

# STANOVENÍ VLASTNOSTÍ ELEKTROAKUSTICKÝCH SOUSTAV POMOCÍ PSEUDONÁHODNÝCH SIGNÁLŮ

David Bursík, František Kadlec

ČVUT FEL, katedra radioelektroniky, Technická 2, Praha 6

bursikd@feld.cvut.cz, kadlec@feld.cvut.cz

## 1 Úvod

Pro analýzu elektroakustických soustav lze použít měření pomocí pseudonáhodných signálů. Měřením je možné stanovit vlastnosti elektroakustických soustav, zejména jejich kmitočtové charakteristiky a nelineární zkreslení. Měření pomocí pseudonáhodných signálů, mezi které patří i signály MLS (Maximum Length Sequences), má řadu výhod. Mezi ně patří vysoká šumová imunita, krátká doba měření a možnost měření soustav v běžných prostorách bez akustických úprav. Výstupem této metody je impulsní odezva měřené soustavy. Impulsní odezvu můžeme dále zpracovat s ohledem na výsledky, které požadujeme. V našem případě se jednalo o měření kmitočtových charakteristik reproduktorových soustav, stanovení odolnosti měřící metody vůči okolnímu šumu a vlivu nelineárního zkreslení měřených soustav na přesnost měření. Číslíkové zpracování měřících signálů probíhalo v programovém prostředí MATLABu.

## 2 Stanovení impulsní odezvy lineární soustavy pomocí MLS

Pseudonáhodné MLS signály jsou binární signály, jejichž periodickou autokorelační funkci můžeme napsat ve tvaru [1-3]

$$R_{pxy}[n] = \delta_p[n] - \frac{1}{L+1}. \quad (1)$$

Autokorelační funkce  $R_{pxy}[n]$  pro  $n = \text{mod}(L) = 0$  nabývá úrovně  $L/(L+1)$ . Pro ostatní hodnoty  $n$  platí  $R_{pxy}[n] = -1/(L+1)$ . Lineární systém může být charakterizován periodickou impulsní odezvou  $h_p[n]$ , což je odezva na  $\delta_p[n]$ . Výstupní periodický signál  $y_p[n]$  je určen periodickou (cyklickou) konvolucí periodického vstupního signálu  $x_p[n]$  s periodickou impulsní odezvou  $h_p[n]$

$$y_p[n] = x_p[n] \otimes h_p[n] = \sum_{k=0}^{L-1} x_p[k] h_p[n-k], \quad (2)$$

kde symbol  $\otimes$  představuje operaci cyklické konvoluce. Dále si určíme vzájemnou cyklickou korelační funkci mezi vstupním  $x_p[n]$  a výstupním signálem  $y_p[n]$  lineární soustavy

$$R_{pxy}[n] = x_p[n] \oplus y_p[n] = \frac{1}{L+1} \sum_{k=0}^{L-1} x_p[k] y_p[k+n]. \quad (3)$$

Dosazením  $y_p[n]$  z rovnice (2) do vztahu (3) obdržíme

$$R_{pxy}[n] = x_p[n] \oplus y_p[n] = x_p[n] \oplus \{x_p[n] \otimes h_p[n]\}. \quad (4)$$

V rovnici (4) se vyskytují cyklické operace korelace a konvoluce. Vzhledem k tomu, že se jedná o lineární operace, můžeme při jejich zpracování zaměnit jejich pořadí. Provedeme tedy nejprve

operaci korelace a poté konvoluci

$$R_{pxy}[n] = \{x_p[n] \oplus x_p[n]\} \otimes h_p[n], \quad (5)$$

$$R_{pxy}[n] = R_{pxx}[n] \otimes h_p[n]. \quad (6)$$

Dosažením výrazu pro autokorelační funkci (1) do vztahu (5) obdržíme

$$R_{pxy}[n] = \left\{ \delta_p[n] - \frac{1}{L+1} \right\} \otimes h_p[n], \quad (7)$$

$$R_{pxy}[n] = h_p[n] - \frac{1}{L+1} \sum_{k=0}^{L-1} h_p[k], \quad (8)$$

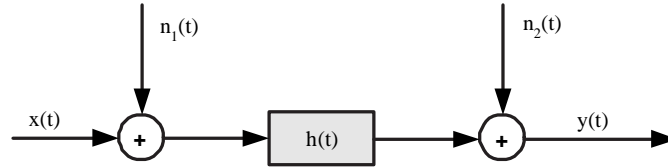
$$R_{pxy}[n] = h_p[n] + r_{ss}. \quad (9)$$

