

Vyhodnocování signálu při ultrazvukovém SHM

Jakub Pařez, ČVUT, DIT

Abstrakt—Cílem této práce bylo vyvinout efektivní algoritmus pro vyhodnocení vzájemného posunu signálů získaných při ultrazvukovém SHM metodou UGW. Princip použité metody je založen na identifikaci lokálních maxim, jejich proložením vhodným průběhem a nalezením globálního maxima tohoto průběhu. K interpolaci maxim byly zvoleny 3 různé techniky (PLI, CSI a ECI). Posun signálů se následně využije k detekci delaminace testovaného kompozitního materiálu. Výsledek je distribuován formou knihovny v jazyce C navržené tak, aby splňovala obecné OOP paradigma. Vstupní i výstupní data jsou ve formátu CSV, toho je využito při následné analýze v prostředí MATLAB. Knihovna byla úspěšně testována v systému Linux.

Klíčová slova—algoritmus, analýza signálu, CSI, CSV, ECI, interpolace, jazyk C, knihovna, Linux, lokální maximum, MATLAB, NDT, OOP, obálka, PLI, SHM, UGW, ultrazvuk, UT.

I. ÚVOD

DETEKCE poškození a především prevence je důležitou součástí většiny odvětví průmyslu, kdy například v letectví či v kosmonautice se jedná o nezbytný a klíčový prvek. Moderní SHM metody využívající principy NDT (nedestruktivního testování) jsou poslední dobou čím dále více akcentovány jak ve vědeckém prostředí, tak v praxi.

Nedestruktivní testování má za cíl odhadnout zbytkovou životnost nebo riziko spojené s užíváním konkrétní věci. Jinými slovy, za pomoci neinvazivních technik objevit skryté vady, které by standardními metodami šly odhalit pouze (částečnou) destrukcí dané věci. Historie NDT se datuje většinou k roku 1895, kdy byl objeven rentgen, a začala tak nová éra nahlížení do objektů bez jejich poškození. Dnes se běžně nedestruktivně diagnostikuje například pomocí elektromagnetických, akustických, optických, radiografických či termických metod.

Obecnou kvalitu testu zvyšuje vhodná kombinace zmíněných technik, nicméně platí, že s růstem komplexity roste i obtížnost, a tedy i vyžadovaná odborná kvalifikace a *know-how*. To platí u NDT především, protože téměř vždy se nejedná o jednoduché a přímočaré řešení. Při návrhu takového systému je nejprve nutné analyzovat situaci, vybrat skupinu testovaných fyzikálních principů, vyvinout testovací metodu a sestavit měřicí řetězec. V dalších krocích se data měří a následně vyhodnocují.

Není ovšem zaručeno, že data musí mít relevantní vypovídající hodnotu, nebo že výsledek bude zcela průkazný. Jelikož se někdy hledají indicie, prokazující změnu materiálu ještě před tím, než k ní dojde, je nutné postupovat velmi obezřetně a s jistým nadhledem a zkušenostmi. Z toho vyplývá,

že NDT může být časově, finančně i personálně velice náročné. Na druhou stranu ale dokážete předpovídat kritické selhání systémů a tím šetřit náklady nebo i zachraňovat lidské životy.

II. ULTRAZVUKOVÉ SHM

Ultrazvukové nedestruktivní testování využívá zvukové vlny o vyšších frekvencích, než které dokáže slyšet člověk, a to od zhruba 20 kHz do desítek až stovek MHz. Toto vlnění je vysíláno do testovaného materiálu, kterým částečně prochází a částečně se od něj odráží. Existují různé metody, například UT (*Ultrasonic Testing*) nebo UGW (*Ultrasonic Guide Wave testing*).

Při metodě UT se testovací řetězec většinou skládá z generátoru signálu, vysílače, přijímače a signálového analyzátoru. Generátor a analyzátor bývá klasicky tvořen jedním zařízením, které je vzhledově podobné osciloskopu. Vysílač a přijímač lze použít kombinovaný nebo duální, nejčastěji se dnes pro tyto účely využívá piezoelektrického jevu. Křemíková membrána konvertuje elektrickou energii na mechanickou, a slouží tak jako klíčový prvek pro vysílání i příjem akustického signálu. Princip spočívá ve vyslání vlny do testovaného materiálu a v měření odrazů. Pokud je uvnitř homogenního předmětu trhlina, projeví se na obrazovce jako *peak* mezi dvěma *peaky*, které značí odraz od povrchu, respektive od spodní části objektu.

