

# ČÍSLICOVÉ ZPRACOVÁNÍ ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ Z HLEDISKA PSYCHOAKUSTIKY

František Kadlec

ČVUT, fakulta elektrotechnická, katedra radioelektroniky,  
Technická 2, 166 27 Praha 6

## 1 Úvod

Při číslicovém zpracování zvukových signálů (*DSP*), zvláště pak v oblasti nízkých úrovní signálů se projevují vedlejší účinky *DSP*, které způsobují jejich zkreslení. Číslicovým generováním a záznamem signálů obdržíme signály včetně zkreslujících složek vzniklých v průběhu zpracování. Použijeme-li takovéto signály, např. pro testování elektroakustických soustav, může dojít ke zkreslení výsledků poslechových testů. Působení zdroje signálu, který již sám o sobě obsahuje chybový signál a vliv vlastní odezvy soustavy se projeví společně, bez možnosti rozlišení jednotlivých komponent. V příspěvku je uveden příklad úpravy signálů pro poslechové testy, který snižuje nepříznivý vliv *DSP* zvukových signálů z psychoakustického hlediska. Úprava signálu spočívá ve změně rozložení energie šumu v kmitočtové oblasti  $20 \text{ Hz} \div 20 \text{ kHz}$ . Při modelování *DSP* zvukových signálů a jejich analýze používáme programové vybavení *MATLAB*.

## 2 Číslicové zpracování zvukových signálů nízké úrovně

Při kvantování harmonických signálů nízké úrovně, kdy předpokládáme úroveň signálu o velikosti řádově několika jednotek nebo desítek kvantovacích úrovní A/D převodníku, vyjdeme při kmitočtové analýze kvantovaného signálu z průběhu kvantizační chyby. Signál na výstupu kvantizačního procesu můžeme napsat ve tvaru

$$x_q(t) = Q\{x(t)\} = x(t) + e\{x(t)\}, \quad (1)$$

kde  $Q\{\cdot\}$  je operátor pro vyjádření kvantizačního procesu a  $x(t)$  je vstupní kvantovaný signál. Průběh kvantizační chyby  $e\{x(t)\}$  lze vyjádřit pomocí tzv. pilové funkce  $S\{x(t)\}$ . Jedná se o periodickou funkci s periodou rovnou kvantizačnímu kroku  $q$  a s maximální úrovní  $\pm q/2$  [1]. Použitím vztahů platných pro Fourierovy řady lze odvodit analytický výraz pro analýzu funkce  $S\{x(t)\}$

$$S(x) = \frac{q}{\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{2\pi n x}{q}. \quad (2)$$

Kvantovaný signál  $x_q(t)$  vyjádřený rovnicí (1) pak bude mít tvar

$$x_q(t) = x(t) + S\{x(t)\},$$
$$x_q(t) = x(t) + \frac{q}{\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{2\pi n x(t)}{q}. \quad (3)$$

Dále vezmeme v úvahu signál  $x_1(t)$ , který vstupuje do kvantizačního procesu a obsahuje pouze jednu harmonickou složku  $A \sin(\omega_1 t)$ , kde  $A$  je amplituda.

Dosazením signálu  $x_1(t)$  do rovnice (3) obdržíme výraz pro kvantovaný signál

$$x_{1q}(t) = A \sin(\omega_1 t) + \frac{q}{\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{2\pi n A \sin(\omega_1 t)}{q}. \quad (4)$$

Kvantovaný signál  $x_{1q}(t)$  obsahuje jednak původní harmonickou složku vstupního signálu  $A \sin(\omega_1 t)$  a další nové kmitočtové komponenty. Rovnici (4) lze upravit pomocí Besselových funkcí na výsledný tvar

$$x_{1q}(t) = A \sin(\omega_1 t) + \frac{2q}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sum_{m=1}^{\infty} J_m \left( \frac{2\pi n A}{q} \right) \sin(m \omega_1 t), \quad \text{pro } m \text{ liché} \quad (5)$$

kde  $J_m(\cdot)$  je Besselova funkce prvního druhu a řádu  $m$ . Signál vyjádřený rovnicí (5), obsahuje základní harmonickou složku  $A \sin(\omega_1 t)$  a liché chybové harmonické složky, které vznikly v průběhu kvantování.

