



PŘEHLED METOD POUŽÍVANÝCH PRO FILTRACI ULTRAZVUKOVÝCH SIGNÁLU

Václav Matz, Marcel Kreidl a Radislav Šmíd
vmatz@seznam.cz
CVUT, FEL, Katedra měření
Technická 2, 166 27, Praha

Abstrakt: Při ultrazvukovém testování materiálů s hrubozrnnou strukturou je velice důležité vybrat vhodný účinný ultrazvukový systém. Úspěšná detekce vadového echa především závisí na zvolené ultrazvukové sondě, parametrech ultrazvukového systému a metodách zpracování zaznamenaných ultrazvukových signálů. Zaznamenané ultrazvukové signály obsahují relativně vysokou úroveň šumu, který znemožňuje jednoznačnou detekci vadových ech. V příspěvku je uveden přehled nejpoužívanějších metod zpracování ultrazvukového signálu pro účinné potlačení šumu. Prezentováno je srovnání metod vlnkové transformace, Wienerovy filtrace a závěrem je diskutována metoda slepé separace signálu. Uvedené metody jsou analyzovány z hlediska potlačení šumu a nastavování vhodných parametrů. V závislosti na provedené analýze jsou naznačeny také možnosti implementace těchto metod do reálných ultrazvukových systémů.

Klíčová slova: Ultrazvukové testování, metody potlačení šumu, ultrazvukové systémy.

ÚVOD

Ultrazvuková defektoskopie je určena pro detekci a lokalizaci vad v materiálech. Šíření ultrazvukových vln [1] v testovaných materiálech je podstatně ovlivněno strukturou daného materiálu. Pokud se materiál vyznačuje hrubozrnnou strukturou (obsahuje určité množství zrn, která mohou být i z různých materiálů) je výsledný ultrazvukový signál touto strukturou značně ovlivněn, neboť obsahuje ultrazvuková echa vzniklá odrazem od rozhraní těchto zrn. Zvláště kritická je situace, kdy velikost zrn obsažených v materiálu je srovnatelná s velikostí detekovaných vad. Tyto odrazy, označované jako šum, obvykle ztěžují proces detekce vadových ech, neboť dochází ke snížení citlivosti a rozlišitelnosti ultrazvukové defektoskopie a v krajním případě může zapříčinit nejednoznačnost určení vad v testovaném materiálu. V těchto případech je důležité, a průmyslem velice vyžadované, použít účinných metod zpracování signálu určených pro redukci šumu, tj. odseparovat šum od užitečného signálu.

Současné průmyslové ultrazvukové defektoskopy umožňují pouze aplikace základních metod zpracování signálu. V případě redukce šumu se kromě metody průměrování používají také metody založené na filtrech s konečnou impulsní odezvou (Finite Impulse Response – FIR), které

ale neposkytují dostatečné zvýšení citlivosti, zvláště v materiálech s hrubozrnnou strukturou. V těchto případech je nutné navrhnout a použít účinnější metody filtrace signálu.

Na základě studia FIR filtrů byla v minulosti navržena účinnější nelineární metoda založená na dělení frekvenčního spektra signálu (Split Spectrum Processing – SSP) [2]. Nevýhoda této metody spočívá v nastavení mnoha parametrů a uvažování řady předpokladů [2].

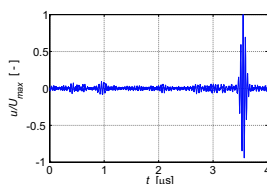
Dále pro redukci šumu jsou publikovány nelineární metody založené na neuronových sítích [3]. Ani tyto metody nevykazují požadovaný odstup signálu od šumu a další výzkum byl již ukončen.

V současné době je nejvíce studovanou a analyzovanou metodou potlačení šumu v ultrazvukovém signálu vlnková transformace [4], [5]. Využitelnost této metody je podmíněna nutností vhodně zvolit parametry pro potlačení šumu v signálu, tj. typ použité vlnky, úroveň rozkladu a druh prahové úrovně. Výzkum v této oblasti byl doposud neukončen a pro návrh nových algoritmů bylo nejprve účelné ujednotit všechny parametry používané pro potlačení šumu v ultrazvukovém signálu.