Rovnice (9) vyjadřuje vztah mezi periodickou impulsní odezvou  $h_p[n]$  a vzájemnou korelační funkcí  $R_{pxy}[n]$ . Druhý člen rovnice  $r_{ss}$  představuje stejnosměrnou složku vzájemné korelační funkce, která je vůči úrovni  $h_p[n]$  malá. Na základě této úvahy můžeme říci, že vzájemná korelační funkce  $R_{pxy}[n]$  je prakticky shodná s periodickou impulsní odezvou soustavy

$$R_{pxy}[n] \doteq h_p[n]. \quad (10)$$

### 3 Vliv aditivního šumu na měření pomocí MLS signálů

V další části práce jsme se zabývali stanovením vlivu aditivního šumu na přesnost měření elektroakustických soustav. Blokové schéma měření vlivu šumu je na obr. 1 .



Obr. 1 Blokové schéma měření vlivu aditivního šumu.

Měření přenosových vlastností elektroakustických soustav je zatíženo chybou, která vzniká přítomností šumového signálu jak na vstupu, tak i na výstupu měřené soustavy. Šumová složka signálu  $n_1(t)$  představuje šum způsobený na straně elektronických zařízení. Složka  $n_2(t)$  na výstupu soustavy je náhodný akustický signál z okolí měřené soustavy. Signál  $n_1(t)$  můžeme zanedbat v případě, že použijeme kvalitní elektronická měřící zařízení. Výsledný signál bude mít tvar

$$y[n] = \{h[n] \otimes x[n]\} + n_2[n], \quad (11)$$

kde  $x[n]$  je MLS signál,  $h[n]$  je impulsní odezva měřené elektroakustické soustavy a  $n_2[n]$  je náhodný signál nekorelovaný s měřícím MLS signálem. Při vzájemné korelaci vstupního signálu s výstupním dostáváme

$$R_{xy}[n] = y[n] \oplus x[n] = \{(h[n] \otimes x[n]) + n_2[n]\} \oplus x[n], \quad (12)$$

a po úpravě

$$R_{xy}[n] = \{h[n] \otimes (x[n] \oplus x[n])\} + \{n_2[n] \oplus x[n]\} \quad (13)$$

Úpravou rovnice (13) pomocí vztahu (9) obdržíme

$$R_{xy}[n] \cong h[n] + \{n_2[n] \oplus x[n]\}. \quad (14)$$

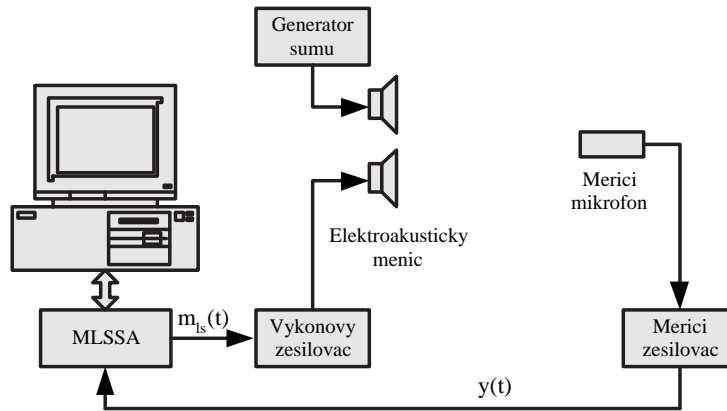
Vzhledem k tomu, že náhodný signál  $n_2[n]$  je nekorelovaný s MLS signálem, můžeme napsat

$$\{n_2[n] \oplus x[n]\} \cong 0. \quad (15)$$

Korelace mezi vstupním a výstupním signálem je přibližně rovna impulsní odezvě. To ovšem platí za předpokladu, že náhodný signál je nekorelovaný s MLS signálem. V praxi se při měření s takovými signály často nesetkáváme. Proto bude imunita této metody závislá také na úrovni náhodného signálu  $n_2[n]$ .

### 3.1 Stanovení vlivu aditivního šumu na měření pomocí MLS signálů

Provedli jsme praktická měření s tím, že náhodný signál  $n_2[n]$  byl bílý šum. Měření probíhalo v akusticky upravené místnosti. Blokové schéma měření je znázorněno na obr.2.

