



LOKALIZACE A IDENTIFIKACE ZDROJŮ AE POMOCÍ ČASOVÉ REVERZNÍCH ZRCADEL

LOCALIZATION AND IDENTIFICATION OF AE SOURCES BY THE HELP OF TIME REVERSAL MIRRORS

Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Josef KROFTA, Milan CHLADA, Zuzana FAROVÁ

Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.

e-mail: zp@it.cas.cz

Abstrakt

Přesná a spolehlivá lokalizace s následnou identifikací zdroje akustické emise (AE) jsou jedněmi z nejdůležitějších, ale také nejobtížnější řešitelných inverzních problémů v diagnostice materiálů a konstrukcí metodou AE. V příspěvku je navržen nový přístup k řešení těchto problémů, využívající vlastnosti časově reverzních zrcadel (TRM) při zpracování signálu AE. Zaznamenaný signál ze snímačů AE je uvažován jako výsledek vícenásobné konvoluce zdrojové funkce s přenosovou funkcí snímačů a aparatury a přenosovou (Greenovou) funkcí prostředí, v němž se šíří elastická vlna od zdroje ke snímačům. Znalost přesné polohy emisního zdroje a zdrojové funkce je důležitým předpokladem k jeho správnému hodnocení. Nová off-line metoda řešení inverzních problémů pomocí TRM, označovaná jako TRAED (Time Reversal AE Deconvolution), je experimentálně nenáročná a nevyžaduje kalibraci ani žádné znalosti o materiálových či geometrických charakteristikách monitorované konstrukce. Její použití, výhody i omezení jsou v příspěvku demonstrovány na jednoduchých experimentech s umělými emisními zdroji (Pen-testy, definované UZ pulzy) na rozměrné ocelové desce. Výsledky testů prokazují efektivitu této metody, umožňující např. lokalizaci zdroje AE s milimetrovou přesností, eliminaci vlnové disperse či minimalizaci rozptylu parametrů emisního signálu. Pokud je pro danou konstrukci k dispozici spolehlivý model simulace šíření elastických vln, lze TRAED aplikovat v tomto modelu i bez dodatečných experimentů.

Klíčová slova: Akustická emise, časově reverzní zrcadla, lokalizace zdroje AE, dekonvoluce signálu.