Možným východiskem pro separaci šumu by mohly být algoritmy slepé separace signálu (Blind Source Separation – BSS) například založené na statistické metodě analýzy nezávislých komponent. V oblasti ultrazvukové defektoskopie byly nalezeny pouze dvě, nepříliš věrohodné publikace o použití metody slepé separace signálu [6]. Ověření metody slepé separace signálu bylo jedním z cílů této práce.

TEORETICKÉ A EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY

V rámci této publikace byly analyzovány pokročilé metody zpracování signálu použité pro redukci šumu a separaci ultrazvukového signálu zaznamenaného na vzorcích materiálů vyznačujících se hrubozrnnou strukturou. Nejprve bylo nutno detailně analyzovat šíření ultrazvukových vln v těchto materiálech a vhodně navrhnout model pro simulaci ultrazvukových signálů. Na základě amplitudové a frekvenční analýzy elektronického a strukturního šumu reálných signálů a vhodného modelu [2] byl simulován ultrazvukový signál obsahující elektronický šum, strukturní šum, vadové echo a koncové echo. Tento ultrazvukový signál je zobrazen na obr. 1.



Obr. 1: Simulovaný ultrazvukový signál obsahující strukturní i elektronický šum

Pro potlačení šumu ultrazvukového signálu byla nejprve použita metoda diskretní vlnkové transformace. Princip potlačení šumu lze popsat následujícím výčtem kroků:

- Dekompozice zašuměného vstupního signálu na detailní cD a proximační cA koeficienty do P úrovní zvolenou metodou vlnkové transformace.
- Prahování koeficientů (detailních) charakterizujících šum.

- Rekonstrukce signálu pomocí inverzní transformace z prahovaných aproximačních a detailních koeficientů.

Pro účinné potlačení šumu bylo nutno vhodně vybrat typ mateční vlnky, prahovací funkci a prahovou úroveň.

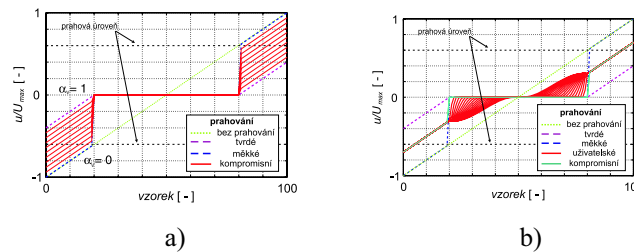
Mateční vlnka určuje tvar pásmové propusti filtrující signál okolo centrálního kmitočtu. V oblasti potlačení šumu v ultrazvukovém signálu byly na základě vlastností ultrazvukového echa zvoleny tyto vlnky: rodiny Daubechies řádu druhého až šestého, rodiny Symlet, Haarova mateční vlnka a diskrétní aproximace Meyerovy mateční vlnky. Tyto mateční vlnky byly použity pro zhodnocení účinnosti potlačení šumu pomocí DWT.

Standardní metody prahování rozlišují dva přístupy: měkké a tvrdé prahování. Jelikož je měkké prahování v případě filtrace ultrazvukového signálu nevhodné (může dojít k poklesu amplitudy vadového echa), byla navržena prahovací funkce, která využívá principu kombinace měkkého i tvrdého prahování. Prahovací funkce navržené pro potlačení šumu v ultrazvukovém signálu lze nazvat jako kompromisní a uživatelské prahování [6]. Kompromisní prahování je odvozeno z měkkého prahování a uživatelské prahování pracuje s nelineární modifikací prahovací funkce kompromisního prahování. Princip tvrdého, měkkého, kompromisního a živatelského prahování je zobrazeno na obr.2.

V rámci disertační práce byly navrženy nové prahové úrovně. První a základní prahová úroveň V_1 je odvozená od směrodatné odchylky detailních koeficientů v jednotlivých úrovních dekompozice:

$$V_1 = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (cD_j - c\bar{D})^2}, \quad (1)$$

kde n je délka vektoru detailních koeficientů, k je zvolená konstanta odpovídající crest faktoru filtrovaného signálu, cD je vektor detailních koeficientů a V_1 je hodnota prahové úrovně.