Metoda UGW se nejčastěji používá pro inspekci potrubí nebo pro detekci delaminace objektů. Je založena na propagaci podélné (*Lamb*) vlny povrchem (nebo těsně pod povrchem) testovaného materiálu z jednoho bodu do druhého. Se změnou tloušťky materiálu se mění i rychlost šíření ultrazvukové vlny. Díky tomu lze srovnáním referenčního a testovaného signálu zjistit i nepatrnou strukturální vadu.

III. DEFINICE PROBLÉMU

Získali jsme data z měření pomocí metody UGW. Jedná se o digitální vzorky ultrazvukové vlny, která prostoupila povrchem testovaného kompozitního objektu z bodu A do bodu B. Bylo naměřeno několik vln. První je referenční a odpovídá signálu bez jakýchkoliv strukturálních vad. Další vlny byly testovány na materiálech s určitým stupněm delaminace. Cílem je správně identifikovat a případně určit stupeň této delaminace.

Pouhým okem nelze o těchto datech zprvu nic říct. Je nutné srovnat naměřené vlny s referencí. Řešením tohoto problému spočívá v nalezení globálního maxima obálky signálů. Odečtením globálních maxim obálek naměřených vln od globálního maxima referenčního získáme posun konkrétního

signálu. O tuto hodnotu posuneme celou vlnu a vykreslíme ji do grafu společně s vlnou referenční. Nyní už je patrné, jestli došlo k defektu. Pokud vlna kopíruje referenci, pohybovala se stejnou rychlostí a materiál by měl být bez vad. V opačném případě došlo pravděpodobně ke změně tloušťky materiálu. Míru delaminace pak lze určit, pokud známe rychlosti šíření vln v obou materiálech.

Obálku signálů lze získat různými způsoby. Mezi ty nejpoužívanější patří filtrace typu dolní propust, Hilbertova transformace, korelace nebo interpolace lokálních maxim vhodným průběhem. Poslední zmíněná metoda byla zvolena pro použití v této práci.

IV. VÝBĚR VHODNÉ METODY INTERPOLACE

Identifikace lokálních maxim v diskretním signálu je triviální a jednoznačná. Jejich spojení ovšem triviální není. Existuje mnoho metod, kdy žádná není universální. Vždy záleží na dané situaci. Nejčastěji se lze setkat s konstantní, lineární, kubickou nebo *sinc* interpolací. V našem případě se jako vhodná jeví lineární a kubická. Pro srovnání také použijeme experimentální interpolaci ECI.

A. PLI — Piecewise Linear Interpolation

Lineární interpolace je po konstantní interpolaci nejjednodušší a nejrychlejší. Pro určení rovnice přímky mezi dvěma body stačí vědět souřadnice krajních bodů. V našem případě ji ani nemusíme vědět, protože hledáme globální maximum, a to se zcela jistě nachází v již známém bodu.

B. CSI — Cubic Spline Interpolation

Kubická interpolace je spojení bodů polynomy 3. stupně, které dohromady tvoří spojitou funkci se spojitými prvními i druhými derivacemi. Rozlišujeme *natural*, *clamped* a *not-a-knot* kubickou interpolaci. V našem případě zvolíme typ *natural*, který má druhou derivaci v prvním a v posledním segmentu rovnou 0. Kubická interpolace je oproti lineární náročnější na výpočet, pro každý segment je třeba řešit soustavu lineárních rovnic. Záleží také na množství interpolovaných bodů. Více bodů znamená delší výpočet, větší výsledný datový soubor, ale i věrnější rekonstrukci signálu. Méně bodů je rychlejší, avšak signál může být zubatý. Proto je důležité zvolit správný kompromis.

C. ECI — Extremum Center Interpolation

Tato metoda interpolace se převážně používá pro nalezení IMF komponent signálu, může být však zajímavé ji vyzkoušet pro vyhodnocení posunu. Střídavě se postupuje přes nalezené lokální maxima i minima. Vždy k jednomu lokálnímu extrému se nalezne komplementární bod ležící na průniku svislé přímky a přímky protínající dva opačné extrémy. Středy těchto bodů se následně spojí kubickou interpolací.

