

ČÍSLICOVÉ SIGNÁLY PRO TESTOVÁNÍ ELEKTROAKUSTICKÝCH SOUSTAV

František Kadlec

ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Technická 2, 166 27 Praha 6

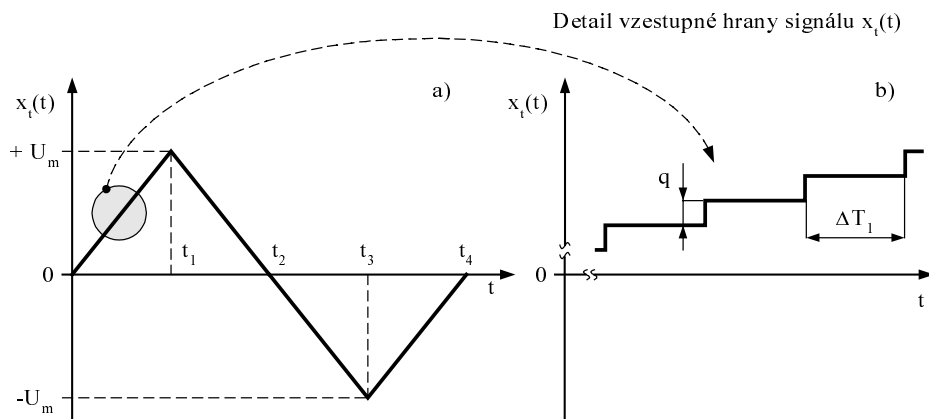
kadlec@feld.cvut.cz

1. Úvod

Vlastnosti akustických a elektroakustických soustav můžeme stanovit měřením, nebo pomocí poslechových testů. V obou případech k buzení testovaných soustav používáme měřicí signály. Při zjišťování vlastností elektroakustických soustav měřením se zpravidla jedná o stanovení přenosových funkcí soustavy, zkreslení, odstupů signálu od šumu, apod. Jako měřicí signály používáme harmonické signály, náhodné signály a signály složené. Pro poslechové testy se používají obdobné signály, které jsou však doplněné o hudební a řečové signály. V našem příspěvku se zaměříme na měřicí signály složené. Zvláště pak na typ signálu, který lze použít pro testování linearit A/D a D/A převodníků, zjišťování kvality zařízení pro záznam zvukových signálů na CD, reprodukcí zařízení a to jak měřením, tak i poslechem. Návrh, generování a analýzu číslicových měřicích signálů jsme prováděli pomocí programového vybavení MATLAB.

2. Složené měřicí signály

Pro testování linearit A/D a D/A převodníků, vlastností elektroakustických soustav jak měřením, tak i poslechem lze použít signál, který je složen ze dvou částí. Jednou složkou je signál trojúhelníkového průběhu $x_i(t)$, jehož amplituda odpovídá rozsahu převodníku a který je znázorněn na obr. 1. Diskrétní hodnoty uvedeného signálu odpovídají jednotlivým kvantovacím úrovním, v našem případě 16-bitového převodníku, který se používá při záznamu a reprodukci signálu na CD. Druhá část signálu je tvořena harmonickým signálem o kmitočtu, který se nalézá v oblasti maximální citlivosti lidského ucha, tedy v oblasti $1 \div 4 \text{ kHz}$. Amplituda harmonického signálu je přitom nízká, řádově několik kvantovacích úrovní převodníku. Celkový testovací signál $x_r(t)$ je navržen tak, že na každou úroveň trojúhelníkového signálu je superponována právě jedna perioda harmonického signálu o délce ΔT_1 . Detail průběhu složeného měřicího signálu je znázorněn na obr. 2. Rozsah amplitudy měřicího signálu $x_r(t)$ je $\pm 1 \text{ V}$.



Obr. 1. a) Celkový průběh trojúhelníkového signálu $x_i(t)$.

b) Detail průběhu vzestupné části signálu.

