
XVIII Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 13-16 marca 2012

METODY REKONSTRUKCJI OBRAZU Z GŁOWIC PHASED ARRAY

Marcin LEWANDOWSKI
IPPT PAN, Warszawa, mlew@ippt.gov.pl

1. WSTĘP

Systemy z głowicami fazowymi (PA – Phased Array) są coraz powszechniej stosowane w ultradźwiękowych badaniach nieniszczących dzięki swoim niewątpliwym zaletom – m.in. większą prędkością badań, możliwościami sterowania wiązką oraz nowymi trybami zobrazowania.

W niniejszym referacie zostaną przedstawione metody rekonstrukcji obrazów w systemach PA - zarówno klasyczna metoda beamformingu (stosowana we współczesnych systemach komercyjnych), jak i nowe metody syntetycznej apertury (SA).

Obecnie rozpowszechnione systemy PA używają głowic wieloelementowych do emulowania mechanicznie przesuwanych głowic jednoprzetwornikowych. Układy multiplekserów (przełączników elektronicznych) wybierają zakres kilku do kilkudziesięciu kolejnych przetworników głowicy PA tworząc z nich wirtualny pojedynczy przetwornik ultradźwiękowy. Fazujące układy nadawcze pozwalają na ogniskowanie i odchylenie wiązki takiego wirtualnego przetwornika. Po stronie odbiorczej cyfrowe układy przetwarzania realizują sumowanie przyczynków (ech) od poszczególnych elementów (metoda beamformingu) tworząc w ten sposób pojedynczą linię obrazową; odpowiadającą zobrazowaniu typu A. Wirtualny przetwornik utworzony z połączonych elementów głowicy PA posiada analogiczne własności jak pojedynczy przetwornik o takim samym rozmiarze oraz ogniskowaniu (faktycznie występują pewne różnice w kształcie pola ultradźwiękowego głowic wieloelementowych - zainteresowanych odsyłam do zeszłorocznego referatu [2]). Podsumowując można powiedzieć, że obecne systemy PA dają nowe możliwości badań i wizualizacji przy jakości obrazowania analogicznej do stosowanych dotychczas głowic jednoelementowych.

Alternatywą są metody syntetycznej apertury, które stosują innego rodzaju schematy nadawczo-odbiorcze oraz metody rekonstrukcji obrazu i pozwalają na zwiększenie jakości obrazowania, w szczególności rozdzielczości poprzecznej oraz stosunku sygnał-szum. Metody SA nie wymagają zmian sprzętowych w układach nadawczo-odbiorczych systemów PA, ale mają znacząco większe wymagania dot. ilości zbieranych danych oraz mocy obliczeniowej.

Referat ma charakter informacyjny, a jego celem jest zapoznanie praktyków ultradźwiękowych badań NDT z nowymi metodami obrazowania w systemach PA. W dalszej części referatu zostaną omówione metody rekonstrukcji obrazu: beamforming i syntetyczna apertura oraz przedstawione przykładowe zobrazowania tymi metodami.

2. SYSTEMY PHASED ARRAY

Pod pojęciem system PA w ultradźwiękowych badaniach nieniszczących rozumiemy:

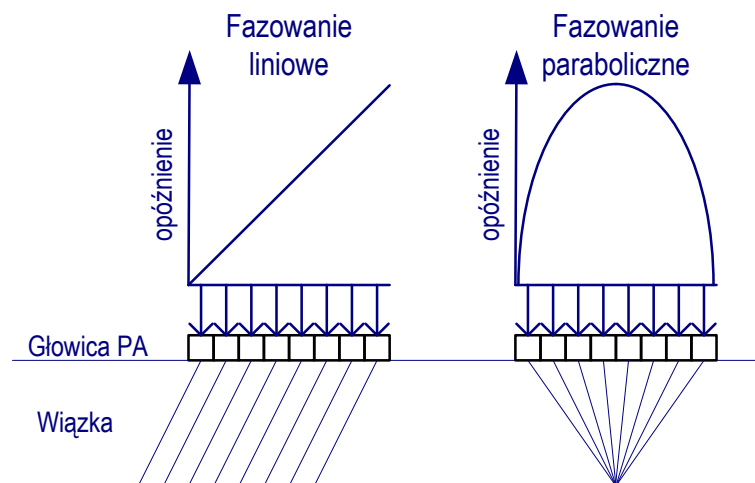
- Wielelementową głowicę ultradźwiękową wraz z wielokanałowym systemem elektronicznym umożliwiającym niezależne pobudzenie wybranych elementów z zadanymi parametrami opóźnienia, w celu sterowania (odchylania, ogniskowania) wiązki ultradźwiękowej.
- Każdy element (przetwornik) głowicy PA posiada swój tor elektroniczny zawierający nadajnik/odbiorcę oraz układ digitalizacji sygnału (przetwornik A/C). Wybrane grupy elementów (apertura) głowicy są pobudzane z zadanym prawem opóźnień (tzw. fazowaniem). Ze względów ekonomicznych oferowane są systemy z liczbą równoległych kanałów elektronicznych i układami multiplekserów pozwalającymi obsłużyć głowice z większą liczbą elementów (np. Omniscan 16/128 – posiada 16 kanałów elektronicznych mogących obsłużyć głowice ze 128 przetwornikami).
- Schemat nadawczo-odbiorczy, czyli wybór przetworników biorących udział w procesie nadawania i odbioru, rodzaj fazowania nadawczego oraz sposób skanowania (przesuwania apertury i/lub fazy nadawczej).
- Metoda rekonstrukcji linii i/lub obrazu wad z odebranych i zdigitalizowanych ech ultradźwiękowych z wybranych przetworników.