V. IMPLEMENTACE KNIHOVNY

Jazyk C je ideální volbou pro řešení podobných problémů. Od knihovny je požadována rychlost, determinismus, a portabilita. Pokud se postupuje správně, jazyk C vše splňuje. Knihovna se jmenuje *shm_shift.c* a je reprezentována objektem

shm_shift_t, který je typu *struct*. V této struktuře se nachází veškerá data. Především jde o pole objektů *signal* typu *struct*, které představují analyzované signály, a objekt *csv_parser*. I když se může zdát, že zpracování CSV souboru je triviální, je zbytečné znovu vynalézat kolo, když se může použít otestované a funkční řešení, zvláště když se jedná jen o podpůrnou funkcionalitu.

Struktura *signal* obsahuje jméno signálu, vstupní datové body, indexy lokálních extrémů, interpolované body, středy extrémů, globální maximum a minimum interpolovaného průběhu, a především posun signálů od referenčního v ose x.

Rozhraní knihovny se dá rozdělit do několika logických celků. Nejprve se musí objekt inicializovat, k tomu slouží funkce *create*. Dále se typicky přečte CSV soubor, analyzují se data a výsledek se zapíše do CSV souborů. K tomu se použije *read_csv*, *analyse_csv*, *write_csv*. Případně lze analyzovat signál přímo z dat z paměti pomocí funkce *analyse_signal*. Po ukončení je třeba korektně uvolnit dynamicky alokovaná data, aby se předešlo únikům paměti. Funkce *dispose_calc* uvolní data analýzy a interpolované body, *dispose_all* kromě toho také uvolní vstupní data a funkce *free* nakonec uvolní vše.

Knihovna zkompileovaná pomocí GCC zabírá 27 KB. Kromě standardní knihovny jazyka C nejsou použity žádné externí závislosti, lze ji tedy integrovat do různých prostředí včetně *embedded* systémů.

VI. POUŽITÍ KNIHOVNY V PRAXI

Použití v praktickém případě by mělo být přímočaré a jednoduché. Je třeba mít vstupní data reprezentující akustické signály ve správném formátu v CSV souboru, případně ideálně rovnou v paměti ve struktuře *signal*. Data jsou v CSV souboru uložena po sloupcích, kdy první řádek je textové jméno signálu a další řádky představují hodnoty osy y. Data osy x nejsou třeba, předpokládá se, že vzorky byly pořízeny ekvidistantně v čase.

TABULKA I
PŘÍKLAD VSTUPNÍCH DAT VE FORMÁTU CSV

D _{ref}	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
-45	-51	-61	-68	-43	-61
-43	-50	-59	-66	-42	-59
-42	-49	-57	-65	-40	-57

KÓD I
PŘÍKLAD POUŽITÍ KNIHOVNY

```
char* file_in = "./data/data.csv";           /* input file */
char* file_out = "./data/result";           /* output files */
char delim = ',';                           /* csv delimiter */
int ni = 10;                                /* number of interpolated points */
int ref_col = 0;                             /* number of reference signal column */

/** 1. create library object */
shm_shift_t* shm = shm_shift_create();

/** 2. read input data from CSV file */
int ret1 = shm_shift_read_csv(shm, file_in, delim);

/** 3a. analyse and write output CSV for PLI algorithm */
int ret2 = shm_shift_analyse_csv(shm, PLI, ref_col, 0);
int ret3 = shm_shift_write_csv(shm, file_out, delim);

/** 3b. dispose, analyse and write CSV for CSI algorithm */
shm_shift_dispose_calc(shm);
int ret4 = shm_shift_analyse_csv(shm, CSI, ref_col, ni);
int ret5 = shm_shift_write_csv(shm, file_out, delim);

/** 4. finally clean up all */
shm_shift_free(shm);
```

Kromě výsledných interpolovaných průběhů signálů nás nejvíce zajímá hodnota $shift_x_max$. S ní lze samozřejmě dále pracovat v jazyce C a vytvořit tak systém pro *online* SHM. V našem případě postačí importovat získaná data do prostředí MATLAB a pracovat tak *offline*.