Obr. 2: Princip měkkého, tvrdého, uživatelského a kompromisního prahování

Další možnosti odvození prahové úrovně V_2 , založené na odmocnině součtu střední hodnoty a směrodatné odchylky, jsou navrženy dle vztahu:

$$V_2^k = \sqrt{(\mu + V_1)}, \quad (2)$$

kde μ je střední hodnota vektoru detailních koeficientů cD .

Jelikož je při aplikaci prahovacích funkcí a prahových úrovní uvažováno více parametrů, které je nutno vhodně nastavit, je nutné ověřit všechny kombinace parametrů se všemi vybranými matečními vlnkami. Pro zhodnocení účinnosti DWT byl použit simulovaný ultrazvukový signál

s různou velikostí vadového echa 1 až 100 % amplitudy počátečního echa a byly navrženy hodnoty zlepšení odstupu signálu od šumu (SNRE) a hodnota D_x posuzující změnu vadového echa po aplikaci metody DWT. Pro úplnost je důležité uvést, že bylo použito pouze lokální prahování a rozklad ultrazvukového signálu do čtvrté úrovně dekompozice. Při vyšší úrovni dekompozice již filtrace nedosahovala lepších výsledků. Zhodnocení uvedených parametrů se nalézá v tab. 1, 2 a 3.

Tab. 1: Zhodnocení tvrdého prahování

prahová úroveň	V_1				V_2			
	db2	db4	db6	dmey	db2	db4	db6	dmey
max. D_x (-)	0,994	0,989	0,978	0,981	0,967	0,976	0,966	0,984
max. SNRE (db)	25,97	37,76	35,18	37,59	24,70	24,59	19,33	19,72
min. A_f (%)	9	7	9	5	13	9	20	2
min. k (-)	1,35	2	1,1	1,4	1,35	4,5	1,4	1,4

Tab. 2: Zhodnocení kompromisního prahování

prahová úroveň	V_1				V_2			
	db2	db4	db6	dmey	db2	db4	db6	dmey
max. D_x (-)	0,99 1	0,99 1	0,98 9	0,991	0,9 59	0,96 7	0,98 2	0,976
max. SNRE (dB)	26,7 6	32,8 8	31,0 9	31,83	26, 70	32,9 8	30,3 4	30,81
min. A_f (%)	8	6	9	5	13	10	20	10
min. k (-)	1,35	2	1,1	1,4	1,3 5	4,5	1,4	1,4
min. α_v (-)	0,16	0,22	0,18	0,2	-	-	-	-

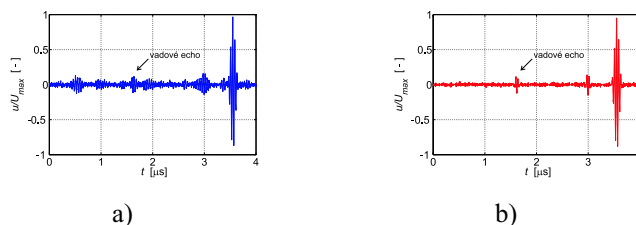
Tab. 3: Zhodnocení uživatelského prahování

prahová úroveň	V_1			
	db2	db4	db6	dmey
max. D_x (-)	0,869	0,820	0,887	0,820
max. SNRE (dB)	26,88	35,72	29,38	32,23
min. A_f (%)	9	7	11	6
k (-)	1,35	2	1,1	1,4
α_v (-)	0,16	0,22	0,18	0,2
τ_v (-)	0,03	0,04	0,03	0,03

Po zhodnocení všech kombinací uvedených matečních vlnek, prahovacích funkcí a prahových úrovní se ukázalo, že vhodný způsob filtrace ultrazvukových signálů pomocí vlnkové transformace je:

- použitím diskretní Meyerovy mateční vlnky a vlnky Daubechie čtvrtého řádu, které také nejméně vizuálně zkreslují ultrazvukový signál a filtrovaný signál vykazuje menší pokles amplitudy, než u ostatních vlnek,
- využitím tvrdého prahování, případně prahování kompromisního, u něhož se hodnoty parametru α blíží k nule, což téměř odpovídá tvrdému prahování,

- volbou navržené prahové úrovně V_2 , pomocí které lze filtrovat i signály s malým vadovým echem (do 5 % koncového echa). Optimální násobící konstanta k se pohybuje v rozmezí od 1,1 do 2 v závislosti na použité vlnce.