3. METODY REKONSTRUKCJA OBRAZU

Jak już wspomniano we Wstępie w komercyjnych systemach PA obecnie używana jest metoda beamformingu do tworzenia poszczególnych linii obrazowych. Metody syntetycznej apertury nie są na dzisiaj powszechnie stosowane, ale duże zainteresowanie nimi w obrazowaniu medycznym oraz badaniach nieniszczących jest widoczne w literaturze naukowej.

3.1. Klasyczny beamforming

Wybrane kolejne elementy głowicy PA tworzą wirtualny przetwornik (apertura nadawcza). W zależności od potrzeb używając fazowania (opóźniania sygnałów do poszczególnych elementów) można uzyskać efekt ogniskowania wiązki nadawczej i/lub jej odchylania (rys. 1). Brak opóźnień nadawczych odpowiada płaskiemu przetwornikowi nadawczemu; zastosowanie profilu parabolicznego przetwornikowi ogniskowanemu.



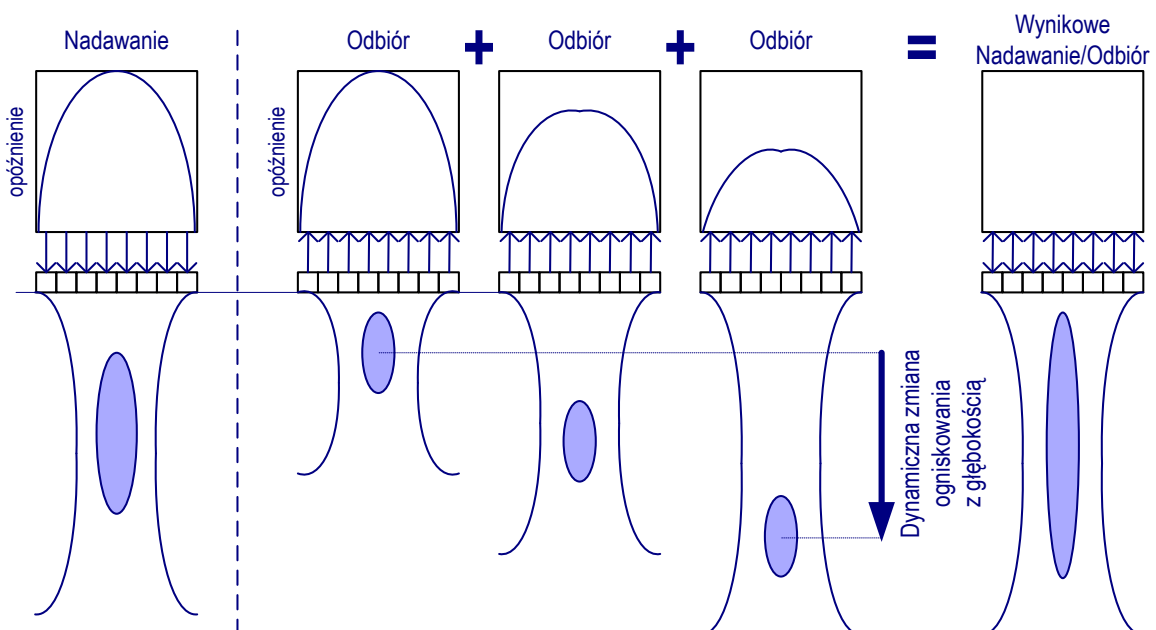
Rys. 1. Fazowanie nadawcze jako metoda sterowania wiązką i ogniskowania.