Výsledný posun konkrétního signálu od referenčního nyní stačí odečíst. Takto upravený signál spolu s referenčním vykreslíme do grafu. Pokud jsme zvolili vhodné parametry testovací vlny, vygenerovali a naměřili ji správně, a zvolili vhodnou metodu interpolace, můžeme z grafu určit, zdali došlo u materiálu k delaminaci.

KÓD II

PŘÍKLAD ANALÝZY VÝSLEDKŮ V PROSTŘEDÍ MATLAB

```
path = "../data/"; % directory with csv files
prefix = "data"; % prefix of those files
data = readtable(path + prefix + ".csv"); % read csv files
results_pli = readtable(path + prefix + "_results_pli.csv");
results_csi = readtable(path + prefix + "_results_csi.csv");

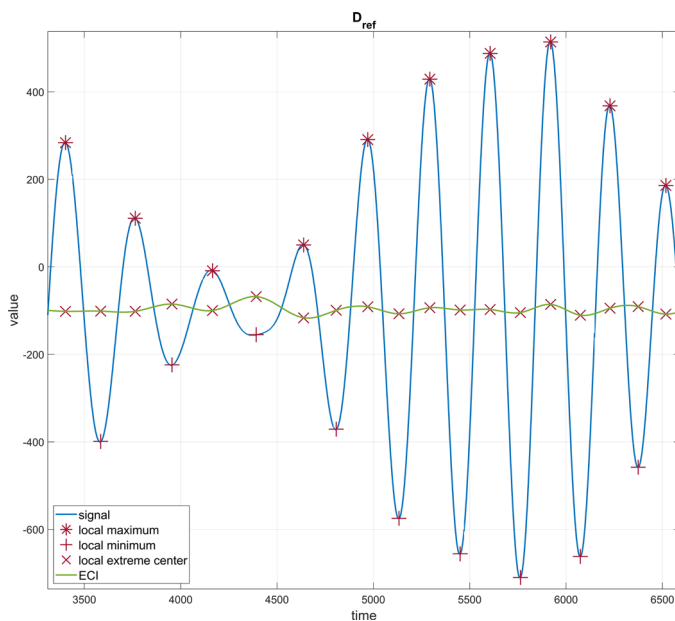
% plot signals
for i = 2:size(data, 2)
    figure; % create figure
    x = i * 5; % shift_x_max is in multiples of five
    shift_pli = results_pli(x); % get shift of PLI alg
    shift_csi = results_csi(x); % get shift of CSI alg

    % plot data
    plot(1:size(data,1), data(1)); % plot original signal
    hold on; % enable multiple plots
    grid on; % show grid
    plot(1:size(data,1) - shift_pli, data(1)); % plot PLI shifted sig.
    plot(1:size(data,1) - shift_csi, data(1)); % plot CSI shifted sig.

    % set figure properties
    name = data.Properties.VariableNames(i); % get sig. name
    title(string(replace(name, '_', '_(') + ')')); % title
    xlabel('time'); % axis x label
    ylabel('value'); % axis y label
    legend('reference', 'shifted (PLI)', 'shifted (CSI)'); % legend
end
```

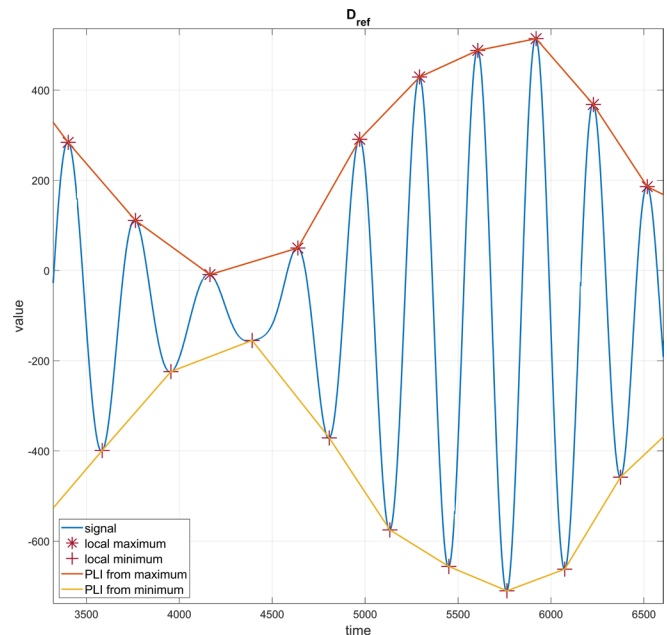
VII. ANALÝZA POUŽITÝCH METOD

Metoda ECI (*Obr. 1*) se ukázala jako nepoužitelná. U 6 z 10 vzorků určila globální maximum špatně. Potvrdilo se, že se hodí především pro rozklad signálu na IMF funkce, například při Hilbert Huangově transformaci.