Průběh trojúhelníkového signálu $x_i(t)$ můžeme vytvořit tak, že pro jeho tvorbu použijeme součtu posunutých jednotkových funkcí $1(t)$ o velikosti kvantovací úrovně převodníku q . Posuv funkcí $1(t)$ je rovný délce jedné periody přídavného harmonického signálu nízké úrovně $x_h(t)$. Průběh trojúhelníkového signálu $x_i(t)$ pak můžeme napsat ve tvaru

$$\begin{aligned}
 x_i(t) = & q \sum_{k=1}^{\infty} 1(t - k\Delta T_1) \\
 & - 2q \sum_{l=1}^{\infty} 1(t - l\Delta T_1 - t_1) \\
 & + 2q \sum_{m=1}^{\infty} 1(t - m\Delta T_1 - t_3) \\
 & - q \sum_{n=1}^{\infty} 1(t - n\Delta T_1 - t_4) ,
 \end{aligned} \tag{1}$$

kde časové konstanty t_1 , t_3 a t_4 určují okamžiky změny průběhu trojúhelníkového signálu a vyplývají z obr. 1.

Celkový měřicí signál $x_r(t)$ vytvoříme součtem trojúhelníkového signálu $x_i(t)$ a harmonického signálu nízké úrovně $x_h(t)$

$$x_r(t) = x_i(t) + x_h(t). \tag{2}$$

Harmonický signál $x_h(t)$ můžeme napsat ve tvaru

$$x_h(t) = Aq \sin\left(2\pi \frac{1}{\Delta T_1} t\right), \tag{3}$$

kde A je celistvý počet kvantovacích úrovní q . Průběhy signálů $x_i(t)$, $x_h(t)$ a $x_r(t)$ a jejich vzájemné fázové poměry jsou znázorněny na obr. 2.

3. Analýza složeného měřicího signálu

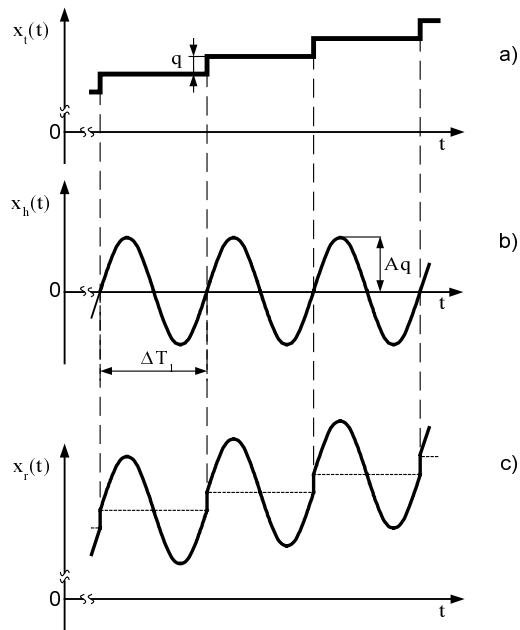
Měřicí signál $x_r(t)$ prochází definovaným způsobem všechny úrovně převodníku. Kvalitu převodníku lze pak ověřit buďto číslicovým měřením a analýzou signálu na jeho výstupu, nebo poslechem. Jaké kmitočtové spektrum obsahuje měřicí signál $x_r(t)$ zjistíme jeho kmitočtovou analýzou [1].

Kmitočtové spektrum měřicího signálu $x_r(t)$ získáme pomocí Fourierovy transformace (FT) a lze je pomocí (2) napsat ve tvaru

$$X_r(\omega) = FT\{x_r(t)\} = FT\{x_i(t) + x_h(t)\}. \tag{4}$$

Výsledné spektrum signálu $x_r(t)$ získáme tak, že provedeme kmitočtovou analýzou jeho dílčích částí

$$X_i(\omega) = FT\{x_i(t)\}, \quad X_h(\omega) = FT\{x_h(t)\}. \tag{5}$$



Obr. 2. a) Detail průběhu vzestupné části trojúhelníkového signálu $x_i(t)$.
 b) Průběh harmonického signálu nízké úrovně $x_h(t)$.
 c) Součet trojúhelníkového signálu $x_i(t)$ a harmonického signálu nízké úrovně $x_h(t)$.