Po stronie odbiorczej echa z poszczególnych elementów głowicy PA (apertura odbiorcza) są sumowane dając odpowiedź analogiczną, jak sygnał z pojedynczego przetwornika o wielkości równej aperturze odbiorczej.

Fazowanie/opóźnianie sygnałów odbiorczych zgodnie z profilem parabolicznym przed procesem sumowania realizuje funkcje ogniskowania odbiorczego – analogicznie do ogniskowania po stronie nadawczej. W literaturze metoda beamformingu nazywana jest często metodą „opóźnij i dodaj” (ang. DAS - Delay and Sum), co bezpośrednio odpowiada realizowanemu algorytmowi. Wyliczone paraboliczne profile opóźnień, które są używane do nadawania oraz beamformowania nazywane są w systemach PA prawami ogniskowania (ang. focal laws). Standardowo stosuje się pojedyncze prawo ogniskowania – czyli pojedyncze ognisko po stronie nadawania i odbioru, które charakteryzuje się spadkiem rozdzielczości uzyskiwanego obrazu przed i za ogniskiem. Bardziej zaawansowane systemy PA oferują funkcję dynamicznego ogniskowania odbiorczego (ang. DDF - Dynamic Depth Focusing) [4], polegającą na automatycznej zmianie profilu ogniskowania z głębokością.

Proces DDF pokazano schematycznie na rys. 2. Po stronie nadawczej zastosowane jest jedno ognisko, po stronie odbiorczej w trakcie jednego odbioru prawo ogniskowania jest dynamicznie zmieniane z głębokością z której nadchodzą sygnały ech. Otrzymany w ten sposób kształt wiązki nadawczo/odbiorczej jest wynikiem nałożenia kształtu wiązki nadawczej (jedno ognisko) oraz wielu ognisk odbiorczych na różnych głębokościach. Dzięki DDF szerokość wiązki wynikowej (rozdzielczość poprzeczna) jest bardziej równomierna w całej głębokości obrazowania (efektywnie zmniejsza rozbieżność wiązki).

W zastosowaniach medycznych w celu dalszej poprawy rozdzielczości stosuje się także kilka ognisk nadawczych, które jednak wymagają wielokrotnego nadawania, czyli powodują zmniejszenie częstotliwości PRF, a tym samym częstotliwości odświeżania obrazu.



Rys. 2. Schematyczna zasada działania dynamicznego ogniskowania odbiorczego (na podstawie [1]).

3.2. Syntetyczna apertura

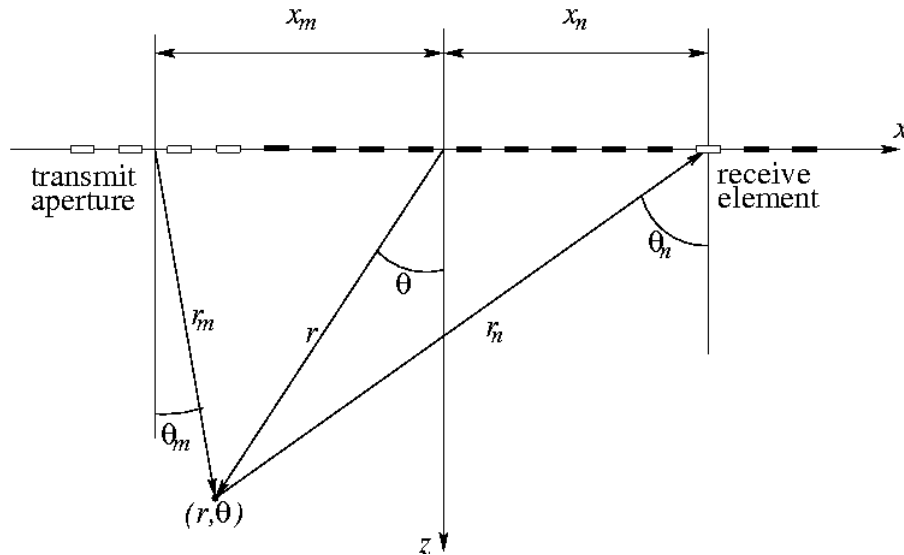
Rozdzielczość kątowna w układach optycznych jest określona przez kryterium Rayleigha: $\sin \theta = 1.220 \lambda/D$, gdzie: θ jest rozdzielczością kątową w radianach (rys. 3), λ jest długością fali, D aperturą układu optycznego. Te same zasady funkcjonują w obrazowaniu ultradźwiękowym: im większa apertura tym większa rozdzielczość. Metody syntetycznej