Obr. 1. Interpolace středů lokálních extrémů metodou ECI (zelená).

Lineární PLI interpolace (*Obr. 2*) má své přednosti především v rychlosti. Střední hodnota referenčního signálu o 10300 vzorcích trvala vypočítat na testovacím PC (*Intel i7 Ivy Bridge* 2.7 GHz) s OS *Linux Ubuntu* zhruba 13 μ s. PLI interpolace na stejné sestavě trvala zhruba 37 μ s. Je však třeba říct, že se v podstatě o žádnou interpolaci nejedná. Jak již bylo zmíněno, v případě PLI stačí identifikovat lokální extrémy a globální maximum z již dostupných datových bodů. Není třeba vytvářet uměle další. Výsledný poměr doby výpočtu algoritmu vůči doby výpočtu střední hodnoty činí 2.9. Na rozdíl od CSI a ECI tato hodnota není závislá na počtu interpolovaných bodů.



Obr. 2. Interpolace metodou PLI. Oranžovou je značeno spojení lokálních maxim, žlutou spojení lokálních minim.

TABULKA II

SROVNÁNÍ RYCHLOSTI KNIHOVNY PŘI POUŽITÍ RŮZNÝCH METOD

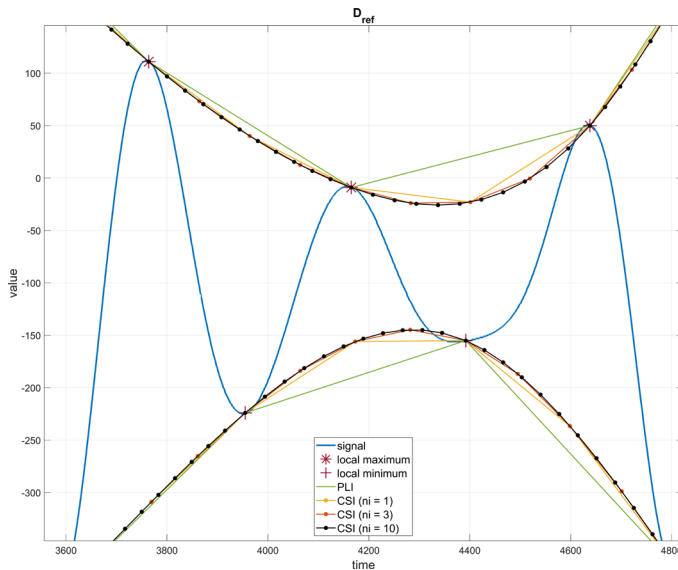
ni	mean (μ s)	PLI (μ s)	CSI (μ s)	ECI (μ s)	PLI (koef.)	CSI (koef.)	ECI (koef.)
100	12.6	36.5	63.3	214.9	2.89	5.04	17.10
10	12.5	36.2	46.9	60.9	2.90	3.75	4.87
3	12.7	36.9	44.4	54.3	2.89	3.49	4.27
1	12.9	37.1	39.7	51.5	2.89	3.09	4.01

Uvedené hodnoty platí pro signál s 10300 vzorky. Jde o průměr ze 100 měření. Sloupec ni značí počet interpolovaných bodů a pro metodu PLI nemá smysl. V levé části je doba trvání v μ s. V pravé části je poměr doby trvání vůči délce trvání výpočtu střední hodnoty, která je uvedena ve druhém sloupci *mean*.