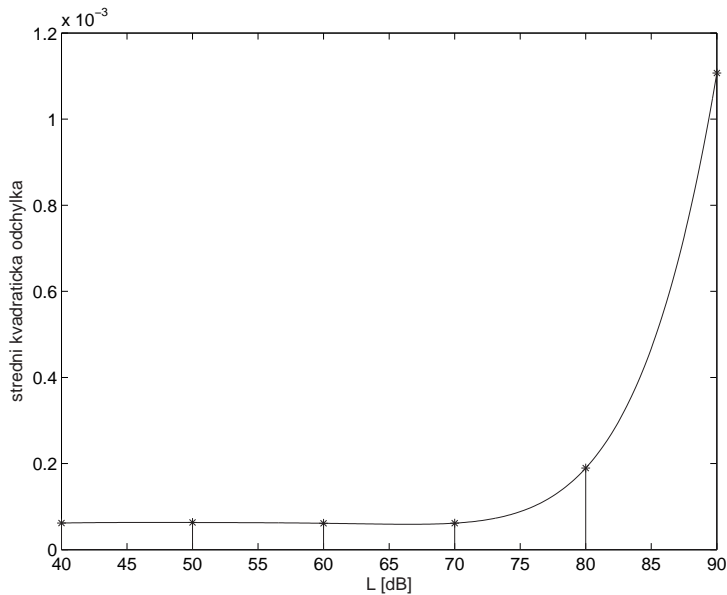


Obr. 2 Blokové schéma měření vlivu aditivního šumu na přesnost měření přenosových funkcí soustav.

Měřené reproduktorové soustavy jsou buzeny z generátoru MLS signálu pomocí výkonového zesilovače. Jako zdroj aditivního šumu byl použit generátor bílého šumu a reproduktorová soustava Tesla. Vzdálenost soustav od mikrofonu byla 1,2 m. Hladina akustického tlaku MLS signálu v místě měřícího mikrofonu byla 70 dB. Nejprve byla změřena bez aditivního šumu referenční impulsní odezva elektroakustické soustavy  $h_{ref}(t)$  s hladinou akustického tlaku 70 dB. Dále pak byly postupně změřeny impulsní odezvy  $h_i(t)$  s aditivním šumem na hladinách akustického tlaku 40, 50, 60, 70, 80 a 90 dB. Pro stanovení vlivu šumu na přesnost měření jsme použili střední kvadratickou odchylku

$$E_k = \sum_{n=1}^N (h_{ref}[n] - h_k[n])^2, \quad (16)$$

kde  $k$  představuje jednotlivé hladiny akustického tlaku aditivního šumu a kde  $N$  je celkový počet vzorků signálu. V našem případě byla použita délka signálu 685 vzorků.

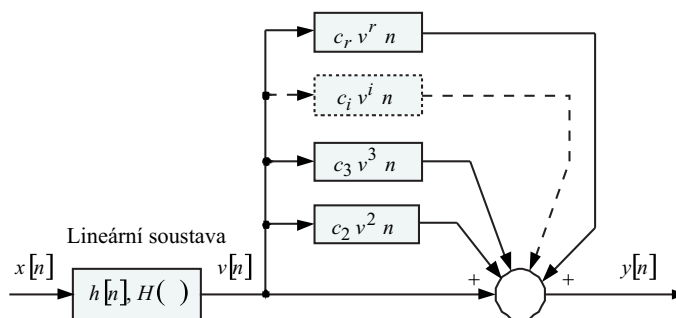


Obr. 3 Velikost střední kvadratické odchylky  $E_k$  v závislosti na hladině akustického tlaku aditivního šumu.

Na obr. 3 jsou zpracovány výsledky výpočtů dle rovnice (16). Z grafu je patrné, že měření není významně ovlivněno aditivním šumem až do hladiny akustického tlaku  $L=70\text{dB}$ .

#### 4 Nelineární zkreslení elektroakustických soustav

Měření přenosových funkcí pomocí MLS signálů bylo odvozeno pro lineární soustavy. Nyní se budeme zabývat rozšířením metody pro měření nelineárních systémů s možností stanovení jejich nelinearity. Jednotlivé způsoby řešení přenosu systémů obsahujících nelinearity jsou popsány v literatuře [4, 5, 7]. Při odvození budeme vycházet z modelu nelineární soustavy znázorněném na obr. 4.



Obr. 4 Blokové schéma modelu nelineární soustavy.