Obr. 3: Aplikace DWT na simulovaném signálu s 5% amplitudou vadového echa: a) simulovaný signál, b) filtrovaný signál

Další metodou použitou v disertační práci je metoda slepé separace signálu. Algoritmus slepé separace signálu vychází z algoritmu nezávislé analýzy komponent. Cílem algoritmu ICA je vyjádřit množinu náhodných proměnných jako lineární kombinaci statisticky nezávislých komponent. Jelikož tato metoda prozatím nemá v ultrazvukové defektoskopii praktické uplatnění, bylo velice aktuální použitelnost této metody detailně analyzovat.

Základním cílem pro algoritmy slepé separace signálu je odhad signálů jednotlivých vstupních proměnných x_j , za předpokladu, že máme k dispozici pouze časovou posloupnost změřených výstupních veličin y_i . V případě ultrazvukových signálů je důležité stanovit, které signály jsou zdrojové. První zdrojový signál je zastoupen vadovým echem, koncovým echem a strukturálním šumem. Za druhý zdrojový signál lze považovat šum daný elektronickými obvody a přírodními kabely. Cílem použití metody slepé separace signálu je tyto dva zdrojové signály ze zaznamenaných signálů odseparovat. Pokud bude tato situace uvažována při ultrazvukovém testování, lze základní model slepé separace signálu naznačit matematickým vyjádřením:

$$\begin{aligned} y_1 &= a_{1s}x_s + a_{1n}n_e \\ y_2 &= a_{2s}x_s + a_{2n}n_e \end{aligned} \quad (3)$$

Při aplikaci této rovnice na reálný případ záznamu pomocí ultrazvukových sond, je nutné dvě ultrazvukové sondy umístit vedle sebe. Při záznamu ultrazvukových signálů se ovšem jedná o rozdílné strukturální odrazy x_s a rozdílné šумы n_e . Aby byl splněn hlavní předpoklad (3) metody slepé separace signálů, muselo by platit: $x_{1s} = x_{2s}$ a $n_{1e} = n_{2e}$. Pokud bude praktická situace záznamu signálů detailně analyzována, pak je nutné uvést závěry:

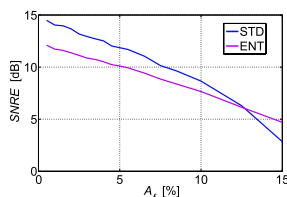
1. Pokud budeme uvažovat měření v jednom bodě jednou sondou, bude se jednat o stejné zdrojové signály a $x_{1s} = x_{2s}$, a stejný zdroj elektronického šumu $n_{1e} = n_{2e}$.
2. Pokud budeme uvažovat měření ve dvou bodech se dvěma sondami, pak platí $x_{1s} \neq x_{2s}$ a $n_{1e} \neq n_{2e}$, a není tedy splněn základní předpoklad (3). Metoda slepé separace nemůže být použita.

Strukturální odrazy x_s nemohou být stejné, protože se signály zaznamenávají v různých místech. Pokud by zdrojové signály byly stejné, znamenalo by to, že struktura materiálu je stejná.

Z tohoto rozboru jednoznačně vyplývá, že metoda slepé separace signálu v uvedené formulaci problému při ultrazukovém testování nemůže být použita.