Metoda CSI je pomalejší než PLI o jednotky mikrosekund, za to poskytuje nesrovnatelně kvalitnější výsledky. Pro 1 bod trval výpočet zhruba 40 μ s a koeficient rychlosti činil 3.1, pro 10 bodů to bylo 46.9 μ s a koeficient byl 3.8. Pro 100 interpolovaných bodů narostla doba trvání algoritmu na 63.3 μ s s koeficientem rychlosti rovném 5.0. Mohlo by se zdát, že množství interpolovaných bodů výrazně ovlivní celkovou rychlost. Ve skutečnosti se ale jedná o jednotky mikrosekund. Pro online analýzu (například v *embedded* zařízení) by to byl jistě relevantní faktor, v našem případě to ale nehraje žádnou roli. Velikost pole interpolovaného signálu je přímo úměrná diskutovanému parametru ni , konkrétní hodnota lze vypočítat jako $[(1 + ni) \cdot pts] - ni$. Množství interpolovaných bodů je

značeno jako *pts*, v našem případě se jedná o počet lokálních maxim, respektive minim.

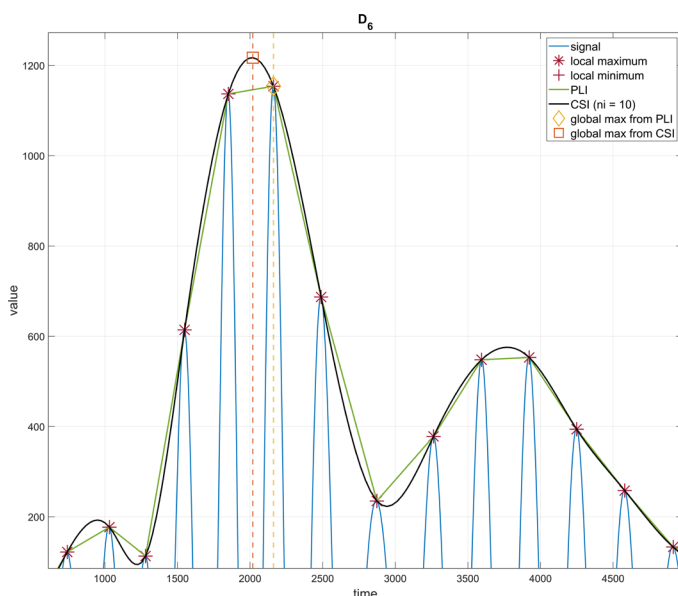
Z Obr. 3 je patrné, že 1 ani 3 body nejsou pro správnou analýzu nedostatečné. Pro konkrétní vstupní data se zdá být 100 bodů zbytečně příliš mnoho, proto zvolíme 10 bodů jako výchozí hodnotu pro další výpočty.



Obr. 3. Interpolace metodou CSI. Žlutě je značeno použití 1 interpolačního bodu, oranžově 3 bodů, černě 10 bodů a zeleně je pro srovnání značena interpolace PLI.

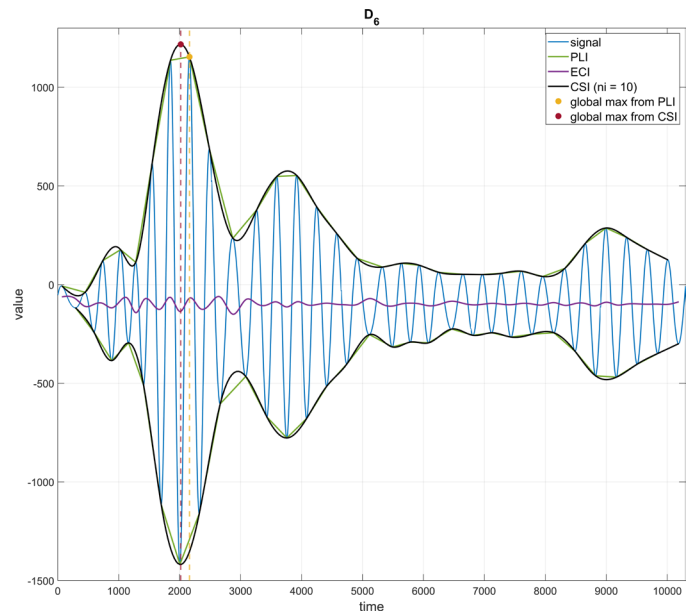
VIII. IDENTIFIKACE DELAMINACE

Nyní už máme téměř vše potřebné k tomu, abychom mohli identifikovat delaminaci testovaného materiálu. Použijeme metodu CSI s 10 interpolačními body a získáme globální maximum obálky signálu. Na Obr. 4 můžete vidět, jak se liší globální maximum v případě použití metody PLI a CSI. Lineární interpolace poskytne zkreslenou představu o tom, kde se ve skutečnosti nachází globální maximum.



