



## **DISKRÉTNÍ FOURIEROVA TRANSFORMACE PŘI NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÉ SPEKTROSKOPII**

**Luboš PAZDERA<sup>\*</sup>, Jaroslav SMUTNÝ<sup>\*\*</sup>, Marta KOŘENSKÁ<sup>\*</sup>,  
Libor TOPOLÁŘ<sup>\*</sup>, Jan MARTÍNEK<sup>\*</sup>,  
Miroslav LUŇÁK<sup>\*</sup>, Ivo KUSÁK<sup>\*</sup>**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,  
<sup>\*</sup>Ústav fyziky, <sup>\*\*</sup>Ústav železničních konstrukcí a staveb

### **Abstrakt**

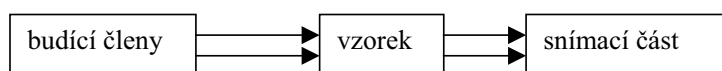
Nelineární ultrazvuková spektroskopie je metoda využívající nelineární vlastnosti namáhaného materiálu. Tato metoda se obvykle používá s využitím jednoho či dvou budičů (obecně jejich počet není omezen). Digitálně zaznamenaný signál je převeden Diskrétní Fourierovou transformací do frekvenční oblasti, kde jsou spektra vyhodnocena. Ovšem je nutné transformaci použít uvážlivě. Příspěvek se zabývá některými komplikacemi při použití transformace.

### **Abstract**

Nonlinear ultrasound spectroscopy is a resonance-based technique exploiting the significant nonlinear behaviour of damaged materials. This method can be applied in two basic types – with one or two exciters. Recorded signal is evaluated by help the Discrete Fourier Transform (Fast Fourier Transform). There are problem with its reasonable using. The aim of article is describing some of them.

## Úvod

Nelineární ultrazvuková spektroskopie využívá buzení jedním či více harmonickými signály. Výsledkem je sledování chování harmonických složek. Rozdíl ve velikosti těchto složek může být dostatečně významný z hlediska citlivosti a rozsahů přístrojů. Základní obvod se tedy sestává z budící části, vzorku a snímací části (obr. 1). Budičů i snímačů může být více.



**Obr. 1** Schéma zapojení vzorku

Analogově digitální (A/D) převodník má obvykle rozsah založený na mocnině dvou tj.  $2^{\text{bity}}$ . Pro dříve nejčastěji používané 8 bitové převodníky je to  $2^8$  tj. 256 úrovní, do kterých může být celý měřicí rozsah rozdělen. Užitečné hodnoty pro převodníky jsou v Tab. 1. Pro náhodné, zvláště impulsní děje, se obvykle využívají tři čtvrtiny celkového rozsahu.

Počet bitů	Rozsah ( $2^{\text{bity}}$ )	Přesnost ( $1/\text{Rozsah}$ )	Dynamický rozsah [dB]	3/4 dynamického rozsahu [dB]
8	256	$4 \cdot 10^{-3}$	48	40
12	4096	$3 \cdot 10^{-4}$	72	64
14	16384	$6 \cdot 10^{-5}$	84	76
16	65536	$2 \cdot 10^{-5}$	96	88
24	16777216	$6 \cdot 10^{-8}$	144	136
32	4264967296	$3 \cdot 10^{-10}$	192	184

**Tab. 1** Hodnoty A/D převodníku

## Fourierova transformace

Fourierova transformace převádí časový signál  $s(t)$  do tzv. frekvenční oblasti  $G(f)$ . Vlastní transformace pracuje s komplexním signálem. V případě analýzy reálného signálu  $s(t)$ , tj. imaginární část je nulová, je výsledek transformace komplexní číslo  $G(f) = G_{\text{Re}}(f) + i \cdot G_{\text{Im}}(f)$ . V praxi je obvykle používáno vyjádření frekvenčního spektra amplitudového

$$|G(f)| = \sqrt{G_{\text{Re}}^2(f) + G_{\text{Im}}^2(f)} \quad (1)$$

a fázového

$$\Phi(G(f)) = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{G_{\operatorname{Im}}(f)}{G_{\operatorname{Re}}(f)} \right) \quad (2)$$

Ovšem změřený signál  $s(t)$  je zaznamenán v jednotlivých časových okamžicích s konstantním časovým krokem  $\Delta t$  v omezené délce  $N$  hodnot tj.  $s(0)$ ,  $s(\Delta t)$ ,  $s(2 \cdot \Delta t)$ , ...,  $s((N-1) \cdot \Delta t)$ . Pokud by hodnoty byly určeny s jiným než konstantním krokem byl by výpočet komplikovanější. Většina zařízení však pracuje s konstantním krokem. Ve frekvenčním spektru pak dostáváme také diskrétní hodnoty na jednotlivých frekvencích daných frekvenčním krokem  $\Delta f$ , který závisí na časovém kroku  $\Delta t$  a počtu změřených bodů  $N$ , tj. délce signálu

$$\Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \quad (3)$$

Frekvenční amplitudové spektrum je tedy omezeno hodnotou aritmetického průměru  $G(0)$  a hodnotou na Nyquistově frekvenci  $G(\Delta f \cdot N/2)$ . Tedy spektrum je pouze ve vybraných frekvenčních bodech  $G(0)$ ,  $G(\Delta f)$ ,  $G(2 \cdot \Delta f)$ , ...,  $G(\Delta f \cdot N/2)$ . Poznamenejme, že signál je vzorkován frekvencí

$$f_{\text{vz}} = \frac{1}{\Delta t} = N \cdot \Delta f \quad (4)$$

Výsledné hodnoty jsou tedy na frekvencích  $0$ ,  $\cdot \Delta f$ ,  $2 \cdot \Delta f$ , ...,  $(N/2-1) \cdot \Delta f$ ,  $(N/2) \cdot \Delta f$ .

