

Možnosti analýzy signálu akustické emise pomocí okénkové Fourierovy transformace

Jiří Pátek

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd, Ústav fyzikálního inženýrství

Fourier series are ideal for analysing periodic signals, but not suitable for acoustic emission (AE) which is the transient phenomenon. There are two possible substitutes, the windowed Fourier transform (WFT) and the wavelet transform. In this paper we motivate the WFT and show how it can be used to give information about signals simultaneously in the time domain and the frequency domain. Finally signals of excited steel pipe are processed.

Key words: AE diagnostics, signal processing, windowed Fourier transform

1. Úvod

Problematika zpracování signálů zasahuje snad do všech technických oborů. Převodem na číslicový tvar získáme nové možnosti. Je možné okamžitě realizovat a snadno vyzkoušet i velmi složitý algoritmus. Situace je ulehčena dostupností výkonných signálových procesorů, kterými lze provést jak A/D převod, tak řadu potřebných operací.

Aby byla dosažena co největší propustnost a nejkratší mrtvá doba, kdy systém neměří, je stále hlad po účinných algoritmech. Účelem tohoto příspěvku je připomenout a shrnout možnosti analýzy a redukce, které poskytuje klasická FFT spolu se sledovacím okénkem, tzv. WFT -

windowed Fourier transform, pro zpracování signálu akustické emise. Jsou diskutovány hranice použitelnosti.

Metoda akustické emise (dále AE) je využívána zejména při tlakových a zatěžovacích zkouškách. V místech s materiálovými vadami nebo trhlinami dochází k uvolňování nahromaděné potenciální energie. Jedná se o přechodový děj. Rozruch se šíří materiálem v podobě dilatační, smykové i Rayleighovy vlny. V tomto pořadí přicházejí primární čela k piezoelektrickému snímači, nejvíce je používán rezonanční typ. Snímačů bývá více a jsou rozmístěny pokud možno do pravidelné sítě pokrývající celý sledovaný objekt. Tak je možné stanovit místa zdrojů. Na základě četnosti příchodů od každého zdroje a charakteristik měřeného signálu, případně starších měření objektu, lze posoudit riziko zvětšování poruch v materiálu.

Většina dosud používaných aparatur neprovádí přímé digitální zpracování signálů, mají obvodové řešení s pevnými funkcemi. Měří maximální amplitudu, dobu od překročení prahu do maximální amplitudy, dobu trvání každé události, počet překmitů, plochu signálu, aj. Teprve tyto veličiny jsou digitalizovány a uloženy, k dalšímu zpracování. Aparatury navíc zjednodušují lokalizaci tím, že uvažují pouze jednu rychlost šíření, ta je určena experimentálně přímo na objektu. Většinou jde o fázovou rychlost Rayleighovy vlny. Při vlastním měření však vzhledem k prahovému spouštění aktivity kanálu se také stává, že nastavenou amplitudu někdy překročí čelo jiné vlny (zdroj je v blízkosti snímače), případně Rayleighova vlna chybí (zdroj je na opačném povrchu). Zdroji je přisouzena zkreslená poloha nebo aktivita.

2. Okénková Fourierova transformace

Neperiodický signál akustické emise $f(t)$ nelze analyzovat Fourierovou transformací přímo. Tato transformace je určena především k analýze periodických signálů a tak je třeba analyzovaný signál upravit. Je-li T šířka okénka, pak pomocí okénkové funkce analyzujeme pouze úsek signálu v intervalu $\langle t-T, t \rangle$. Funkci okénka definujme např. následovně:

$$g(\tau) = \begin{cases} 1 + \cos(\pi(\tau+1)), & \text{pro } \tau \in \langle -2, 0 \rangle \\ 0, & \text{pro } \tau \text{ ostatní} \end{cases}$$

Okno má šířku $T=2$, je Hanningova typu. Prostřednictvím této funkce zmenšujeme vliv okrajových hodnot $f(t)$ na intervalu a přiblížíme ji periodické funkci. FT s okénkem lze velmi

zjednodušeně přirovnat k poslouchání např. hudby, ucho ve spolupráci s mozkiem okénky s různou šířkou vnímá frekvenci a barvu tónů, rozlišuje trvání tónů a celkový rytmus melodie.