apertury (ang. SAFT - Synthetic Aperture Focusing Technique) polegają na składaniu małych apertur w celu utworzenia sztucznej (syntetycznej) większej apertury zapewniającej wyższą rozdzielczość.

Istnieje wiele różnych schematów nadawczo-odbiorczych jakie mogą być stosowane w SA, my ograniczymy się do schematu MSTA (ang. Multi-Element Synthetic Transmit Aperture), czyli wieloelementowej syntetycznej apertury nadawczej.

Implementacja MSTA w systemie PA polega na budowaniu apertury nadawczej przez przesuwanie grupy kilku przetworników nadawczych z zadanyim krokiem przez całą długość głowicy. Sygnały echa są odbierane w każdym nadaniu ze wszystkich elementów głowicy. Następnie odebrane echa z pojedynczego nadania służą do rekonstrukcji tzw. obrazu niskiej rozdzielczości. Zrekonstruowane obrazy niskiej rozdzielczości (z każdego nadania) są ostatecznie sumowane dając w wyniku obraz wysokiej rozdzielczości. Intuicyjnie metodę MSTA można rozumieć w następujący sposób: badany obiekt jest oświetlany falą ultradźwiękową z różnych stron przez nadawanie małą aperturą. Wszystkie przetworniki odbiorcze (duża apertura odbiorcza) „widzą” echa od obiektu dla każdego nadania. Biorąc pod uwagę znacznie większą liczbę przetworników biorących udział w rekonstrukcji obrazu można spodziewać się także zwiększenia stosunku sygnał-szum.

Na rys. 3 przedstawiono geometrię w metodzie MSTA dla liniowego przetwornika PA.



Rys. 3. Geometria nadawczo-odbiorcza w metodzie MSTA.

Dla N -elementowego przetwornika, N_t – oznacza liczbę elementów apertury nadawczej, N_{sh} liczbę elementów o jaką przesuwamy aperturę nadawczą w każdym strzale; całkowita liczba nadań wynosi $M = (N - N_t)/N_{sh}$, natomiast całkowita liczba linii sygnału w.cz., która podlega zapamiętaniu i obróbce w algorytmie MSTA wynosi $M \times N$.

Macierz sygnałów echa w.cz. podlega procedurze ogniskowania numerycznego dla każdego punktu obrazowego (r, θ) za pomocą wzoru:

$$A_{MSTA}(r, \theta) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_{m,n} \left(\frac{2r}{c} - \tau_{m,n} \right) \quad (1)$$

gdzie: $y_{m,n}(t)$ jest sygnałem echa w.cz. dla nadania w kroku m i odbioru elementem n , $\tau_{m,n}$ jest czasem przelotu fali dla kombinacji (m, n) nadanie/odbior obliczonej w następujący sposób:

$$\tau_{m,n} = \tau_m + \tau_n, \quad 1 \leq n \leq N, 1 \leq m \leq M. \quad (2)$$

Opóźnienia względem punktu obrazowania (r, θ) dla m -tego nadajnika i n -tego odbiornika wynoszą:

$$\tau_i = \frac{1}{c} \left(r - \sqrt{r^2 + x_i^2 - 2x_i r \sin \theta} \right), \quad i = m, n \quad (3)$$

gdzie: x_m, x_n są pozycją m -tego element nadawczego i n -tego element odbiorczego, r, θ są współrzędnymi biegunowymi punktu obrazowania względem środka apertury całego przetwornika. Sumowania we wzorze (1) odpowiadają kolejno za ogniskowanie nadawcze i odbiorcze. Należy zauważyć, że w metodzie beamformingu DDF występuje jedynie ogniskowanie odbiorcze odpowiadające drugiej sumie we wzorze (1).