Tedy užití Diskrétní Fourierovy transformace obsahuje některé důležité vlastnosti

- signál i spektrum jsou vzorkovány, tj. mají hodnoty jen v definovaných bodech (čase, resp. frekvenci)
- je předpokládána periodičita signálu i spektra, tj. jakoby signál měl nejmenší periodu rovnu délce zaznamenané realizace ( $N \Delta t$ )
- nejvyšší skutečné frekvence v signálu musí být menší než je polovina vzorkovací frekvence, jinak je spektrum nereálné
- délka signálu by měla být úměrná nejnižší periodě obsažené v signálu

Pro eliminování některých efektů lze použít tzv. okénkové funkce, které snižují hodnoty na okrajích signálu. Touto funkcí je signál násoben a výsledná velikost spektra je o definovanou velikost nižší.

Je vhodné si uvědomit, že signál mající frekvenční složky mimo složky výsledné je rozptýlen energeticky do složek okolních.

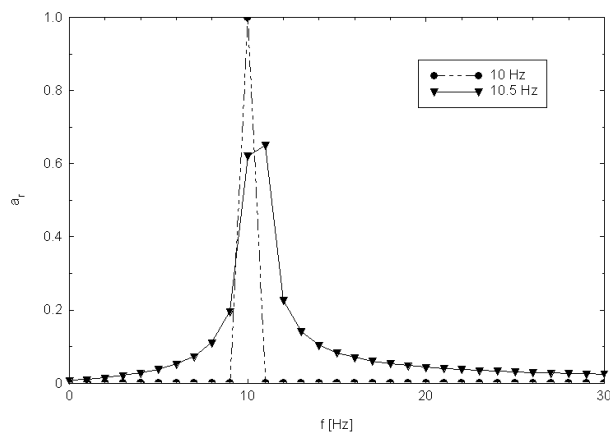
## Diskretizace

$f$ [Hz]	8	9	10	11	12	13	14
$a_r$	0.111	0.196	0.621	0.651	0.226	0.141	0.104

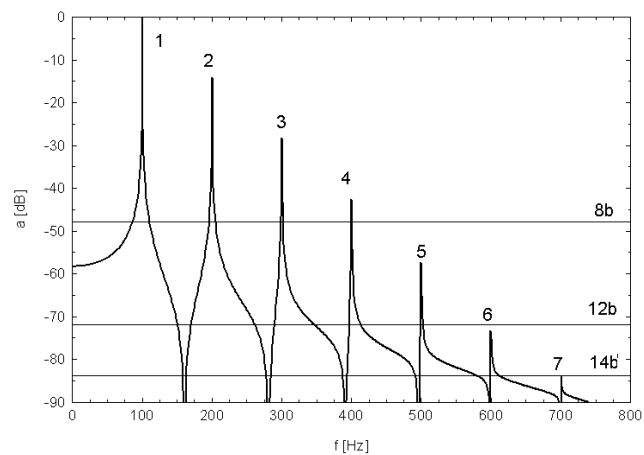
**Tab 2** Hodnoty na frekvenčních složkách při generování frekvencí 10,5 Hz

Vliv diskretní frekvence je patrný na obr. 2. Oba uvedené signály mají jednotkovou (stejnou) amplitudu, ale rozličnou frekvenci. Vzorkování je provedeno s frekvenčním krokem  $\cdot \Delta f$  rovným 1 Hz.

Tedy frekvence 10 Hz je ve spektru zobrazena na hodnotě 10 Hz tj.  $10 \times 1$  Hz. Avšak frekvence 10,5 Hz nemůže být umístěna na jedné frekvenční složce, neboť sousední složky jsou 10 Hz a 11 Hz. Z tab. 2 je zřejmé, že výpočtem je ovlivněno i relativně vzdálené okolí intervalu 10 Hz a 11 Hz.