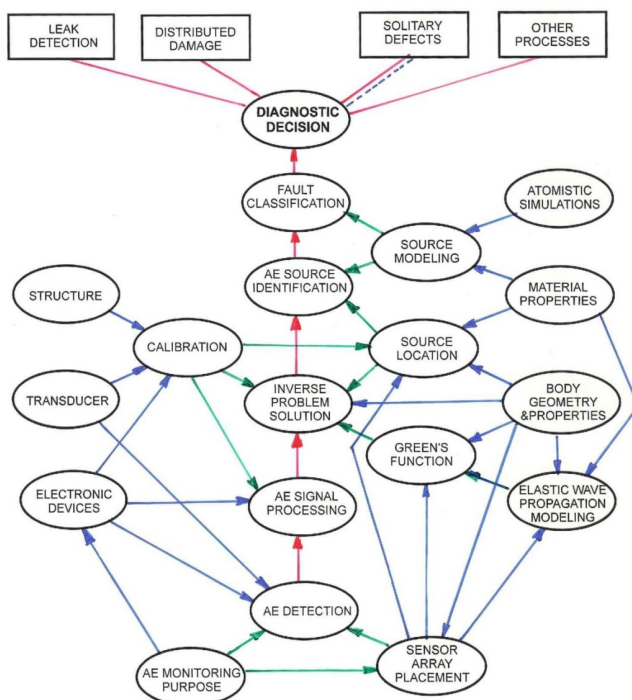
Abstract

Reliable identification and classification of already localized AE sources is one of the most important and also most difficult problems in AE monitoring. In this paper we suggest new concepts of more precise AE source localization and identification in complex structures. The method is based on a Time Reversal (TR) AE signal processing. AE signals, recorded by transducers relatively far from the source can be generally considered as a multiple convolution of the source function with the Green's (wave transfer) function and transfer function of sensors connected to signal processing devices. The new offline procedure, called TRAED (TR AE signal Deconvolution) is relatively simple and doesn't require any knowledge on the structure material and geometry. Its use, merits, and limits are demonstrated on examples of artificial AE sources (PE-Tests, defined US pulses) acting on large steel plate. Results show effectiveness of both inverse problems solution dealing with precise source location and partial reconstruction of the source function. TRAED also removes effects of wave dispersion and e.g. minimizes scatter of AE signal parameters. If we have good simulation model of elastic wave propagation in monitored structure, then the method can be applied to this model without any additional experiments.

Key words: Acoustic emission, time reversal mirrors, AE source location, signal deconvolution.

1. Úvod

Otázka o podstatě zdrojů AE v monitorované konstrukci je stejně stará jako AE metoda. Pokroky v analýze jevu AE za uplynulých 10 let, jak v teoretickém popisu, tak v experimentální technice umožňují lépe charakterizovat emisní zdroje, což vede k rostoucímu zájmu o využívání této techniky při monitorování okamžitého stavu testované konstrukce (SHM - Structural Health Monitoring). Metoda AE, označovaná v NDT jako AT, je dnes díky určité standardizaci zkoušení rovnocenná s ostatními NDT metodami a její aplikace v praxi vyžadují certifikovaný personál – v ČR byly také již před 2 roky zahájeny odpovídající certifikační kurzy a zkoušky. K zodpovědnému diagnostickému posuzování původu a nebezpečnosti detekovaných emisních zdrojů však stále zůstává otevřená celá řada komplexních problémů, které byly formulovány již před 10 lety na 25. mezinárodní konferenci EWGAE v Praze a jejichž vzájemné souvislosti lze charakterizovat např. schématem v Obr.1 [1]. Tyto problémy lze shrnout do tří základních úloh týkajících se zdrojů AE: 1. Detekce a kvantifikace, 2. Lokalizace a 3. Identifikace.



Obr.1: Hlavní problémy v diagnostice metodou AE

Zatímco první dvě úlohy jsou dnes již do značné míry řešitelné normalizovanými postupy a moderními aparaturami, je úloha spolehlivé identifikace a původu emisního zdroje dosud jen obtížně řešitelná. Její obtížnost vyplývá

zejména ze skutečnosti, že snímači AE detekujeme elastické vlny emitované zdrojem a šířící se konstrukcí často na značnou vzdálenost od zdroje ke snímači. Přechodem konstrukcí z určitého materiálu se přichozí vlna deformuje, zejména jde-li o součást s komplikovanější geometrií, např. se změnami tloušťky, rozhraními, okraji, otvory, svary apod. Přijatý emisní signál neodpovídá funkci zdroje a jakákoliv analýza resp. parametrizace tohoto signálu může být pro identifikaci zcela zavádějící. To se týká nejen rozpoznávání zdrojů, ale často i jejich lokalizace. K získání nezkrácených informací o poloze a funkci zdroje je zapotřebí řešit inverzní problém (IP), tedy zjistit, jak vypadá emitovaná vlna přímo v místě zdroje.

Většina závažných problémů v soudobé metodice AE, včetně novějších přístupů k jejich řešení je podrobně rozebírána v přehledových knižních publikacích [2] a [3]. V tomto článku nastíníme nově navržený způsob řešení IP v oblasti AE pomocí t.zv. časově reversních zrcadel (TRM - Time Reversal Mirrors).