Aby existovala FT a skutečně konvergovala k originálu, je nutnou a postačující podmínkou, že $f(t)$ i $g(\tau)$ jsou z prostoru $L^2(\mathbb{R})$, z vektorového prostoru kvadraticky integrabilních funkcí $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$, který je podmnožinou Hilbertova prostoru. Vektorový prostor především znamená, že funkce násobená konstantou a součet dvou funkcí leží opět v tomto prostoru. Kvadratická integrabilita je totožná s existencí konečné normy

$$\|f(t)\| = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} dt |f(t)|^2} .$$

Kvadrát této normy má často fyzikální význam energie, signál $f \in L^2(\mathbb{R})$ tedy nese konečné množství energie. Těmto kritériím vyhovuje každý fyzikální průběh, který je omezený, má konečný počet extrémů a bodů nespojitosti. To je postačující podmínka.

Skalární součin dvou funkcí $f_1, f_2 \in L^2(\mathbb{R})$ je obdobou normy

$$\langle f_1(t), f_2(t) \rangle = f_1 * f_2 = \int_{-\infty}^{\infty} dt \bar{f}_1(t) f_2(t) ,$$

\bar{f}_1 označuje komplexně sdruženou funkci. V případě diskrétních funkcí a prostoru $L^2(\mathbb{Z})$ nebo $L^2(\mathbb{N})$ nahradíme integrály příslušnými sumami.

Aplikací okénka v čase t na signál f přejdeme k tzv. lokalizované funkci $f_t(u)$

$$f_t(u) = \bar{g}(u-t) f(u) ,$$

$f_t(u)$ je nenulová pouze v nedávno minulém čase $u \in \langle t-T; t \rangle$. Přidržíme se obecnějšího zápisu, proto je g komplexně sdružená. Obraz $\hat{f}_t(\omega)$ bude

$$\hat{f}_t(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} du e^{-i2\pi\omega u} f_t(u) = \int_{-\infty}^{\infty} du e^{-i2\pi\omega u} \bar{g}(u-t) f(u) .$$

V každém čase t získáváme okamžitou spektrální funkci $\hat{f}_t(\omega)$. Položme $g_{\omega,t}(u) = g(u-t) e^{i2\pi\omega u}$, platí rovnost norem $\|g_{\omega,t}(u)\| = \|g(u-t)\|$. Tato nová funkce opět patří do $L^2(\mathbb{R})$, WFT lze nyní přepsat do tvaru skalárního součinu

$$\hat{f}_t(\omega) = \langle g_{\omega,t}(u), f(u) \rangle = g_{\omega,t} * f$$

Pro posouzení vlastností daných výběrem okénka je výsledkem WFT spektrální hustota energie $|\hat{f}_t(\omega)|^2$. Ještě zmiňme Parsevalovu rovnost, která popisuje symetrii WFT vůči času a frekvenci.

Časově frekvenční funkci $\hat{f}_t(u)$ lze získat z originálů nebo z obrazů:

$$\hat{f}_t(\omega) = \langle g_{\omega,t}(u), f(u) \rangle = \langle \hat{g}_{\omega,t}(v), \hat{f}(v) \rangle .$$

Od času u , kterým se posouváme v rámci okénka do minulosti, můžeme přejít k frekvenci v , která se pohybuje v rámci okénkového obrazu $\hat{g}_{\omega,t}$. Na základě Parsevalovy rovnosti lze dospět k období Heisenbergova principu neurčitosti. Frekvenci nelze nikdy měřit okamžitě, potřebujeme alespoň periodu. Časová šířka okénka T a frekvenční rozsah okénka Ω jdou proti sobě. Proto součin ΩT nemůže být libovolně malý, ale $\Omega T \geq C$, C je kladná konstanta blízká jedné (nutnost jedné periody). Přesnou hodnotu konstanty určuje tvar okénka. Pro Gaussovské okénko (distribuce používaná v kvantové mechanice) je $\Omega T \geq 1/4\pi$. Výběr šířky okénka určuje dělicí čáru mezi rozlišením času a frekvence. To bude patrné na příkladech v dalším odstavci. V podstatě s naprostou jistotou o žádné frekvenci nelze říci, že je v signálu obsažena.