Dosud jsme hovořili pouze o kvantování signálu. Vlivem diskretizace kvantovaného signálu  $x_{1q}(t)$  dochází k aliasingu. Kvantovaný a diskretizovaný signál lze v časové oblasti napsat ve tvaru

$$x_{1d}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_{1q}(t) \delta(t - n \Delta t), \quad (6)$$

kde  $\Delta t$  je vzorkovací krok. Ve spektrální oblasti pak platí

$$X_{1d}(\omega) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_{1q} \left( \omega - k \frac{2\pi}{\Delta t} \right), \quad (7)$$

kde  $X_{1q}(\omega)$  je Fourierův obraz  $x_{1q}(t)$ . Diskretizovaný a kvantovaný signál nízké úrovně bude obsahovat základní harmonickou složku, liché chybové harmonické složky a diskrétní zkreslující komponenty, které vzniknou vlivem aliasingu.

Při modelování signálů jsme vycházeli z předpokladu, že jako zdroj signálů bude použit CD. Z toho vyplývá použitý vzorkovací kmitočet  $f_v = 44100 \text{ Hz}$ . Při uvažování rozsahu amplitudy signálu  $\pm 1V$  a použití 16-bitového A/D převodníku, obdržíme velikost kvantizačního kroku  $q = 2/2^{16} V$ . Úroveň signálu  $1V$  koresponduje s hladinou  $0dB$ .

Signály nízké úrovně jsme navrhovali tak, aby je bylo možné použít jak pro testování elektroakustických soustav měřením, tak i pro poslechové testy. Vzhledem k tomu, že se jedná o signály nízké úrovně, zaměřili jsme se na kmitočty z oblasti  $f = 1 \div 4 \text{ kHz}$ , tedy na pásmo maximální citlivosti lidského ucha. Z hlediska analýzy signálů byl kmitočet generovaných signálů stanoven tak, aby počet vzorků jedné periody byl celistvé číslo.

### 3 Tvarování šumových spekter signálů

Vnímání zkreslujících komponent signálu lze omezit několika způsoby [2,3,4]. Jeden z možných způsobů spočívá v možnosti přesunout zkreslující složky signálu z oblastí středních kmitočtů jak do oblastí nízkých tak i vysokých kmitočtů, tedy do oblastí s nižší citlivostí sluchu. Blokové schéma obvodu pro tvarování šumu je na obr. 1. Pro tvarování šumu se zde používá psychoakustických filtrů, při jejichž návrhu se vychází z křivek konstantních hladin hlasitosti [5]. Vygenerované křivky konstantních hladin hlasitosti jsou znázorněny na obr. 2.

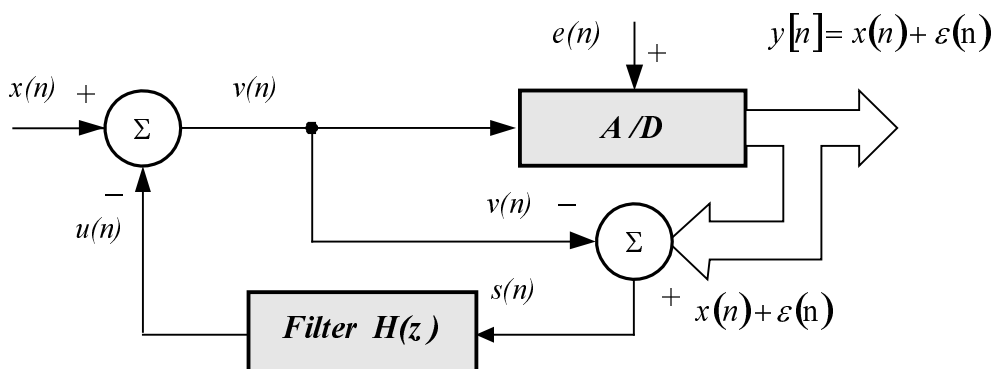


Fig. 1. Blokové schéma číslicového zpracování signálu při použití psychoakustických filtrů.