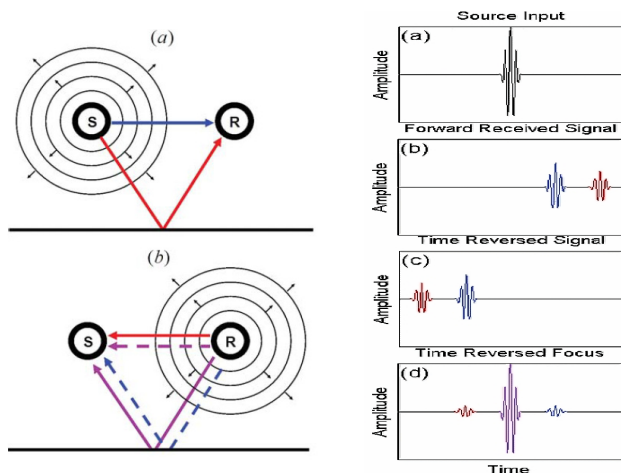
2. Řešení Inverzních problémů při analýze zdrojů AE

Pro lokalizaci emisních zdrojů na základě číslicově zaznamenaných signálů z několika snímačů jsou dnes rozpracovány různé postupy a počítačové algoritmy. Většina z nich je založena na časových rozdílech příchodů emitované vlny ke snímačům, různě rozmístěným v okolí zdroje. Ke správnému výpočtu časových diferencí je však nutné přesně určit okamžiky příchodu stejného typu vlny k jednotlivým snímačům, což nebývá vždy jednoduché, zejména šířili-li se vlny v prostředí s mnoha odrazy, značným útlumem či disperzí resp. v anizotropních tělesech nebo za zvýšeného šumového pozadí. V těchto případech bývá obtížné také stanovení rychlosti šíření vln, která je k lokalizaci zdroje zapotřebí. Možnosti jak obejít tyto problémy a učít polohu zdroje pouze na základě odvozených parametrů emisního signálu jako je RMS apod. byly nastíněny v článku [4]. S ohledem na velmi komplikované závislosti emisních parametrů na geometrii tělesa lze však tento postup použít jen u relativně velmi jednoduchých konstrukcí. Použití TRM techniky nevyžaduje k lokalizaci zdroje ani časové difference ani znalosti o rychlosti šíření vln a ve srovnání s jinými procedurami dává nejpřesnější výsledky. Bodový zdroj AE lze touto technikou lokalizovat s přesností až na jednotky milimetrů, tedy přesněji než je délka snímači detekovaných vln emitovaných zdrojem. Vlastní princip TRM, je přitom relativně jednoduchý a vhodný jak pro lokalizaci zdroje [5], tak pro dekonvoluci signálu AE [6], ale většinou jej nelze využít přímo v reálném čase.

Poprvé byl princip časové reverzace vln využit v roce 1965 jako technika zlepšující odstup signálu od šumu a prostorovou fokusaci vln. Během posledních 20 let od doby, kdy Fink *et al* [7-9] použili myšlenku časové reverzace v akustice, což je v časové oblasti ekvivalentní obrácení vlnového čela ve frekvenční oblasti (Wave Front Reversal), byla navržena celá řada modifikací těchto technik. Základní principy TRA spolu s pokroky v elektronice, zlepšením technologie snímačů a novými teoretickými poznatky vedly k rozpracování experimentální techniky nazvané technika časové reversních zrcadel (*Time Reversal Mirrors* (TRM)), při řešení mnoha problémů v různých oblastech, jako např. v seismologii či medicíně [9, 10], ale ve spojení s nelineární spektroskopií elastických vln (NEWS) také v NDT jako vysoce citlivý indikátor přítomnosti defektů [11].

Teorie časově reversních zrcadel je založena na skutečnosti, že rovnice šíření elastických vln v nedisipativním heterogenním médiu je invariantní vůči obrácení času. Princip TRM experimentu je schematicky znázorněn na Obr. 1 (viz Anderson *et al.* [12]):

Zdroj S vyšle elastickou vlnu, které se šíří prostředím ke snímači R, kde je zaznamenána spolu s odrazy od hranice objektu. Zaznamenaný signál je časově obrácen a poté vyslán zpět k původnímu zdroji (Obr. 1 vlevo). Na Obr.1 vpravo jsou zobrazeny vysílané a přijaté signály.