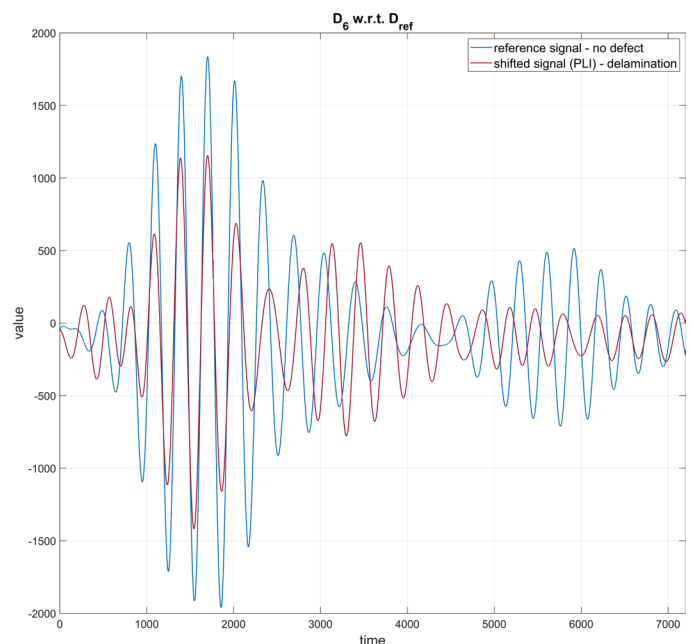
Obr. 4. Srovnání globálního maxima určeného pomocí metody CSI (oranžový čtverec) a pomocí metody PLI (žlutý kosočtverec napravo).

Tvar výsledné obálky není důležitý. Pro ilustraci podoby generované ultrazvukové vlny lze pozorovat Obr. 5.



Obr. 5. Obálka testovaného signálu generovaná metodou CSI (černá). Pro srovnání je zeleně vyznačena PLI interpolace a fialově ECI interpolace.

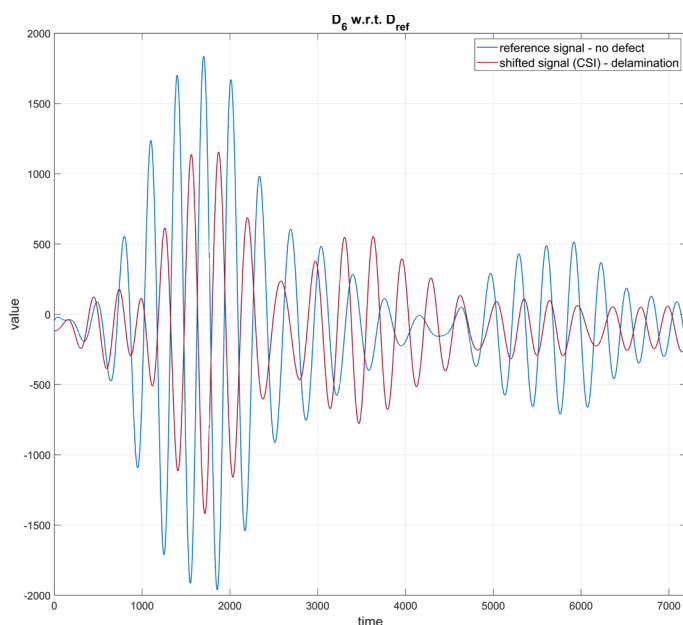
Posledním krokem je odečtení získaného posunu od testovaného signálu a zanesení do grafu spolu s referencí. Zde se výrazně promítne použitá interpolační metoda, protože ta určuje globální maximum, ze kterého se počítá posun. V případě lineární interpolace dojde kvůli nepřesnému určení globálního maxima ke zkreslení výsledků. Vlny jsou zarovnány podle maximální hodnoty, což vede k chybné lokalizaci delaminace materiálu. Lze to pozorovat na Obr. 6. V levé části jde vidět překryv obou vln, značící stejnou rychlost propagace a tím i nepřítomnost vady, což je ale špatně, protože se jedná o vzorek s přítomnou delaminací.