Číslicové zpracování signálu pomocí soustavy znázorněné na obr. 1 lze odvodit rozбором v  $Z$  oblasti. Pro signál na výstupu soustavy lze napsat

$$Y(z) = V(z) + E(z). \quad (8)$$

kde  $E(z)$  je chybový signál. Při zpracování lze též použít i dither. Dalším řešením přenosu soustavy obdržíme pro celkový chybový signál na jejím výstupu

$$\varepsilon(z) = [1 - H(z)]E(z). \quad (9)$$

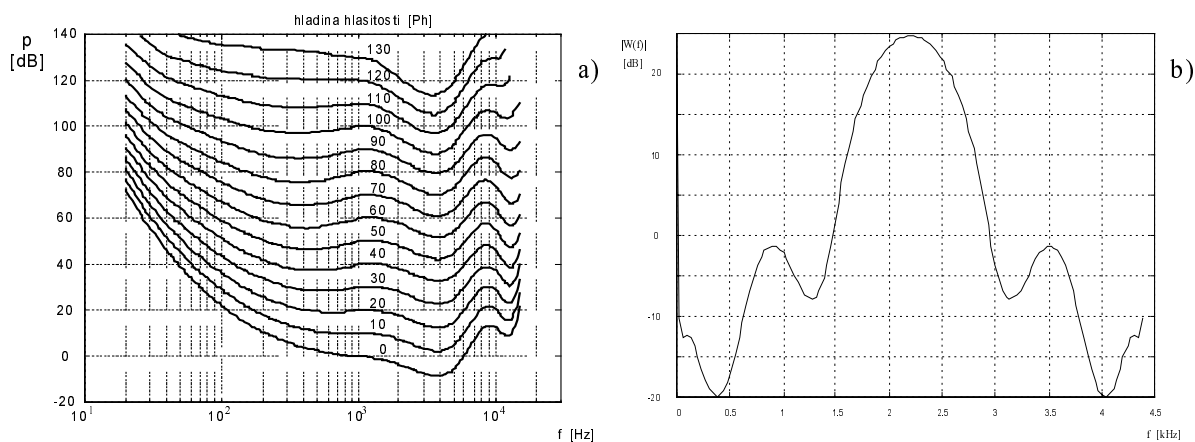
kde  $H(z)$  je přenosová funkce psychoakustického filtru. Konečný výraz pro signál na výstupu soustavy  $y[n]$  můžeme pomocí rovnic (8) a (9) napsat ve tvaru

$$Y(z) = X(z) + \varepsilon(z) = X(z) + [1 - H(z)] \cdot E(z). \quad (10)$$

Vztah (10) vyjadřuje souvislost mezi vstupním signálem  $x(t)$ , celkovým chybovým signálem  $\varepsilon(n)$  na výstupu soustavy a chybovým signálem  $e(n)$ , který vzniká vlivem kvantizace signálu  $v(n)$ . Z uvedených vztahů vyplývá, že celkový chybový signál je tvarován funkcí  $[1 - H(z)]$ . Kmitočtový průběh filtru  $H(z)$  by měl mít takový průběh, aby chybový signál  $\varepsilon(z)$  na výstupu soustavy byl vnímán co nejméně. V praxi to znamená, že úroveň vnímání rušivého signálu bude minimální, pokud se jeho vjem bude blížit vnímání rovnoměrně rozloženého šumu v závislosti na kmitočtu.

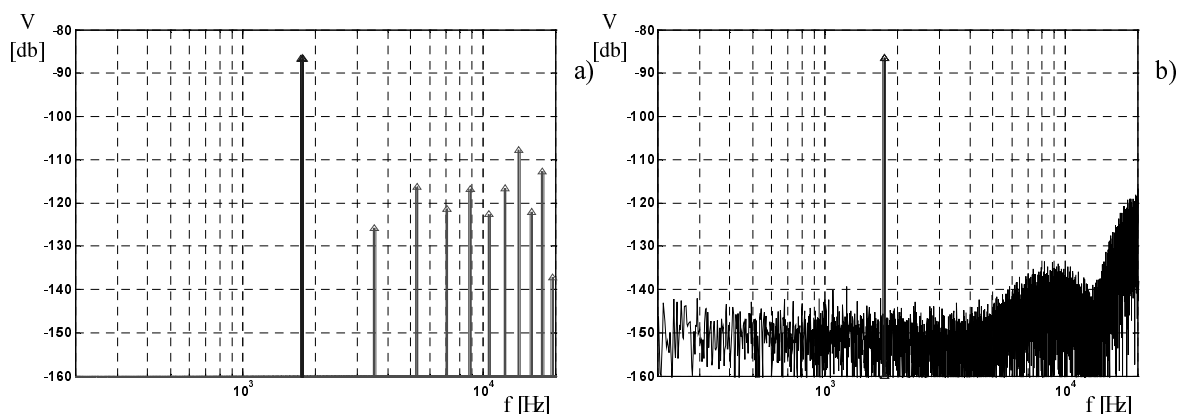
Měřicí signály jsou numericky generovány na počítači pomocí programového vybavení *MATLAB* [6]. Takto vygenerované diskrétní signály můžeme z hlediska přesnosti považovat za nekvantované signály  $x(n)$ , které nám přicházejí do další fáze číslicového zpracování

pomocí soustav pro *noise shaping* [3]. Na výstupu soustav dostáváme upravené digitální signály  $y[n]$ , které jsou již vhodné pro číslicový záznam např. na *CD*.