Dodatkową cechą metody MSTA jest możliwość zwiększenia prędkości obrazowania przez zmniejszenie liczby nadań. Parametr N_{sh} określający przesunięcie apertury nadawczej po każdym strzale determinuje także całkowitą liczbę nadań potrzebną do przeskanowania całego przetwornika. W odróżnieniu od metody beamformingu w której tego typu zwiększenie przesunięcia pomiędzy aperturami nadawczymi skutkowało by wypadaniem linii obrazowych i zmniejszeniem rozdzielczości, w metodzie SA rozdzielczość nie ulega zmianie (całkowita zeszyntezowana apertura będzie identyczna) zmienia się jedynie liczba sygnałów biorących udział w rekonstrukcji, co spowoduje zmniejszenie stosunku sygnał-szum.

4. BADANIA

W Zakładzie Ultradźwięków IPPT PAN prowadzone są badania nad praktycznym zastosowaniem metod SA do obrazowania medycznego oraz w zastosowaniach do badań nieniszczących.

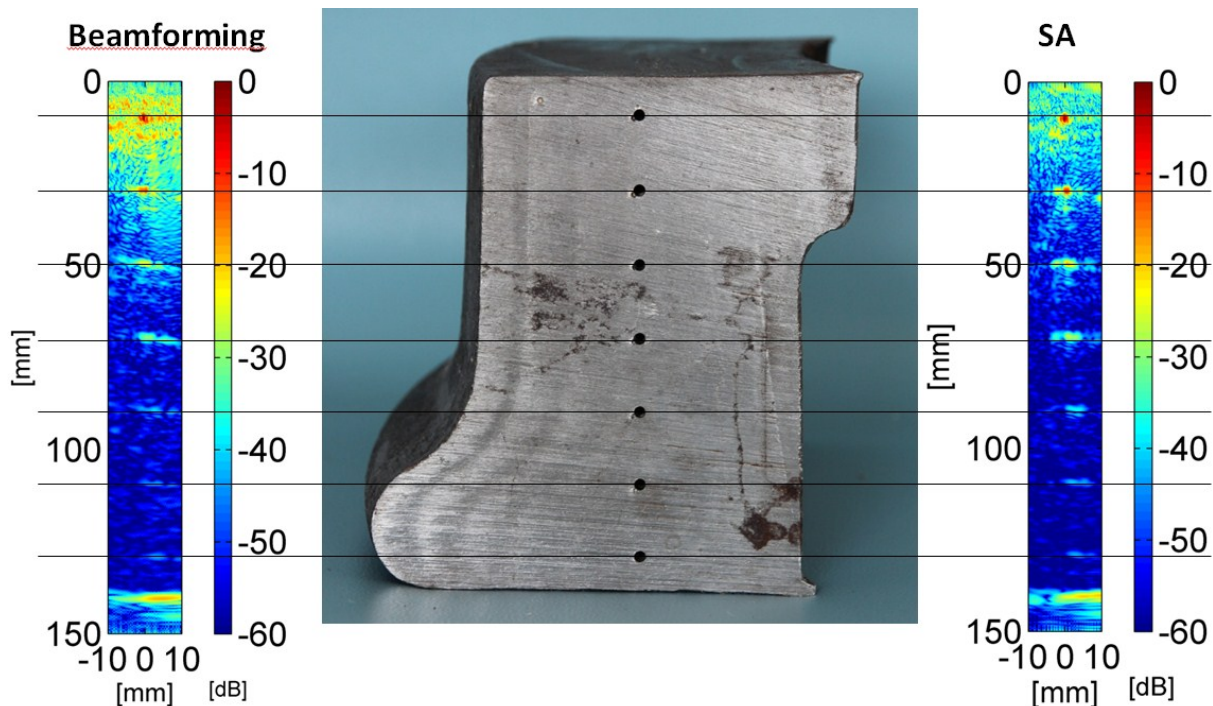
Przedstawione poniżej badania laboratoryjne mające na celu porównanie jakości oraz efektywności wizualizacji wad za pomocą metody SA oraz metody beamformingu były prezentowane na 40. Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących w Warszawie w 2011r. [3]. Dane pomiarowe zostały zebrane przy pomocy medycznego ultrasonografu badawczego *Ultrasonix SonixTOUCH* (Kanada). Dostęp do oprogramowania badawczego aparatu umożliwił zaprogramowanie sekwencji nadawczo-odbiorczych oraz akwizycję surowych sygnałów w.cz. z każdego przetwornika głowicy. Badania wykonano głowicą liniową o częstotliwości 4,2 MHz złożoną ze 128 elementów i odległości między przetwornikami (pitch) równej 0,3048 mm. Sygnał ech w.cz. był próbkowany z częstotliwością 40 MHz i rozdzielczością 12-bit. Badania przeprowadzono w układzie laboratoryjnym z nieruchomą głowicą na fragmencie monobloku koła kolejowego z poprzecznie nawierconymi otworami o średnicy 2 mm.