Obr. 6. Nepřesný výsledek SHM analýzy kvůli použité PLI interpolaci.

Správné určení globálního maxima, respektive posunu signálu od referenčního, je pro tuto ultrazvukovou SHM analýzu naprosto klíčové. Pokud při ní dojde k chybě, je pak snadné vyvodit špatné závěry z výsledných grafů. Proto je třeba zvolit interpolační metodu CSI a správně nastavit potřebné parametry. Metody PLI a ECI jsou určeny pouze pro porovnání a experimentování.

Čas na ose x odpovídá šíření vlny povrchem materiálu z bodu A do bodu B. Pokud jsme postupovali správně, máme v grafu zanesenou referenční vlnu (materiál bez defektů) a testovanou vlnu (materiál s delaminací). Navíc máme obě vlny srovnány podle globálního maxima obálky. To nám umožňuje určit, zdali a kde došlo k delaminaci kompozitního materiálu, protože víme, že akustický signál se šíří různou rychlostí v závislosti na tloušťce materiálu. Rychlost šíření podélných vln v tuhých látkách závisí na poměru vlnové délky a rozměrů prostředí. V praxi by bylo třeba ještě nutné kompenzovat vliv teploty. Poškozeným (tenčím) materiálem tedy vlna proběhne rychleji. Na Obr. 7 můžeme vidět delaminovaný (červený) a referenční (modrý) vzorek. Abychom určili konkrétní hodnotu delaminace, potřebovali bychom znát více údajů, minimálně typ materiálu a frekvenci testovací vlny.



Obr. 7. Výsledek SHM analýzy s použitou CSI interpolací. Posun testované červené vlny oproti referenční modré ukazuje na delaminaci kompozitního materiálu.

IX. ZÁVĚR

Ultrazvukové SHM patří mezi moderní techniky se značným potenciálem, jak testovat kompozitní materiál a detekovat v něm strukturální vady. K zarovnání referenčního a testovaného vzorku lze přistupovat mnoha způsoby. Bylo by zajímavé porovnat výsledky této metody například s Hilbertovou transformací nebo filtrací typu dolní propust. Kubická interpolace, respektive její globální maximum, je dle

mého názoru kvalitní a rychlá metoda, která by v porovnání s ostatními rozhodně nezaostávala.

Vyvinutá knihovna je použitelná pro *offline* ultrazvukové SHM testování, je však nutné použít metodu CSI s minimálně 10 interpolačními mody. Pro *online* testování je třeba implementovat poslední krok, který je v této práci naznačen v prostředí MATLAB. Po odečtení posunu od testované vlny odečíst takto vzniklou vlnu od referenčního signálu. Vzniklý rozdíl symbolizuje změnu času průchodu vlny přes materiál s anomálií a lze přepočítat například na milimetry.

REFERENCE

- [1] L. Michalcová and R. Hron, "Quantitative Evaluation of Delamination in Composites Using Lamb Waves", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 326, p. 012006, 2018. Available: 10.1088/1757-899x/326/1/012006 [Accessed 16 June 2020].
- [2] "Ultrasonic Testing", Nde-ed.org, 2020. [Online]. Available: www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/. [Accessed: 16- Jun- 2020].
- [3] J. Šplichal and J. Hlinka, "Modelling of health monitoring signals and detection areas for aerospace structures", 13th Research and Education in Aircraft Design: Conference proceedings, 2019. Available: 10.13164/conf.read.2018.17 [Accessed 16 June 2020].
- [4] Y. Yang, "A Signal Theoretic Approach for Envelope Analysis of Real-Valued Signals", IEEE Access, vol. 5, pp. 5623-5630, 2017. Available: 10.1109/access.2017.2688467.
- [5] E. Tarpara and V. Patankar, "Real time implementation of empirical mode decomposition algorithm for ultrasonic nondestructive testing applications", Review of Scientific Instruments, vol. 89, no. 12, p. 125118, 2018. Available: 10.1063/1.5074152.
- [6] Z. Liu and Z. Zhang, "The Improved Algorithm of the EMD Decomposition Based on Cubic Spline Interpolation", Signal Processing Research, vol. 4, no. 0, p. 63, 2015. Available: 10.14355/spr.2015.04.011.