poměr smíchání s původním (tzv. „dry“) signálem

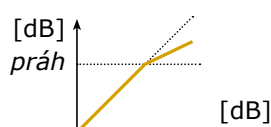
DYNAMICKÉ PROCESORY

DYNAMIKA ZVUKU

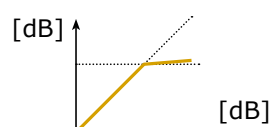
- rozdíl mezi tichými a hlasitými pasážemi (tj. ne mezi technicky dosažitelnou maximální a minimální úrovní – ta je daná reprezentací signálu)
- vážná hudba až 20 dB (i více)
taneční hudba i jen 3 dB
- velký dynamický rozsah vyžaduje poslech v tichém prostředí
- malý dynamický rozsah při delším poslechu únavný
- studiová (výrobní) úprava dynamiky
 - tvorba „uměleckého dojmu“
- úprava dynamiky v přehrávači
 - úprava zvuku pro netypické poslechové prostředí (tichý poslech filmového zvuku, poslech hudby v autě, ...)

DYNAMICKÉ PROCESORY

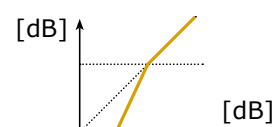
- obecně charakterizovány přenosovou křivkou vstupní úroveň („hlasitost“) → výstupní úroveň
- tradiční speciální případy:
 - kompresor: ztišení zvuku nad prahovou úrovní
parametry: prahová úroveň, poměr komprese
např. poměr 2:1 : 2 dB na vstupu → 1 dB na výstupu
 - limiter: kompresor, poměr komprese > 10:1
 - expander: ztišení zvuku pod prahovou úrovní
 - gate (gejt): expander, poměr expanze > 1:10



komprese 2:1



komprese 1:20 (limiter)

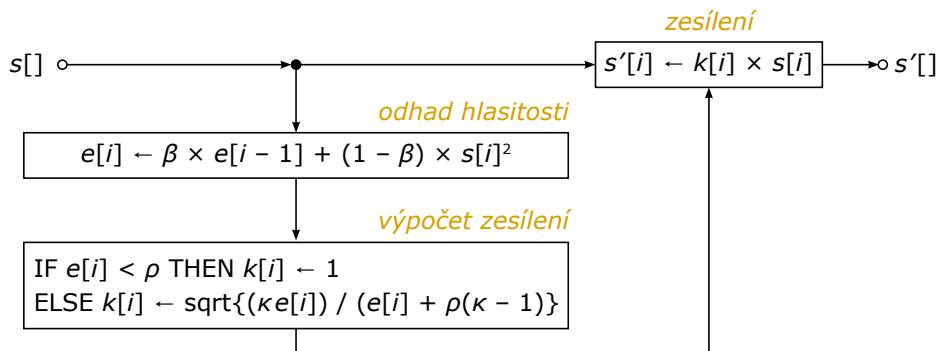


expander 1:2

DYNAMICKÉ PROCESORY

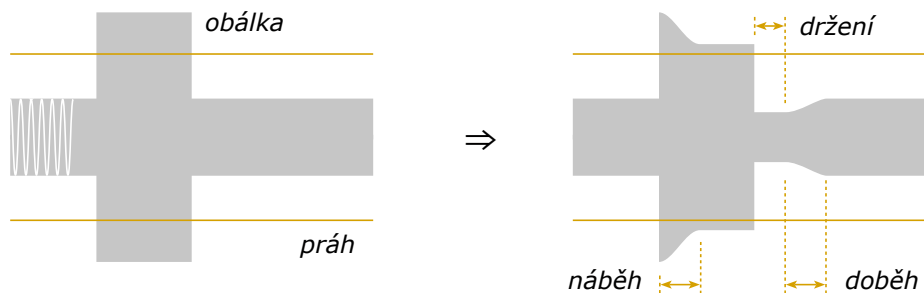
BLOKOVÉ SCHÉMA KOMPRESORU

- vstup: $s[]$ výstup: $s'[]$
- odhad hlasitosti: $\beta \doteq 0,99$, $e[0] = 0$
- výpočet zesílení: $\kappa \sim$ stupeň komprese, $\rho \sim$ práh