Obr.1. Schéma časově reverzního procesu (podle Anderson et al.[12]).
Fig.1. Schematic illustration of TR process (taken from Anderson et al.[12])

3. Dekonvoluce signálu AE pomocí časově reverzních zrcadel

Uvažujme obecný zdroj akustické emise v místě r_0 se zdrojovou funkcí $s(t)$ a snímačem AE v místě r_i . Signál, který je registrován v místě r_i v čase $t \in \{0, T_{max}\}$, je výsledkem konvoluce zdrojové funkce s Greenovou funkcí

$$s_G = s(t) * G(t, r_0, r_i) * P_i(t), \quad t \in \{0, T\}. \quad (1)$$

Naměřený signál je poté časově reverzován a znovu vyslán z místa r_i do místa r_0 . V místě r_0 naměříme poté výsledný časově reverzovaný signál, který lze vyjádřit jako násobnou konvoluci

$$s_{TR} = s(T_{max} - t) * G(T_{max} - t, r_0, r_i) * G(t, r_i, r_0) \quad t \in \{0, T_{max}\}. \quad (2)$$

Odvození vztahu mezi signálem s_{TR} a zdrojovou funkcí $s(t)$ je snažší provést ve frekvenční oblasti. Označme Fourierovu transformaci signálu s_{TR} jako $F(s_{TR})$. Předpokládáme-li Greenovu funkci ve standardním tvaru

$$G(t, r_i, r_0) = \frac{1}{4\pi c^2} \frac{\delta(t - \frac{\|r_i - r_0\|}{c})}{\|r_i - r_0\|}. \quad (3)$$

bude Fourierova transformace $\mathcal{F}(s_{TR})$ ve tvaru

$$\mathcal{F}(s_{TR}(t)) = \mathcal{F}(s(T_{max} - t)) \frac{1}{16\pi \|r_i - r_o\|^2} e^{i\omega T} \quad (4)$$

a

$$IFT(\mathcal{F}(s_{TR}(t))) = \frac{1}{16\pi \|r_i - r_o\|^2} s(t) = a s(t) \mathcal{F}(s_{TR}(t))$$

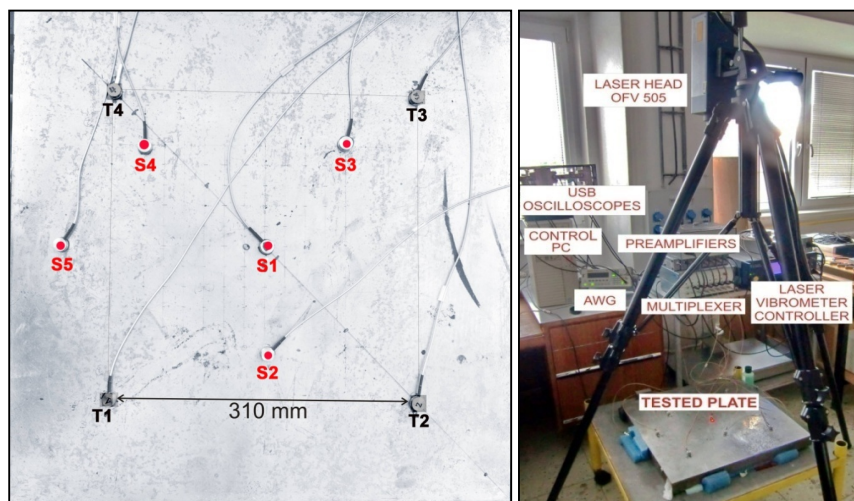
Kde IFT označuje inverzní Fourierovu transformaci a a je konstanta propocionality. Je vidět, že výsledný signál je úměrný původnímu vyslanému signálu ze zdroje akustické emise. Tento výsledek je velmi důležitý pro lokalizaci zdroje akustické emise a pro další analýzu. Při standardním měření akustické emise analyzujeme signály, které jsou ovlivněny jak průchodem vlny od zdroje ke snímači, tak charakteristikami snímací aparatury. Tento vliv znesnadňuje následnou klasifikaci zdrojů AE a výsledný signál $s_V(t)$ nebude pouze $a s(t)$, ale bude ještě dvojnásobnou konvolucí s impulsní odezvou snímače a charakteristikou snímací aparatury (jedna konvoluce při detekci snímačem a druhá při vysílání směrem ze snímače)