Jestliže při návrhu měřicího signálu $x_r(t)$ vezmeme v úvahu harmonický signál $x_h(t)$ o kmitočtu 1470 Hz, pak délka jeho periody $\Delta T_1 = 0,680 \text{ ms}$. Délka jedné periody zvoleného harmonického kmitočtu odpovídá přesně 30 vzorkům číslicového signálu při vzorkovacím kmitočtu 44,1 kHz, který se používá při záznamu signálu na CD. Tím docílíme, že na každé kvantovací úrovni trojúhelníkového signálu se bude nacházet právě jedna celá perioda harmonického signálu $x_h(t)$.

Celkovou délku měřicího signálu T_r lze odvodit pomocí vztahu (1). Z charakteru navrženého měřicího signálu vyplývá, že v průběhu reprodukce trojúhelníkový signál proběhne $2x$ celým rozsahem převodníku. Jestliže uvažujeme 16 bitový převod, pak celkový počet kroků je $2^{(16+1)}$. Jestliže časová délka každého kroku je rovna periodě superponovaného harmonického signálu ΔT_1 , lze pak celkovou délku signálu zjednodušeně stanovit pomocí vztahu $T_r = 2^{(16+1)} \Delta T_1 = 89,16 \text{ s}$. Z obr. 1. lze usoudit, že vzestupná část trojúhelníkového signálu $x_i(t)$, vymezená časovým úsekem $0 \leq t \leq t_1$ má dobu trvání $t_1 = T_r / 4 = 22,29 \text{ s}$. Tato doba je dostatečně dlouhá na to, aby se z psychoakustického hlediska vytvořil ustálený vjem reprodukováného měřicího signálu, ať již budou reprodukovány vzestupné část signálu $x_r(t)$ v časových úsecích $0 \leq t \leq t_1$ a $t_3 \leq t \leq t_4$, nebo sestupná část signálu v úseku $t_1 \leq t \leq t_3$ [2]. Z tohoto důvodu se můžeme při kmitočtové analýze trojúhelníkového signálu $x_i(t)$ omezit pouze na jednu jeho část, např. počáteční vzestupnou část v časovém úseku $0 \leq t \leq t_1$, kterou si označíme $x_{i1}(t)$.

Dále pak z hlediska matematické analýzy bude vhodnější vybraný úsek signálu $x_{r1}(t)$ teoreticky rozšířit na časově neomezený úsek, takže můžeme napsat

$$x_{r1}(t) = q \sum_{k=-\infty}^{\infty} 1(t - k\Delta T_1). \quad (6)$$

Pro kmitočtovou analýzu součtu signálů posunutých v časové oblasti (6) můžeme využít vztah platný pro Fourierovu transformaci [1]

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} f(t - nT_0) \hat{=} \frac{2\pi}{T_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(\omega) \delta(\omega - n\frac{2\pi}{T_0}), \quad (7)$$

kde $f(t)$ je signál v časové oblasti a $F(\omega)$ je jeho spektrální obraz. Spektrum jednotkového skoku $1(t)$ je určeno výrazem [1]

$$FT\{1(t)\} = \pi\delta(\omega) - \frac{j}{\omega}. \quad (8)$$

Na základě vztahů (7) a (8) můžeme kmitočtové spektrum signálu $x_{r1}(t)$ popsaného vztahem (6) napsat ve tvaru

$$\begin{aligned} X_{r1}(\omega) &= \frac{2\pi q}{\Delta T_1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} FT\{1(t)\} \delta\left(\omega - k\frac{2\pi}{\Delta T_1}\right) \\ &= \frac{2\pi q}{\Delta T_1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[\pi\delta(\omega) - \frac{j}{\omega}\right] \delta\left(\omega - k\frac{2\pi}{\Delta T_1}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Dosud jsme uvažovali měřicí signál $x_r(t)$ spojitý, což v technické praxi představuje analogový signál. Při praktické realizaci však měřicí signál bude zaznamenán na CD, což znamená, že teoreticky navržený signál $x_r(t)$ bude podroben diskretizaci a kvantování. Zvukový signál je na CD zaznamenán se vzorkovacím kmitočtem $f_{vz} = 1/\Delta T_{vz} = 44,1 \text{ kHz}$, kde ΔT_{vz} je vzorkovací krok. Diskretizaci signálu $x_r(t)$ můžeme v časové oblasti popsat vztahem [3, 4, 5, 6]