DYNAMICKÉ PROCESORY

- detekce hlasitosti není okamžitá \Rightarrow ztišování začne až po jisté době (náběh, attack), analogicky doběh (release)
- často se přidává parametr držení (hold) – chvíli po skončení hlasité pasáže nemění kompresor své chování
- volba časů náběhu, doběhu, držení významně ovlivňuje charakter zvuku; typicky desítky až stovky milisekund



DYNAMICKÉ PROCESORY

ZÁKLADNÍ POUŽITÍ KOMPRESORU

- výstup z mikrofону typicky příliš velká dynamika (explozivní hlásky, úhozy do strun, ...) – jsou-li špičkové úrovně korektně zaznamenány, jsou „normální“ úrovně poměrně tiché \Rightarrow malý poměr signál / šum
- ztišení hlasitých pasáží kompresorem \Rightarrow signál lze zesílit, aniž by došlo k přebuzení v hlasitých částech

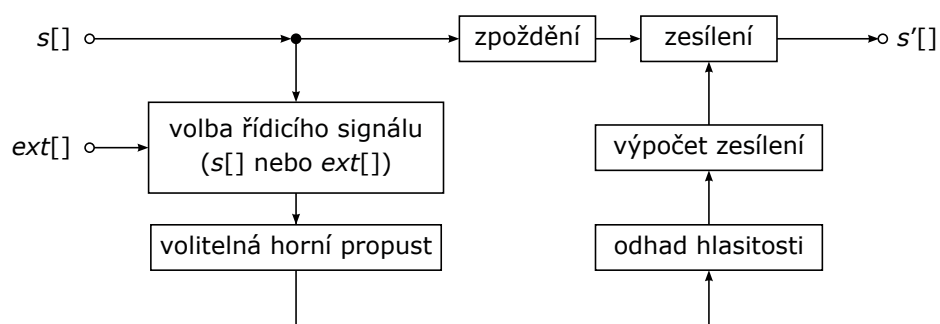
ZÁKLADNÍ POUŽITÍ LIMITERU

- zařazením limiteru před výstup zajistíme, že se do výstupu nedostanou vyšší než prahové úrovně
- ke korektní činnosti musí kompresor vědět, jak hlasitý bude signál „za chvíli“

DYNAMICKÉ PROCESORY

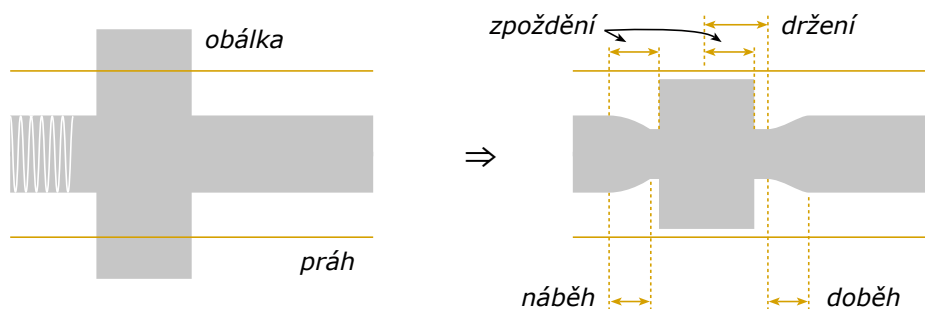
ROZŠÍŘENÉ SCHÉMA KOMPRESORU

- bloky zpoždění, horní propust, přepínač mezi signály $s[]$ a $ext[]$ mohou a nemusí být zařazeny



DYNAMICKÉ PROCESORY

- zpoždění signálu (např. posuvným registrem, viz DDL) kompresor může začít ztišovat dlouho před příchodem hlasité pasáže – pocitově je „náraz“ zvýšené hlasitosti pořád stejný
⇒ kompresor s nulovou (zápornou) dobou reakce