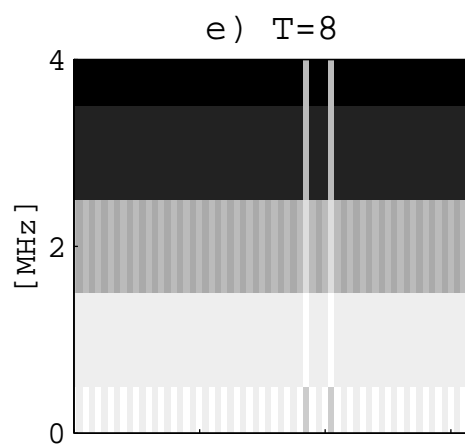
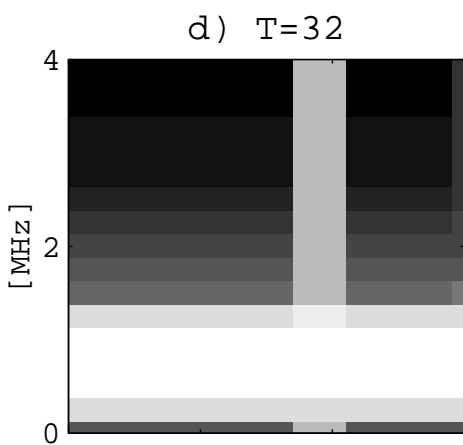
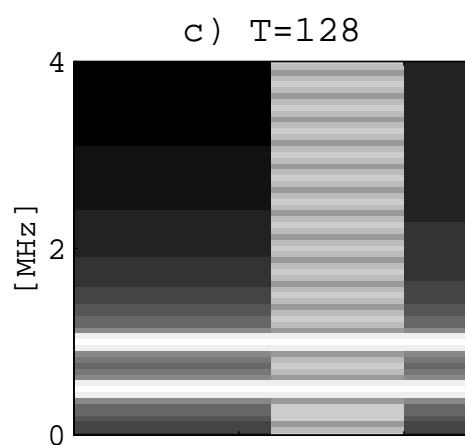
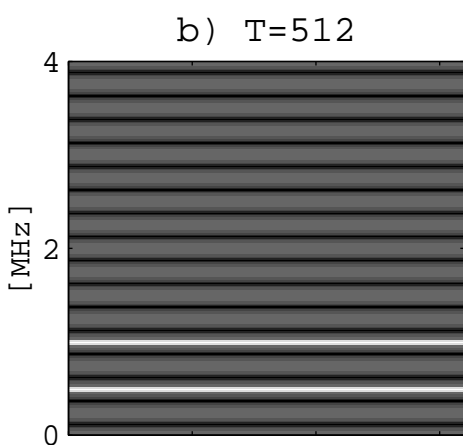
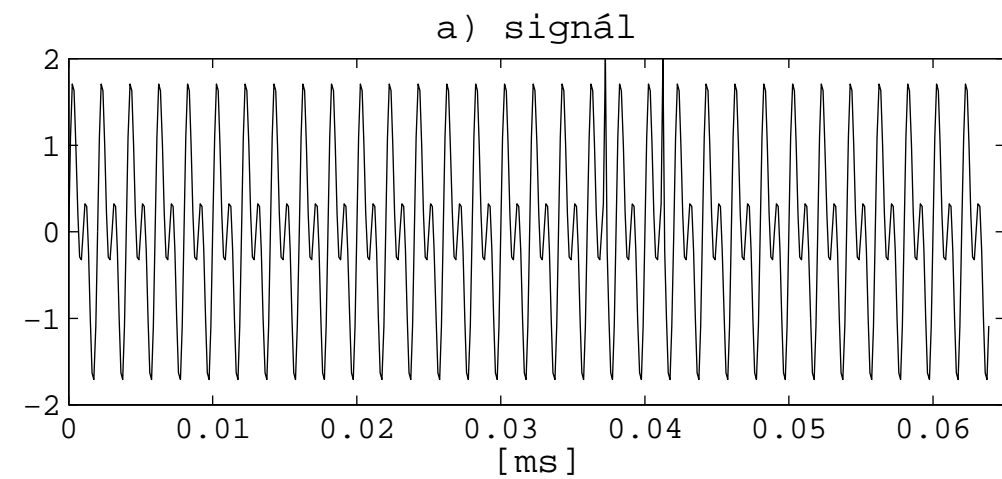
3. Příklady

K analýze byl použit jazyk Matlab a jeho signálový modul, kde je k dispozici funkce *specgram*, která přímo poskytuje hustotu energie $|\hat{f}_t(\omega)|^2$ pro několik typů okének, je možné stanovit překryv v časovém posuvu okénka.