$$s_V(t) = a s(t) ** h(t) * h_A(t), \quad (5)$$

kde h je impulsní odezva snímače a $h_A(t)$ použité snímací aparatury. Předpokládáme přitom pro jednoduchost, že snímač i aparatura jsou lineární systémy a impulsní odezva piezo-měníče je stejná při příjmu i vysílání.

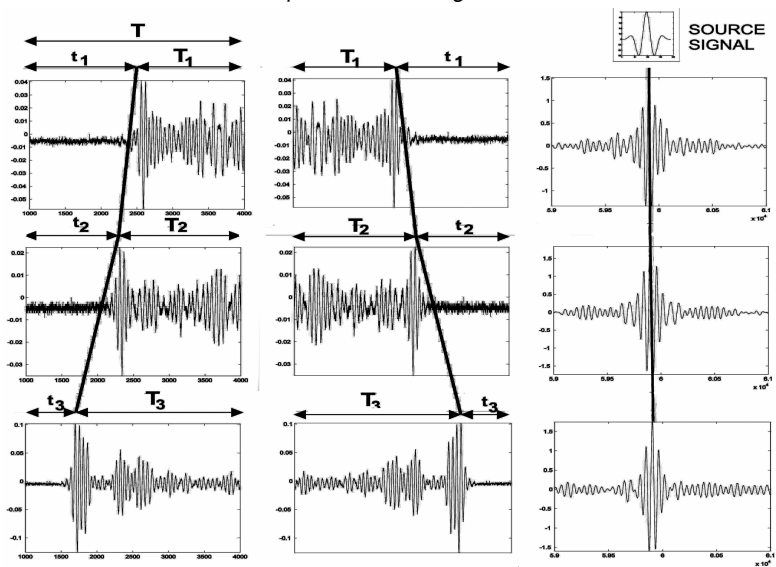
3. Experimentální ověření procedury TRAED

Ověřování možností analýzy zdrojů AE pomocí časové reverzace signálů TRAED bylo realizováno na tlusté ocelové desce o rozměrech 500x500x45 mm (viz Obr. 2 vlevo). Na desce byly přibližně v rozích čtverce o straně 310 mm připevněny 4 snímače AE typu DAKEL MTR 13 s magnetickými podložkami (T1-T4). Dalších pět piezoelektrických měničů S1-S5 stejného typu bylo na desce rozmístěno náhodně (měnič S1 byl umístěn zhruba uprostřed čtvercového pole snímačů). Měniče S1-S5 sloužily jako ultrazvukové vysílače definovaných pulzů různého tvaru, simulující zdroje AE v různých místech. Pulzy byly generovány pomocí generátoru libovolných signálů NI 5421. Vybuzečné vlny byly detekovány snímači T1-T4 a po filtraci (20 kHz-2MHz) a zesílení signálu v předzesilovačích typu PAC 20-40-60 byly zaznamenávány USB osciloskopem Tie-Pie HS4 (128 kS frekvencí 10 MHz). Uložené signály byly v PC zkráceny, normalizovány, převráceny v čase a generátorem vyslány prostřednictvím snímačů T1-T4, přepojených jako vysílače posílány zpět k původním zdrojům, kde byly registrovány buď původními vysílači S1-S5, resp. laserovým vibrometrem POLYTEC OFV 5000 s hlavicí OFV 505, zaměřeným na okolí původního zdroje. Celý experiment, včetně přepínání mezi vysílači a přijímači byl automaticky řízen PC programem v prostředí MATLAB. TRM procedura vyžaduje velmi přesnou synchronizaci vysílaných a přijímaných signálů (s přesností na 1 vzorek). Princip dekonvoluce a časové synchronizace zpětně vyslaných signálů ilustruje Obr. 3, kde jsou v levém sloupci zachyceny signály ze zdroje v poloze S3 (vyslán signál typu Rickerův puls - vpravo nahoře), přijaté třemi snímači T1- T3. časově obrácené (TR) signály jsou ve sloupci uprostřed. V pravém sloupci jsou TR signály snímáné interferometrem v místě původního zdroje S3.