DYNAMICKÉ PROCESORY

- zařazení horní propusti
odhad hlasitosti se dělá pouze podle výskytu vysokých frekvencí
⇒ užití pro ztišení sykavek (de-esser)
- řízení hlasitosti externím signálem (`ext[]`)
např. pro automatický mix: signál `s[]` hudba, signál `ext[]` komentář ⇒ jakmile komentátor začne mluvit, hudba se automaticky ztiší (tzv. ducking, keying)

DYNAMICKÉ PROCESORY

ZÁKLADNÍ POUŽITÍ EXPANDERU

- při nahrávce jsou často sejmuty i nežádoucí ruchy (hluk z publika, ozvěna, ...) – expanzí se mohou v nepřítomnosti hlavního (hlasitého) zvuku ztišit
- zvýšení dynamického rozsahu nevýrazného nástroje

ZÁKLADNÍ POUŽITÍ GEJTU

- jednoduché odstranění šumu v tichých pasážích
- parametry expanderu/gejtu prakticky stejné jako u kompresoru/limiteru – práh, poměr expanze, čas náběhu, doběhu, držení

DIGITAL DELAY LINE (DDL)

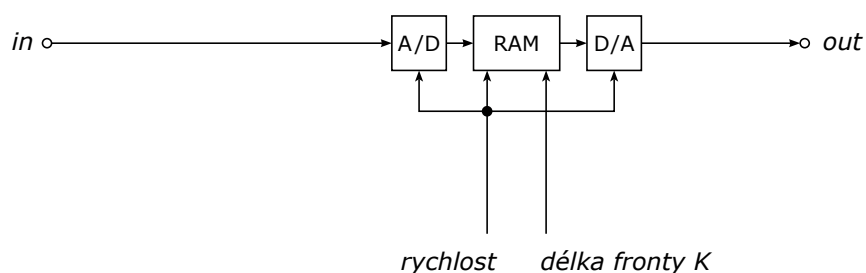
- zpoždění signálu o několik vzorků až několik set tisíc vzorků
- základní digitální implementace triviální: posuvný registr
 - délka posuvného registru K vzorků \Rightarrow zpoždění $K \times f_s$
 - inicializace registru nulami
 - činnost (v praxi řešeno kruhovou frontou!):

```
out = registr[K - 1];
for (i = K - 1; i > 0; i--)
    registr[i] = registr[i - 1];
registr[0] = in;
```
- „analogová“ implementace:
signál \rightarrow A/D \rightarrow digitální posuvný registr \rightarrow D/A \rightarrow signál
- ovládním A/D a D/A převodníků lze docílit mnoha efektů
 \Rightarrow v digitální implementaci je užitečné je simulovat

DIGITAL DELAY LINE (DDL)

NASTAVENÍ ZPOŽDĚNÍ SIGNÁLU

- hrubé nastavení: délka fronty K
 - umožňují skokově měnit zpoždění s krokem $1 / f_s$
 - jemné nastavení: vzorkovací frekvence
 - definuje, jak rychle se má zaplnit K vzorků v paměti RAM
- ⇒ spojitě nastavení zpoždění



DIGITAL DELAY LINE (DDL)

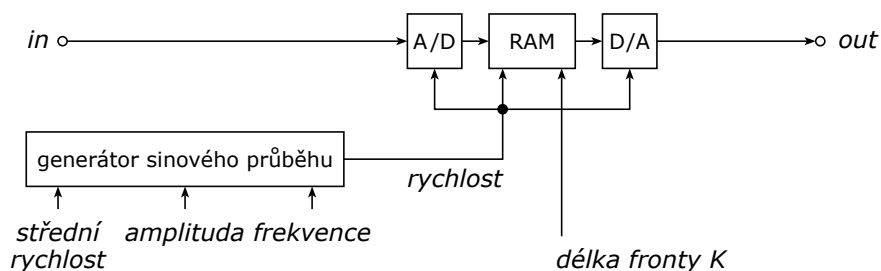
DIGITÁLNÍ SIMULACE A/D, D/A PŘEVODNÍKU

- skutečný A/D převodník
 - vstup: spojitý signál
 - výstup: vzorky v diskrétních časech s krokem $1 / f_s$
- simulace A/D převodníku
 - vstup: vzorky v diskrétních časech s krokem $1 / f_{s\text{IN}}$
 - interpolace mezi vzorky (např. lineární, ale lze lépe)
 - výstup: vzorky v diskrétních časech s krokem $1 / f_{s\text{OUT}}$
 - kvalita výstupu závisí na kvalitě interpolace mezi vzorky
 - interpolace se řeší konvolucí, podrobnosti později
- simulace D/A převodníku identická