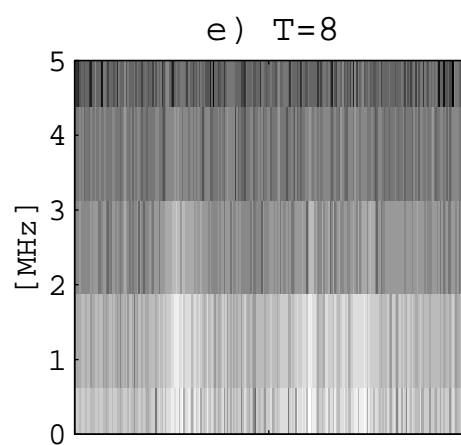
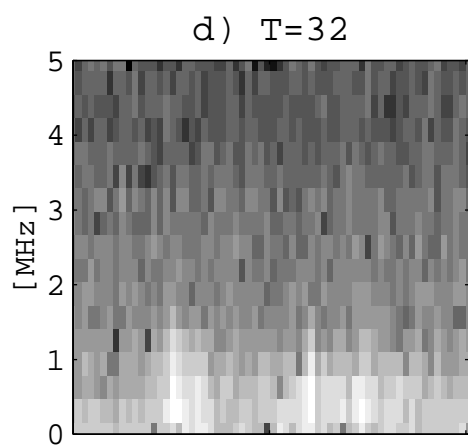
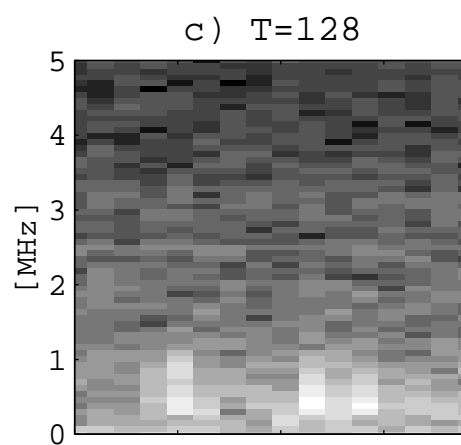
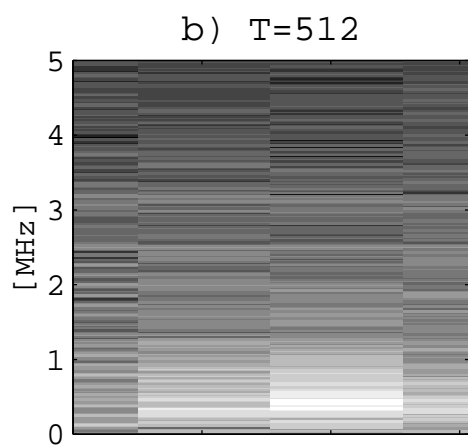
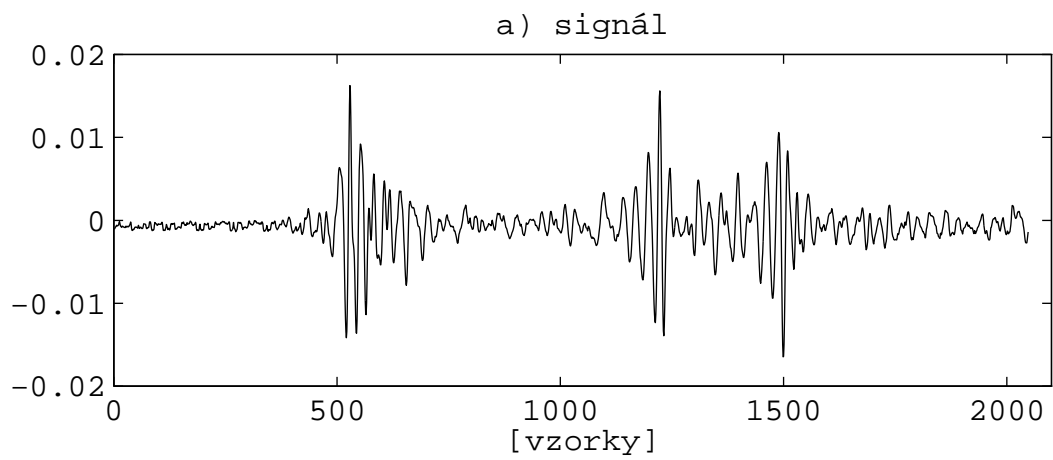
Detekční možnosti WFT demonstrujeme na periodickém signálu, který je narušený dvěma Diracovskými impulsy, obr.1a. Periodický průběh je superpozicí dvou harmonických o frekvenci 0,5 MHz a 1 MHz, délka průběhu je 512 vzorků, vzorkovací rychlost 8 mil. vzorků/sec. Obr. 1a,b,c,d jsou grafy časově frekvenční závislosti při Hanningově okénku širokém $T = 512$ vzorků, $T = 128$, $T = 32$ a $T = 8$. Každé okénko má jiné efektivní pásmo rozlišení. Pomocí okénka $T = 128$ se podařilo dobře rozeznat obě stále přítomné základní frekvence v signálu (dvojice vodorovných pruhů v obr.1c), avšak okamžiky výskytu impulsů (svislé pruhy) nejsou prakticky viditelné. Situace na obr.1d je právě opačná. Úzké okénko výborně odlišilo oba impulsy, naopak dvojice nízkých frekvencí splývá s pozadím. Na postupně se měnící šířce