Obr.2: Zkušební ocelová deska se 4 snímači AE T1-T4 a 5 měničů S1-S5 stejného typu, sloužícími jako vysílače definovaných signálů - umělé zdroje AE (vlevo). Vpravo je pohled na experimentální sestavu s laserovým interferometrem.

Fig. 2: Testing steel plate (left) with AE transducers T1-T4 receiving direct signals emitted from transducers S1-S5 simulating AE sources. Right is the used experimental arrangement.

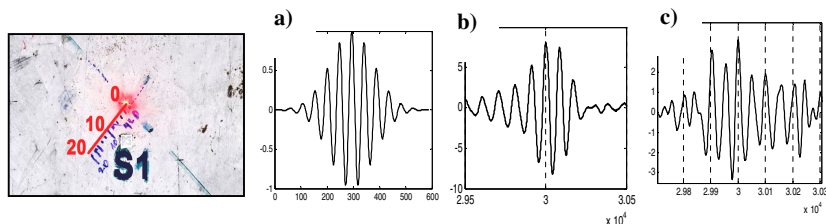


Obr.3: Ilustrace časové synchronizace časově reverzních signálů.

Fig. 3: Precise time alignment of time reversed AE signals.

Z Obr.3 je patrné, že po vyslání TR signálů zpět do desky jsou signály z různých snímačů, detekované v místě původního zdroje zcela přesně synchronizovány. Tuto vlastnost lze využít k přesné lokalizaci zdroje: Budeme-li vibrometrem podrobně skenovat okolí původního zdroje, zhruba lokalizované jinou tradiční metodou, dojde k vzájemné synchronizaci pouze přesně v místě zdroje.

Původně vyslaný signál zde není zcela přesně rekonstruován, neboť nebyla provedena dekonvoluce na přenosovou charakteristiku samotného vysílače. K úplné rekonstrukci pole dynamických posuvů v místě zdroje (identifikaci na základě tensoru seismických momentů) by bylo zapotřebí snímat kromě kolmé také další složky, což při použití laserového vibrometru s jedinou osou snímání není možné. Lepší rekonstrukce zdrojové funkce lze dosáhnout také součtem TR signálů z více snímačů (teoreticky z nekonečného počtu snímačů okolo zdroje). Na Obr. 4 je ilustrována závislost rekonstrukce zdrojové funkce na přesnosti polohy snímání TR signálu. Laserový interferometr byl nejprve zaměřen přesně do místa zdroje - viz vlevo na Obr.4, kde přesná poloha zdroje (střed vysílajícího měniče) je vyznačena na měřítku jako nula. Vedle jsou vyneseny 3 signály: a) vysílaný signál (tvarovaný sinusový puls 85 kHz), b) TR puls rekonstruovaný v místě zdroje (součet TR signálů vyslaných ze 4 snímačů T1-T4) a c) tentýž součet signálů, detekovaných ve vzdálenosti 20 mm od původního zdroje. Na signálu c) je již patrná značná nedokonalost rekonstrukce. Obdobné výsledky byly získány také při snímání TR signálů vysílací sondou místo laserovým vibrometrem. V tomto případě se ale daleko výrazněji projeví opětovná konvoluce přijímaného signálu s impulsní charakteristikou snímače.



Obr. 4: Ilustrace vlivu polohy snímače TR signálu vzhledem k místu zdroje.

Fig. 4. Illustration of TR receiver displacement on resulting signal reconstruction.