DIGITAL DELAY LINE (DDL)

VIBRATO

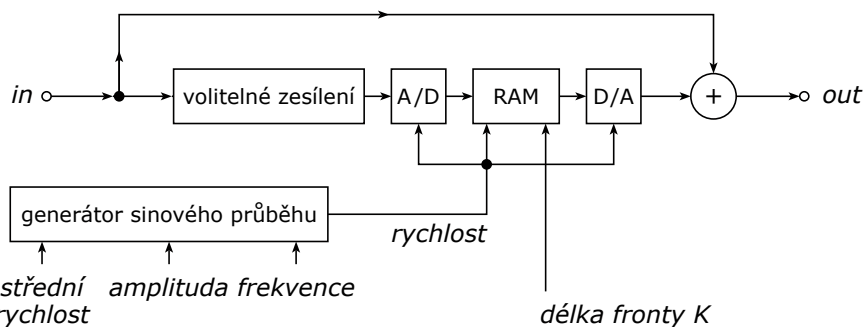
- vstup čistý tón → výstup tón s mírně proměnlivou frekvencí
- pevně nastavená délka registru K
- proměnlivá rychlost A/D a D/A převodníku
 - sinové kolísání kolem střední rychlosti



DIGITAL DELAY LINE (DDL)

CHORUS

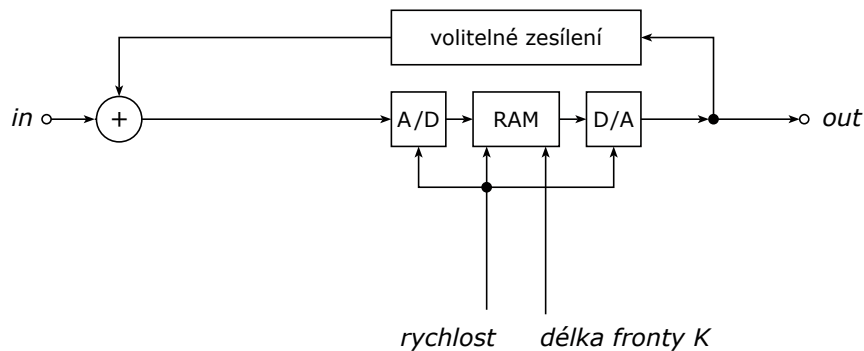
- vstup čistý zvuk → výstup souzvuk s časově posunutým vibratem
- počet větví s DDL (vibrato) volitelný
- volitelný poměr smíšení dry / wet zvuků



DIGITAL DELAY LINE (DDL)

ECHO

- výstupem zvuk s „ozvěnou“
- ozvěnu lze dále modifikovat – zařazení ekvalizéru za volitelné zesílení (např. útlum vysokých frekvencí) atd.



DIGITAL DELAY LINE (DDL)

ZMĚNA LADĚNÍ (PITCH SHIFT)

- vstup tón → výstup vyšší (hlubší) tón téhož trvání
- např. pro opravu intonace, přidání dalšího hlasu
- základní princip: pokud má D/A (výstupní) převodník vyšší rychlost než A/D (vstupní), je výstupní zvuk vyšší a kratší
- zachování doby trvání zvuku při rychlejším přehrávání:
 - rozdělení vstupu na krátké úseky (několik desítek ms)
 - po odeslání úseku na výstup vyšší rychlostí se jeho vzorky opakují tak dlouho, aby se doba trvání nezměnila
 - je třeba zajistit, aby na hranicích úseků nevznikaly nespojitosti v signálu – např. rozdělením signálu v místech průchodu nulou
- pomalejší přehrávání – nepotřebné vzorky se zahazují