Pseudonáhodný MLS signál  $x[n]$  je přiveden na vstup měřené nelineární soustavy. Model nelineární soustavy se skládá z lineární části soustavy reprezentované impulsní odezvou  $h[n]$ ,

na jejímž výstupu je signál  $v[n]$  pro který platí

$$v[n] = h[n] \otimes x[n] = \sum_{k=0}^{L-1} h[k]x[n-k], \quad (17)$$

Signál na výstupu soustavy  $y[n]$  můžeme napsat ve tvaru

$$y[n] = c_1v[n] + c_2v^2[n] + c_3v^3[n] + \dots + c_rv^r[n], \quad (18)$$

kde  $c_1 = 1$  představuje lineární část přenosu a  $c_2, c_3, \dots, c_r$  jsou koeficienty nelineárního zkreslení. Obecně pak můžeme pro vzájemné korelační funkce  $R_{xv}[n]$ ,  $R_{xy}[n]$  vstupního signálu  $x[n]$ , lineárního výstupu  $v[n]$  a výstupního signálu  $y[n]$  napsat

$$R_{xv} = x[n] \oplus v[n] = h[n], \quad (19)$$

$$R_{xy}[n] = x[n] \oplus y[n] = \frac{1}{L+1} \sum_{k=0}^{L-1} x[k]y[k+n], \quad (20)$$

$$R_{xy}[n] = h[n] + e[n], \quad (21)$$

kde  $e[n]$  je celkový chybový signál vzniklý působením nelinearit měřené soustavy.

#### 4.1 Měření nelineárního zkreslení elektroakustických soustav

Měřením elektroakustických soustav při nízké úrovni budícího signálu, kdy předpokládáme minimální zkreslení soustavy, stanovíme pomocí vztahu (9) referenční impulsní odezvu soustavy  $h_{ref}[n]$ . Úroveň hladiny akustického tlaku budícího signálu byla v tomto případě 50 dB v místě měřícího mikrofону. V dalším kroku jsme měřili impulsní odezvy při zvyšujících se úrovních buzení. V našem případě se jednalo o hodnoty akustického tlaku  $L=55, 60, 65, 70, 75, 80, 85$  a 90 dB.

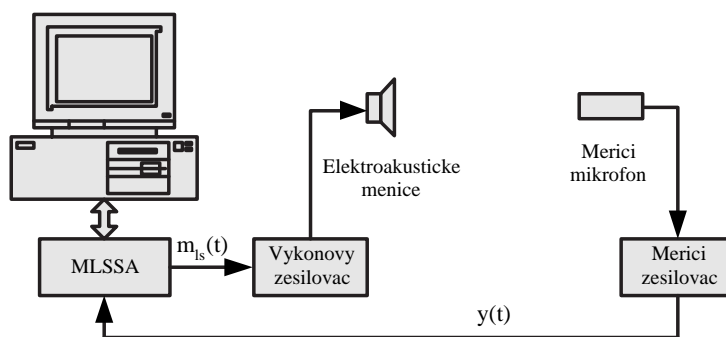
Pro výpočet chybového signálu bylo zapotřebí tyto naměřené impulsní odezvy normovat referenčním signálem tak, abychom mohli vypočítat odpovídající složky signálu  $e[n]$  dle vztahu (21)

$$h_d[n] = 10^{\left(\frac{A}{20}\right)} h_{ref}[n], \quad (22)$$

kde  $h_d[n]$  je impulsní odezva normovaného signálu,  $A$  je nárůst zesílení hladiny akustického tlaku signálu v dB vzhledem k referenční impulsní odezvě. Blokové schéma měření je na obr. 5. Upravenou impulsní odezvu použijeme při výpočtu chybového signálu  $e[n]$  podle vztahu (21) a spočteme jeho energii. Vztah

$$e_d = \sum_{n=1}^N (h_{ref}[n] - h_d[n])^2, \quad (23)$$

kde  $N$  je počet vzorků, v našem případě 650 vzorků, vyjadřuje součet kvadrátů chybového signálu vzniklého působením nelinearit měřené soustavy. Abychom získali hodnoty nelineárního zkreslení  $k_d$ , je zapotřebí hodnoty  $e_d$  ze vztahu (23) normovat referenční impulsní odezvou.