okénka je patrný princip neurčitosti, při okénku obsahujícím celý průběh máme nejjemnější frekvenční rozlišení, jde však o integrální spektrum celého průběhu a zcela chybí rozlišení v čase. Úzké okénko výborně odlišilo oba impulsy, naopak dvojice nízkých frekvencí splývá s pozadím.

Další kolekce obrázků na obr.2 představuje změřený signál při experimentu na tlusté rouře s třemi příchody vlnových čel, signál obsahuje 2048 vzorků s krokem 100 ns. Opět jsou v obr. 2 vykresleny čtyři průběhy okamžitých spekter při šířce $T=512, 128, 32, 8$. Časově frekvenční analýza nejlépe postihla všechna čela vln při $T=32$. Tato detekce příchodů vln je spolehlivější než prosté překročení nastaveného prahu. Detekce je dostatečně necitlivá jak na změnu amplitudy signálu, tak na tvarové fluktuace, ke kterým dochází zejména v případě sledování reálného zdroje v namáhaném materiálu.



Obr.1 WFT analýza signálu: superpozice 2 harmonických s impulsními poruchami.



Obr. 2 WFT analýza signálu AE na tlustostěnné rouře.

4. Závěr

V článku bylo popsáno použití okénkové Fourierovy transformace (WFT) pro rozbor signálu akustické emise. Skanovací okénko, ve kterém získáváme okamžité spektrum, umožňuje analýzu přechodových jevů. Oproti prahovým detektorům je pro diagnostické účely výhodná detekce příchodu primární vlny bez závislosti na amplitudě signálu. Šířka okénka určuje dolní frekvenci okamžitého frekvenčního spektra. Frekvenční spektra jsou lineární, resp. ekvidistantní u diskretizovaného signálu. To se projevuje jako nedostatek při širokém okně. Velmi úzké impulsy jsou pak neostře až nerozeznatelné. Tataž neostrost se projevuje u nízkých frekvencí, jestliže je pozorovací okénko příliš úzké.

WFT je použitelná pro analýzu a redukci signálů akustické emise, protože pracovní pásmo je pro širokopásmové snímače v rozmezí 10 kHz – 1 MHz, pro rezonanční piezosnímače nejvýše 100 - 450 kHz.

Poděkování

Práce popsaná v tomto článku byla podporována Grantovou agenturou České republiky prostřednictvím grantu č.101/94/0971 "Nové metody vyhodnocování signálů akustické emise" a uskutečněna v Ústavu fyzikálního inženýrství Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Literatura

- [1] G.Kaiser: *A Friendly Guide to Wavelets*, Birkhauser, (1994)
- [2] A. Angot: *Užitá matematika*, SNTL TKI, (1972)
- [3] S.Míka, P.Drábek: *Vybrané kapitoly z aplikované matematiky*, sborník přednášek Škoda, (1988)
- [4] J.Škrášek, Y.Tichý: *Základy aplikované matematiky II.*, SNTL Praha, (1986)