**Obr. 2** Vliv vzorkování signálů s různou frekvencí



**Obr. 3** Vliv vzorkování

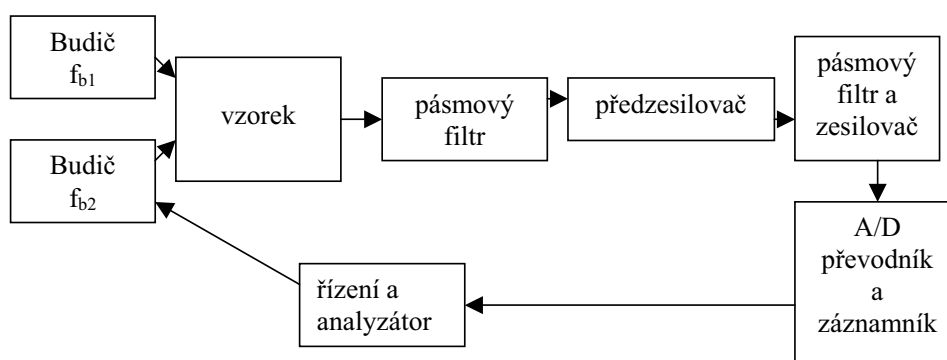
Dalším nezanedbatelným vlivem může být analogově digitální převod. Z obr 3 je patrný vliv počtu bitů u převodníku na počet zaznamenaných harmonických složek.

V tomto případě je předpokládán pokles každé složky pětina k předchozí složce. Při osmibitovém převodníku (8b) je maximální rozsah 48 dB a teoreticky lze sledovat první čtyři harmonické složky. Předpokládáme-li ovšem využití  $\frac{3}{4}$  rozsahu, tj. 40 dB, můžeme sledovat již jen tři harmonické složky. Zde je zřetelná nutnost použití většího rozlišení pro přesnější zaznamenání více harmonických složek.

Samozřejmě nutnost kritického rozlišení závisí na poklesu sledované harmonické složky vzhledem k celkovému poklesu signálu. Tedy vyšší rozlišení je obecně výhodnější, avšak v současnosti je omezeno rychlostí diskretizace signálu. Vyšší rozlišení snižuje maximální možnou vzorkovací frekvenci z důvodu hardwarové konstrukce A/D převodníku..

### Měřicí zařízení pro nelineární spektroskopii

Z uvedených důvodů je vhodné uvést aparaturu do souladu z hlediska teorie, tj. aby předpokládaná diskrétní frekvence buzení resp. rozdíl buzení byla zahrnuta v diskrétním Fourierově spektru. Znamená to sledovat relativně velké signály, co se týče objemu dat, neboť rozlišení je závislé na počtu zaznamenaných dat. Z hlediska omezených možností lze postupovat také s využitím analogových pásmových propustí. V případě, že budeme porovnávat poměry amplitud frekvenčních spekter potřebujeme jak velkou přesnost měření (vícebitový A/D převodník) tak současně velké množství dat. Při použití metody využívající dvou harmonických budících signálů se můžeme zabývat pouze oblastí rozdílů nebo součtu budících frekvencí. Pak je vhodné použití analogových pásmových filtrů, které budou propouštět pouze vymezenou oblast, umístěných před A/D převodníkem.



**Obr. 4** Blokové schéma měřícího zařízení

Blokové schéma jednoho z možných zapojení je uvedeno na obr. 4. Důležitou roli hraje vhodně zvolená kombinace budících frekvencí  $f_{b1}$  a  $f_{b2}$ . Vhodnost pásmového filtru před předzesilovačem může být diskutabilní, ale při předpokladu relativně velkého vstupního signálu je jeho použití relevantní.

## Závěr

Metoda nelineární ultrazvukové spektroskopie se jeví jako velmi nadějná nedestruktivní metoda. Její aplikovatelnost je závislá na stavu vědy a techniky. Velmi důležitými prvky jsou budící elementy. Samozřejmě je důležitá i záznamová strana. Při nastavování parametrů měřicího řetězce je nutné také uvažovat některé principy Diskrétní Fourierovy transformace. Důležitý je vhodný výběr frekvencí vč. vzorkovací. V souladu by měly být budící frekvence, vzorkovací frekvence a délka realizace resp. citlivost frekvenční osy. Důležitým prvkem je také buď frekvenční omezení zaznamenávaného signálu nebo vysoký stupeň rozlišení A/D převodníku, tj. vyšší počet bitů. Neexistuje všeobecný návod jak volit jednotlivé parametry aparatury, neboť tento závisí na sledovaném vzorku. Stavební materiály patří k těm komplikovanějším.

## Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory řešení projektu MSM 0021630519 a GACR 103/06/1711 a GACR 103/07/0183.

## Literatura

- [1] Hájek K., Kořenská M., Šikula J., *Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy of Fired Roof Tiles*, WCNDT 2004
- [2] Hajek K., Hefner S.: *Possibilities of nonlinear ultrasound spectroscopy for NDT in civil engineering*. Workshop NDT SMK'03, VUT Brno, 2003, p. 29-35, ISBN 80-7204-318-8.
- [3] Manychová, M., *Možnosti využití nelineární ultrazvukové spektroskopie pro defektoskopii stavebních materiálů*, příspěvek na konferenci Konstrukce a progresivní materiály s využitím druhotných surovin 2006, ISBN 80-214-3125-3
- [4] Manychová, M., *NDT Methods as Tool for Building Constructions Inspection*, příspěvek na konferenci Zborník príspevkov, ISBN 80-8073-678-2, CPRESS Košice, Štrbské Pleso