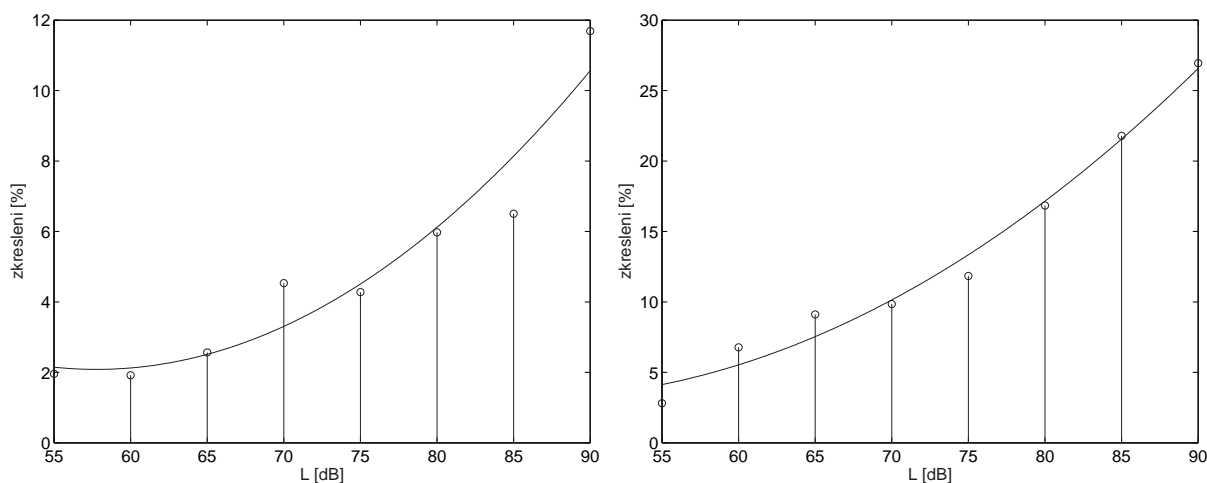


Obr. 5 Blokové schéma měření nelineárního zkreslení.

Po úpravě dostaneme vztah

$$k_d = \frac{\sum_{n=1}^N (h_{ref}[n] - h_d[n])^2}{\sum_{n=1}^N h_{ref}[n]^2} \cdot 100. \quad (24)$$

Výsledky výpočtů podle vztahu (24) jsou vyneseny do grafů na obr. 6.



Obr. 6 Nelineární zkreslení reproduktorových soustav RS1 a RS2

## 5 Závěr

Použitím MLS signálu lze měřením efektivně stanovit přenosové funkce elektroakustických soustav v prostorách bez akustických úprav. V příspěvku jsme se zabývali vlivem šumu prostředí na přesnost měření. Dále jsme analyzovali vznik nelineárního zkreslení elektroakustických soustav při jejich vybuzení vyšší úrovní signálu. Závěrem lze konstatovat, že použití pseudonáhodných MLS signálů při měření elektroakustických soustav vede k dobrým výsledkům i

při měření v hlučném prostředí. Při měření může vznikat chyba, která je způsobena nelineárním zkreslením měřených soustav. Číslíkové zpracování měřících signálů a výpočty přenosových funkcí byly provedeny v programovém prostředí MATLABu.

Projekt byl podporován Grantovou agenturou České republiky, grant č. 102/02/0156 a výzkumným záměrem MŠMT J04/98:212300016.

## **Literatura**

- [1] Rife, D. D. - Vanderkooy, J.: Transfer-function measurement with maximum-length sequences. J. Audio Engineering Society, June 1989, Vol. 37, No. 6, p. 419-443.
- [2] Dunn, C., Hawksford, M. O.: Distortion immunity of MLS-derived impulse response measurements. J. Audio Engineering Society, May 1993, Vol. 41, No. 5, p. 314-335.
- [3] Vanderkooy, J.: Aspects of MLS measuring systems. J. Audio Engineering Society, April 1994, Vol. 42, No. 4, p. 219-231.
- [4] Greest, M. C., Hawksford, M. O. J.: Nonlinear distortion analysis using maximum-length sequences. Electronics letters, June 1994, Vol. 30, No. 13, p. 1033-1035.
- [5] Greest, M. C., Hawksford, M. O. J.: Distortion analysis of nonlinear systems with memory using maximum-length sequences. IEE Proc.-Circuits Devices Syst., October 1995, Vol. 142, No. 5, p. 345-350
- [6] Kadlec, F.: Measurement of Distributed Acoustic Systems Using Maximum-Length Sequences. In: 100th Convention of the Audio Engineering Society, Copenhagen, Denmark, May 11 - 14, 1996, Preprint 4269.
- [7] Kadlec, F.: The Measurement of Acoustical and Electroacoustical Systems by Means of Pseudorandom Signals. In: Proc. of 7th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch - Partenkirchen, 4 -7 July, 2000, pp. 3345-3352.
- [8] Kadlec, F.: Zpracování akustických signálů. Skripta, ČVUT FEL, Praha, 2002.