Dále byla analyzována metoda Wienerovy filtrace s vhodným návrhem přenosové funkce Wienerova filtru využitím skupinového zpoždění fázové frekvenční charakteristiky. Hlavním důvodem využití skupinového zpoždění je to, že užitečný signál má konstantní skupinové zpoždění v určitém frekvenčním pásmu. Algoritmy výpočtu charakteristik vyplývající ze skupinového zpoždění jsou založeny na směrodatné odchylce a entropii signálu. Stručně lze dopad výpočtu pro jednotlivé metody uvést následovně. Pokud je skupinové zpoždění konstantní, pak je směrodatná odchylka nulová, nebo velmi malá. Pokud je skupinové zpoždění náhodné, nabývá směrodatná odchylka kladných hodnot. Frekvenční rozsah signálu obsahující užitečný signál má malou hodnotu entropie, zatímco náhodná složka signálu (šum) má hodnotu entropie velkou. Důležitým krokem byl v případě správného výpočtu odhad velikosti frekvenčního okna a prahové úrovně. Principem použití prahové úrovně bylo potlačení frekvenčních složek signálu zastupujících šum. Bylo tedy nutné zvolit správnou prahovou úroveň. Výsledný filtr odpovídal průběhu pásmové propusti. Na základě těchto úvah bylo opět provedeno zhodnocení navržených postupů. V simulovaném ultrazukovém signálu byla měněna velikost amplitudy vadového echa v rozmezí 1 až 100 % amplitudy počátečního echa. Po zhodnocení filtrace bylo stanoveno, že nejlepší výsledků bylo dosaženo použitím Hammingova okna s prahovou úrovní odpovídající 40 % maximální hodnoty frekvenční charakteristiky. Velikost okna odpovídala 9 MHz, což odpovídalo frekvenční charakteristice použité ultrazukové sondy. Dále bylo nutno stanovit, která z navržených metod (směrodatná odchylka – STD, entropie – ENT) dosahuje lepších výsledků pro různé velikosti vadového echa. Pro hodnocení byl opět použit parametr hodnotící zlepšení odstupu signálu od šumu SNRE. Výsledek zhodnocení je uveden na obr. 4.

Podle dosažených výsledků je účinnější Wienerův filtr odvozený ze směrodatné odchylky skupinového zpoždění. Hodnoty SNRE jsou pro menší velikosti vadových ech A_f (do 20 %) vyšší.

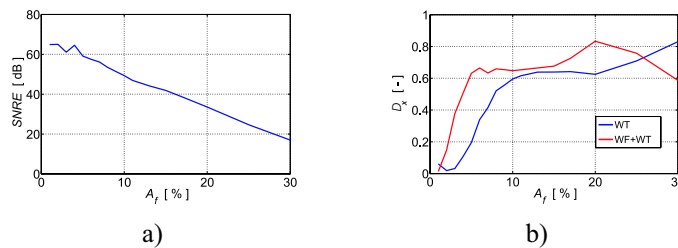


Obr. 4: Porovnání algoritmů Wienerova filtru

Podle tvaru přenosových funkcí Wienerova filtru se spíše jedná o filtry typu pásmová propust, kdy filtr potlačí frekvence mimo frekvenční pásmo sondy. V případě ultrazukového signálu dochází k potlačení elektronického šumu, nikoli šumu strukturního. Frekvence strukturního šumu totiž odpovídá frekvenci použité frekvenční sondy a tedy i propustnému pásmu Wienerova filtru. Jelikož lze potlačit pouze frekvenční složky signálu odpovídající

elektronickému šumu, nelze pomocí tohoto filtru stanovit možnost detekce vadového echa. Vadové echo pod úrovní elektronického šumu lze ale efektivně zviditelnit.

Podle výsledků a závěrů dosažených při návrhu diskrétní vlnkové transformace a Wienerova filtru byl v rámci práce navržen nový druh filtrace. Pomocí diskrétní vlnkové transformace lze účinně potlačit strukturní i elektronický šum (jedná se o nelineární prahování koeficientů v časové oblasti). Naopak pomocí Wienerova filtru lze efektivně lineárně potlačit pouze elektronický šum (jedná se o prahování amplitud ve frekvenční oblasti). Hlavním cílem je tedy zviditelnit i menší vadová echa (< 5 % amplitudy počátečního echa). Zhodnocení uvedené kaskádní filtrace bylo provedeno výpočtem hodnoty zlepšení odstupů signálu od šumu pro různé velikosti relativní hodnoty amplitud vadových ech v rozsahu 1 až 30 % maximální amplitudy počátečního echa. Graf zhodnocení uvedeného postupu potlačení šumu je zobrazen na obr. 5a. Hodnoty $SNRE$ jsou daleko vyšší než v případě aplikace jednotlivých metod WF a WT a dosahují až 70 dB. Potlačení šumu uvedenou kombinací algoritmů je tedy účinnější. Výborných výsledků bylo dosaženo i při detekci vadového echa. V grafu uvedeném na obr. 5b je srovnání detekce vadového echa pomocí metody WT a navrženou kaskádní filtrací. Jak je vidět v grafu, hodnoty parametru D_x jsou vyšší i pro malé amplitudy vadového echa.