4. Závěry

Použití časově reverzních zrcadel (TRM) při analýze signálů AE otevírá nové možnosti řešení komplikovaných inverzních problémů v této oblasti, jako je lokalizace zdrojů a dekonvoluce signálů (eliminace přenosu vln testovanou konstrukcí). V tomto článku je stručně nastíněn princip TRM a výhody použití této techniky jsou ilustrovány na jednoduchém příkladu lokalizace umělých emisních zdrojů na ocelové desce. Procedura TRM podstatně zvyšuje přesnost lokalizace emisních zdrojů a eliminuje distorzi signálu AE, způsobenou šířením elastických vln v konstrukcích s komplikovanou geometrií či anizotropií atd. i bez jakýchkoliv specifických znalostí o této geometrii, materiálové struktuře, rychlostech šíření elastických vln apod. TRM procedura je snadno realizovatelná a nejlepší výsledky lze dosáhnout použitím např. skenujícího laserového interferometru jako detektoru vln zpětně vysílaných od snímačů AE k původnímu zdroji prostřednictvím generátoru

libovolných signálů. Je-li k dispozici spolehlivý model pro simulace šíření elastických napětových vln v daném tělese, není k analýze AE touto metodou zapotřebí žádné dodatečné experimentální vybavení a proceduru TRM lze s uspokojivými výsledky realizovat přímo na tomto modelu. K úplné rekonstrukci funkce emisního zdroje v reálném čase bude zapotřebí v budoucnu ještě vyřešit celou řadu teoretických i experimentálních problémů týkajících se časově reverzní akustiky.

5. Literatura

1. Z. Prevorsevsky: 'Notes on wave and waveguide concepts in AE' (25th EWGAE 2002, Prague, Proc. Vol II, pp 83 - 90, September 2002)
2. Ch. U. Grosse, M. Ohtsu (eds): 'Acoustic Emission Testing. Basic for Research - Application in Civil Engineering'. (Springer-verlag, 2008)
3. Carpinteri, G. Lacidogna (eds): 'Acoustic Emission and Critical Phenomena: From Structural Mechanics to Geophysics'. (CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008).
4. M. Blahacek, M. Chlada, Z. Prevorsevsky: 'Acoustic emission source location based on signal features'. (Advanced Materials Research, Vol. 13-14, 77-82, 2006).
5. J-M Parot, 'Localizing impulse sources in an open space by time reversal with very few transducers'. (Applied Acoustics, Vol 69 (4), pp. 311-324, 2008)
6. Z. Farova, Z. Prevorsevsky, V. Kus, S. Dos Santos: 'Experimental Signal Deconvolution in Acoustic Emission Identification Setup'. (Proc. of the 6th Internat. Workshop NDT in Progress, Prague, pp. 33-40, 2011)
7. M. Fink, C. Prada, F. Wu, D. Cassereau, 'Self focusing in inhomogeneous media with time reversal acoustic mirrors' (IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings 1, pp. 681-686, 1989)
8. M. Fink: 'Time reversal of ultrasonic fields. Part I: Basic principles'. (IEEE Trans. Ultr. Ferr. Freq. Contr. Vol 39 (5), pp 555-566, 1992)
9. M. Fink: 'Time-reversed acoustics'. (Rep. Prog. Phys., Vol. 63, pp.1933-1995, 2000).
10. B. E. Anderson, M. Griffa, C. Larmat, T. J. Ulrich, P. A. Johnson: ' '. (Acoustics Today, Vol. 4 (1), 4-15, 2008)
11. Prevorsevsky Z. , Vejvodova S. , Dos Santos S.: 'Nonlinear Wave Modulation and Time Reversal Tomography of Structural Defects'. (NDT-Welding Bulletin, Vol.19, No.3, pp.45-49, 2009,)
12. B. E. Anderson, M. Griffa, C. Larmat, T. J. Ulrich, P. A. Johnson: 'Time reversal reconstruction of finite sized sources in elastic media'. (JASA Express Letters, Vol. 130 No.4, EL219 - EL225, 2011).

Poděkování: Tato práce vznikla za podpory MPO ČR v projektech č. FR-TI1/274 a FR TI1/198 a projektu GAČR č. 104/10/1430.