DIGITAL DELAY LINE (DDL)

ZMĚNA DOBY TRVÁNÍ (STRETCH)

- vstup tón → výstup delší (kratší) tón téže výšky
- pro časové korekce (např. nástupy zpěvu)
- princip stejný jako změna ladění (pitch shift)
- zpomalení (zrychlení) na požadovanou délku změnou vzorkovací frekvence
 - ⇒ zvuk požadované délky, ale nesprávné výšky
 - ⇒ oprava výšky pomocí změny ladění

TVORBA PROSTŘEDÍ

- na nahrávce máme často jen čistý zvuk nástroje
 - lepší práce s ekvalizací, dynamikou, ...
 - bez dozvuků prostředí zní nepřirozeně
 - ⇒ „reálný zvuk“ vytvořen uměle
- použití DDL + zpětné vazby ⇒ odrazy pravidelné
 - ⇒ nepřirozený rezonující zvuk

RE-AMPING

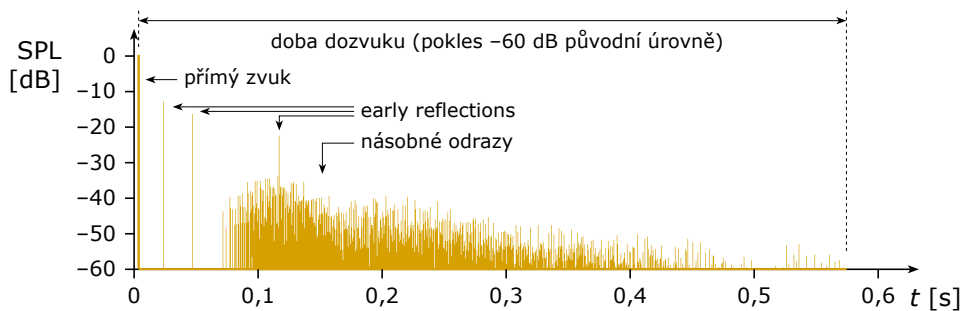
- nahrávka připraveného mixu ve správném prostředí

REVERB

- umělé dotvoření prostředí
- zesílení zvuku
- další volnost – ekvalizace/efektování dozvuku

REVERB

- simulace odrazu zvuku od stěn
 - „early reflections“
 - typicky 3 (levá, pravá, zadní stěna)
nebo 6 (levá, pravá, přední, zadní stěna, podlaha, strop)
- vícenásobné odrazy – cca 3000 odrazů za vteřinu, odrazy frekvenčně, stereofonně a dynamicky upravené



REVERB

PARAMETRY

- zpoždění prvních odrazů
- relativní útlumy prvních odrazů
- celková úroveň prvních odrazů
- algoritmus tvorby násobných odrazů („tvar obálky“)
- celková doba dozvuku – pokles o 60 dB oproti úrovni původního zvuku

- poměr přímého zvuku a celkového dozvuku

- často k dispozici přednastavení (room, ambience, ...)

REVERB

DIGITÁLNÍ IMPLEMENTACE

- počáteční odrazy (early reflections):
 $s'[i] = s[i] + a_0 s[i - k_0] + a_1 s[i - k_1] + a_2 s[i - k_2] + \dots$
 - koeficienty a_n, k_n : útlumy a zpoždění jednotlivých odrazů
 - nalezení parametrů přirozeného dozvuku komplikované
- dozvuk (tail)
 - filtr s netriviální all-pass frekvenční charakteristikou
 - každá frekvence by měla mít jiný časový útlum
 - často implementován pomocí IIR filtru

UMĚLÉ EFEKTY

- tvorba nepřirozeného, umělého zvuku
zásadní pro elektrické kytary, elektronickou hudbu
- často založeny na běžných zvukových procesorech s extrémně nastavenými parametry, propojení procesorů zpětnými vazbami, umělém přebuzení, nelineárním zkreslení, ...
- neexistují pravidla ani limity – důležitý je jen výsledný zvuk