Obr. 5: Zhodnocení potlačení šumu kaskádní filtrací: a) $SNRE$, b) detekce vadového echa

Z grafu tedy vyplývá, že vadové echo je bezpečně detekovatelné ($D_x > 0,3$) od velikosti 2,7 % maximální amplitudy počátečního echa.

ZÁVĚR

Zhodnocením metody vlnkové transformace byl stanoven závěr, že lze účinně potlačit šum a detekovat vadové echo, jehož amplituda je srovnatelná s úrovní efektivní hodnoty šumu. Navrženým Wienerovým filtrem lze účinně potlačit pouze elektronický šum a případně zviditelnit vadové echo. Avšak z uvedeného přehledu aplikace pokročilých metod zpracování ultrazvukového signálu bylo dosaženo nejlepších výsledků navrženou kombinací metod diskrétní vlnkové transformace a Wienerova filtru s vhodně navrženými parametry. Pomocí této kaskádní filtrace je možno detekovat vadové echo, jehož amplituda je pod úrovní efektivní hodnoty šumu v ultrazvukovém signálu.

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum “Návrh a ověření metod pro potlačení šumu v ultrazvukovém signálu” byl podpořen výzkumným programem č. MSM6840770015 – “Research of Methods and Systems for Measurement of Physical Quantities and Measured Data Processing” sponzorovaným Ministerstvem školství a tělovýchovy České Republiky.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Krautkramer J., Krautkramer H.: *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer-Verlag, 4th fully revised edition, 1990, 670 p., ISBN 3-540-51231-4.
- [2] Gustafsson M. G., Stepinski T.: Studies of Split Spectrum Processing, Optimal Detection, and Maximum Likelihood Amplitude Estimation Using a Simple Clutter Model. *Ultrasonics*, Elsevier: Vol. 35, 1997, p. 31–52.
- [3] Zhenqing Liu, Mingda Lu, Moan Wei: Structure Noise Reduction of Ultrasonic Signals Using Artificial Neural Network Adaptive Filtering. *Ultrasonics*, Elsevier: Vol. 35, 1997, p. 325–328.
- [4] Salazar A., Gosalbez J., Igual J., Llinares R., Vergara L.: Two Applications of Independent Component Analysis for Non-Destructive Evaluation by Ultrasounds. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier: Vol. 19, p. 1312–1325, 2005.
- [5] Lázaro J. C., San Emeterio J. L., Ramos A., Fernandez-Marraon J. L.: Influence of Thresholding Procedures in Ultrasonic Grain Noise Reduction Using Wavelets. *Ultrasonics*, Elsevier: Vol. 40, p. 263–267, 2000.
- [6] Qingkun Liu, Peiwen Que, Huawei Guo, Shoupeng Song, Tao Han: Denoising Ultrasonic Signals Using Blind Source Separation: Computer Simulation. *Proceedings of IEEE Ultrasonic symposium*, Vancouver: 2005, p. 1805–1807.
- [7] Salazar A., Gosalbez J., Igual J., Llinares R., Vergara L.: Two Applications of Independent Component Analysis for Non-Destructive Evaluation by Ultrasounds. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier: Vol. 19, p. 1312–1325, 2005.
- [8] Xing Li, Bilgutay N. M.: Wiener Filter Realization for Target Detection Using Group Delay Statistics. *IEEE Transactions on Signal Processing*: Vol. 40, No. 6, 2002.

Ing. Václav Matz
CVUT, FEL, Katedra měření
Technická 2, Praha 6, 166 27
e-mail: vmatz@seznam.cz
Tel: +420-22435 2346

Doc. Ing. Marcel Kreidl, CSc.
e-mail: kreidl@feld.cvut.cz

Ing. Radislav Šmíd, Ph.D.
e-mail: smid@feld.cvut.cz