Obr. 2. a) Standardní křivky průběhů konstantních hladin hlasitosti v závislosti na kmitočtu; b) Normovaný průběh  $1/H(\omega)$  pro hladinu hlasitosti 15 Ph.

Analýzu vlivu diskretizace a kvantování signálů si ukážeme na kmitočtu  $f = 1764 \text{ Hz}$  (25 vzorků na periodu). Detailní průběh kmitočtového spektra diskretizovaného a kvantovaného signálu o amplitudě  $\pm 3q$  můžeme vidět na obr. 3a. Analýza signálu o shodném kmitočtu, který byl zpracován obvodem pro tvarování šumu na obr. 1, je znázorněna na obr. 3b. Na obr. 3a je základní harmonický kmitočet spolu s dalšími harmonickými i neharmonickými složkami jejichž původ spočívá v *aliasingu*. Nově vzniklé komponenty signálu působí rušivě na sluchový vjem. Číslicovým zpracováním signálu s transformací kvantizačního šumu získáme signál ve kterém se již nově vzniklé diskrétní kmitočty nevyskytují, ale na druhou stranu obdržíme ve spektru kvantizační šum, který je tvarován psychoakustickým filtrem  $H(\omega)$ . Upravený kvantizační šum je vnímán méně rušivě než diskrétní harmonické složky.



Obr. 3. a) Analýza číslicově generovaného harmonického signálu  $f = 1764 \text{ Hz}$ ; b) Signál upravený z psychoakustického hlediska.

## 4 Závěr

V příspěvku je ukázán jeden z možných způsobů úpravy zvukových signálů z hlediska jejich optimálního vnímání, tedy s potlačením nežádoucích efektů které vznikají v průběhu *DSP*. Pomocí programového vybavení *MATLAB* byly vytvořeny základní algoritmy pro generování a záznam číslicově zpracovaných zvukových signálů. Numericky vygenerované signály jsou nejprve upraveny z hlediska jejich optimálního vnímání a takto zpracované signály jsou převedeny do souborů typu \*.wav. Soubory typu \*.wav již lze použít k reprodukci testovacích signálů. Většinou jsou však upravené signály zaznamenány na *CD* a teprve tyto nosiče nám slouží jako zdroje zvukových signálů. Testovací signály nízké úrovně upravené z hlediska psychoakustiky jsou při reprodukci vnímány jako čistší oproti signálům bez úprav.

Projekt byl podporován Grantovou agenturou České republiky, grant č. 102/02/156.

## Literatura

- [1] Maher, R. C.: On the Nature of Granulation Noise in Uniform Quantization Systems. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 40, 1992, No. 1/2, p.12 - 20.
- [2] Wannamaker, R. A.: Psychoacoustically Optimal Noise Shaping 40, *J. Audio Eng. Soc.*, 1992, p. 611–620.
- [3] Gerzon, M. Craven, P. Stuart, R. Wilson, R.: Psychoacoustic Noise Shaped Improvements in CD and Other Linear Digital Media. *The 94<sup>th</sup> Audio Eng. Soc. Convention, Berlin, Preprint 3501, 1993.*
- [4] Matsuya, Y., Uchimura, K., Iwata, A., Kobayashi, T., Ishikawa, M., Yoshitome, T.: A 16-bit Oversampling A-to-D Conversion Technology Using Triple-Integration Noise Shaping. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 22, 1987, p. 921-929.
- [5] Zwicker, E. – Fastl, H.: *Psychoacoustics, Facts and Models.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990.
- [6] Kadlec, F.: Design, Generation and Analysis of Digital Test Signals. *The 111<sup>th</sup> Audio Eng. Soc. Convention, New York, Preprint 3501, 2001.*

E-mail: kadlec@fel.cvut.cz