$$\tilde{x}_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_r(t) \delta(t - n\Delta T_{vz}), \quad (10)$$

přičemž v kmitočtové oblasti platí

$$\tilde{X}_r(\omega) = FT\{\tilde{x}_r(t)\}, \quad (11)$$

$$\tilde{X}_r(\omega) = \frac{1}{\Delta T_{vz}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_r \left(\omega - k \frac{2\pi}{\Delta T_{vz}} \right). \quad (12)$$

Diskretizace a kvantování signálu se projeví vznikem aliasingu a kvantizačního šumu na výsledné spektrum měřicího signálu $\tilde{X}_r(\omega)$. Toto zvláště platí pro harmonický signál $x_h(t)$ s nízkou úrovní amplitudy.

4. Generování měřicího signálu

Při numerickém výpočtu měřicího signálu pomocí programového vybavení MATLAB jsme vycházeli z toho, že signál $x_r(t)$ je tvořen součtem trojúhelníkového signálu $x_i(t)$ a harmonického signálu nízké úrovně $x_h(t)$. Z tohoto důvodu jsme signály $x_i(t)$ a $x_h(t)$ generovali odděleně. Vzhledem k tomu, že se jedná o signály, tedy vektory s velkým počtem prvků, nebylo prakticky možné je vytvářet souvisle, ale bylo nutné vypracovat postup, jak tyto signály generovat po částech. Výsledný signál $x_r(t)$ sestavený z jednotlivých částí byl poté převeden do souboru typu *.wav. Soubory tohoto typu používáme jako výchozí pro záznam měřicích signálů na CD.

5. Závěr

Měřicí signály na CD lze obecně použít jak pro stanovení přenosových funkcí elektroakustických soustav, tak jejich testování poslechem [7]. Navržený složený signál je určen pro testování elektroakustických soustav, zvláště pak jejich A/D a D/A převodníků. Signál je složený z trojúhelníkového signálu s dlouhou periodou a harmonického signálu o kmitočtu, který se nachází v oblasti maximální citlivosti lidského ucha. Při reprodukci měřicího signálu je slyšitelný pouze harmonický signál. Pokud je soustava bez závad, reprodukováný signál bude mít stálý charakter, bez dalších zvukových efektů. Jestliže např. u D/A převodníku dochází k chybám v linearitě převodu, objevují se při poslechu výpadky harmonického tónu, vzniká přídatný šum, šelesty, praskání apod. Pouhým poslechem lze snadno odhalit případné nedostatky převodníku. Odezvy měřených soustav lze také zaznamenat a analyzovat jak v časové, tak i kmitočtové oblasti.

Řešený projekt byl podporován výzkumnými záměry č. J04/98:212300014 „Informační technologie a komunikace“ a č. J04/98:212300016 „Tvorba a monitorování životního prostředí“.

Literatura:

- [1] Champeney, D. C.: Fourier Transforms and Their Applications. London, Academic Press, 1973.
- [2] Zwicker, E.- Fastl, H.: Psychoacoustics, Facts and Models. Berlin, Springer-Verlag, 1990.
- [3] Brigham, E. O.: The Fast Fourier Transform and Its Applications. New Jersey, Prentice-Hall, 1988.
- [4] Oppenheim, A.V.- Schafer, R.W.: Digital Signal Processing. New Jersey, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1983.
- [5] Mitra, S. K. - Kaiser, J. F.: Handbook for Digital Signal Processing. New York, John Wiley & Sons 1993.
- [6] Kadlec, F.: Zpracování akustických signálů. Skripta. ČVUT, Elektrotechnická fakulta, Praha, 1998.
- [7] Denon Professional Test CDs, Nippon Columbia Co.