Zebrane sygnały dla schematu nadawczo-odbiorczego MSTA zostały poddane obróbce w celu rekonstrukcji obrazu metodą SA oraz klasycznego beamformingu. Apertura nadawcza miała rozmiar 2 elementów, a odbiorcza 128. Do rekonstrukcji przyjęto prędkość fali podłużnej równą 5883 m/s. Poniżej przedstawiono obrazy wad w prezentacji typu B uzyskane metodą klasycznego beamformingu i metodą syntetycznej apertury (rys. 4).

Uzyskane wyniki obrazowania pozwalają wyciągnąć następujące wnioski:

- Metoda SA daje lepszą rozdzielczość poprzeczną w całej głębokości obrazowania.
- Metoda SA pozwala uzyskać lepszy kontrast obrazowania – widoczny szczególnie w głębszych partiach.

Powyższe ustalenia są zgodne z wnioskami pracy [5].



Rys. 4. Porównanie jakości rekonstrukcji metodą beamformingu oraz SA w monobloku.

5. PODSUMOWANIE

Systemy PA już dzisiaj umożliwiają wizualizację w czasie rzeczywistym dając całościowy obraz wad i pozwalając na określanie ich położenia i rozmiarów. Zastosowanie nowych bardziej zaawansowanych algorytmów rekonstrukcji metodami syntetycznej apertury pozwala na uzyskanie wyższej rozdzielczości oraz jakości obrazowania.

W referacie przedstawiono algorytmy rekonstrukcji obrazów wad w systemach Phased Array oraz zaprezentowano przykładowe wyniki dla monobloku z nawierconymi bocznie otworami. Sygnały do rekonstrukcji uzyskano z jednego zestawu danych pomiarowych otrzymanych za pomocą badawczego ultrasonografu medycznego.

Zaprezentowana metoda MSTA zapewnia wyższą jakość obrazowania wad niż stosowana obecnie w komercyjnych systemach PA metoda klasycznego beamformingu DDF. Dodatkowo możliwość modyfikacji schematu nadawczo-odbiorczego w metodach SA w celu optymalizacji jakości obrazowania lub prędkości badania znacznie zwiększa jej uniwersalność.

Należy zaznaczyć, że implementacja metod SA przy użyciu komercyjnych systemów PA jest możliwa obecnie jedynie w post-processingu. Bardzo duża ilość danych niezbędna do przeprowadzenia rekonstrukcji oraz wysokie wymagania obliczeniowe algorytmu powodują, że dzisiejsze systemy PA nie są w stanie realizować obrazowania SA w czasie rzeczywistym. Z tych powodów w ZU IPPT PAN opracowywana jest nowa platforma ultradźwiękowa zoptymalizowana dla metod SA, która, jak mamy nadzieję, stanie się narzędziem umożliwiającym wdrożenie tych metod do zastosowań praktycznych.

Podziękowania

Badania współfinansowane ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego
w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka,
nr projektu: POIG.01.03.01-14-012/08-00.



**INNOWACYJNA
GOSPODARKA**
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



LITERATURA

- [1] Lamarre A., Mainguy F., Dynamic Focusing of Phased Arrays for Nondestructive Testing: Characterization and Application, NDT.net - September 1999, Vol. 4 No. 9, <http://www.ndt.net/article/v04n09/lamarre/lamarre.htm> .
- [2] Lewandowski M., Systemy głowic wieloprzetwornikowych - podstawy fizyczne, XVII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 8-11 marca 2011.
- [3] Lewandowski M., Klimonda Z., Obrazowanie ultradźwiękowe wad za pomocą metod syntetycznej, apertury, 40. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Warszawa, 24-26 października 2011.
- [4] Olympus NDT, "Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline", Olympus NDT, 2004.
- [5] Satyanarayan L., Balasubramaniam K., Krishnamurthy C.V., Comparative Studies on Multi- Element Synthetic Aperture Focusing Phased Array Ultrasonic Technique and Conventional SAFT, Centre for Non-Destructive Evaluation and Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai-600 036, India, http://www.cnde-iitm.net/Published%20Papers%20pdf/satya_conf--7.doc .