

# Obrazowanie ultradźwiękowe wad za pomocą metod syntetycznej apertury

## Ultrasonic flaw imaging using synthetic aperture methods

### Streszczenie

Ultradźwiękowe metody badań nieniszczących przechodzą obecnie metamorfozę od systemów z głowicami jednoelementowymi do systemów wielokanałowych z głowicami fazowymi (*PA Phased Array*). Prowadzony obecnie w Zakładzie Ultradźwięków IPPT PAN projekt ma na celu opracowanie uniwersalnej wielokanałowej platformy ultradźwiękowej oraz metod rekonstrukcji obrazów mogących znaleźć zastosowanie zarówno w medycynie, jak i w badaniach nieniszczących.

Przeprowadzono wstępne badania mające na celu porównanie różnych metod rekonstrukcji obrazów wad w trybie B-mode. W tym celu dokonano akwizycji ech ultradźwiękowych od wad w szynie kolejowej przy pomocy ultrasonografu badawczego wyposażonego w 128-elementową głowicę fazową o częstotliwości 4 MHz. Uzyskane sygnały ech wysokiej częstotliwości poddano następnie obróbce cyfrowej w celu uzyskania obrazu B-mode. Zastosowano i porównano różne metody rekonstrukcji obrazu: klasyczny *beamforming* oraz metodę syntetycznej apertury.

Wstępne wyniki wskazują na wysoką jakość rekonstrukcji metodą syntetycznej apertury, która zapewnia równomierną rozdzielczość poprzeczną w całej głębokości obrazowania. Zastosowanie alternatywnych schematów nadawczo-odbiorczych w metodzie syntetycznej apertury umożliwia dodatkowo optymalizację metody pod względem prędkości badania lub jakości obrazowania. Wyniki te potwierdzają przydatność i konkurencyjność metody syntetycznej apertury do stosowanej obecnie metody *beamformingu*.

### Abstract

Nowadays ultrasonic methods of non-destructive testing are undergoing transformation from systems with single-element probes into multichannel systems with Phase Arrays probes (PA). The aim of the project currently conducted in Department of Ultrasound in IPPT PAN to develop a versatile multichannel ultrasonic platform, and methods of image reconstruction to apply both in medicine and in non-destructive testing.

Preliminary studies on comparison of different methods of defect image reconstruction in B-mode have been done. For this purpose the acquisition of ultrasonic echoes of defects of railway rail with the research ultrasound scanner equipped with 128-element and 4 MHz frequency have been made. Then the resulting high frequency signals of echoes were digitally processed in order to obtain B-mode image. Different methods of image reconstruction – classic *beamforming* and the method of synthetic aperture – have been applied and compared.

The preliminary studies indicate the high quality of reconstruction by synthetic aperture method which provides uniform lateral resolution throughout the whole imaging depth. The use of alternative transmitting-receiving schemes in the method of synthetic aperture additionally allows optimization of the method in terms of speed of the testing as well as imaging quality. These results confirm usefulness and competitiveness of the method of synthetic aperture to the method of *beamforming* applied at present.

### Wstęp

Ultradźwiękowe badania nieniszczące do dnia dzisiejszego kojarzą się z klasyczną prezentacją amplitudy ech (zobrazowanie typu A) na ekranie defektoskopu. Z drugiej strony rozwój i miniaturyzacja elektroniki

spowodowała pojawienie się, a następnie popularyzację systemów wielokanałowych PA (*Phased Arrays* – głowic fazowych), które dają zupełnie nową jakość badań oraz wizualizacji wad.

Podstawowe zalety systemów głowic fazowych takie jak: znacznie większa prędkość badań, nowe możliwości sterowania wiązką oraz obrazowania wad są szeroko znane. Natomiast poza świadomością wysokich kosztów aparatury inne ograniczenia i wymagania stosowania tych systemów nie są powszechnie znane. Niektóre z ograniczeń fizycznych głowic PA

przedstawiono w [1]. Osobnym zagadnieniem są alternatywne metody rekonstrukcji obrazów, które umożliwiają uzyskanie optymalnej jakości obrazu (m.in. równomiernej rozdzielczość wgłębnej) dla zadanych parametrów głowicy oraz prędkości badania i one są tematem tego artykułu.

W Zakładzie Ultradźwięków IPPT PAN obecnie prowadzone są prace mające na celu praktyczną realizację metod SA (ang. Synthetic Aperture – syntetyczna apertura) w obrazowaniu ultradźwiękowym. W ramach tych prac opracowywana jest nowoczesna aparatura umożliwiająca jednoczesną akwizycję i równoległe przetwarzanie 32÷128 kanałów ultradźwiękowych oraz algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów i rekonstrukcji obrazów działające w czasie rzeczywistym. Prowadzone obecnie badania modelowe mają na celu określenie optymalnych schematów nadawczo-odbiorczych oraz parametrów rekonstrukcji dla różnych zastosowań medycznych oraz przemysłowych.

## Systemy Phased Array

W systemach PA główną formą prezentacji wyników są dwuwymiarowe (2D) obrazy wad w wybranej prezentacji (zobrazowanie typu B, C, D, S). Prezentacja 2D umożliwia obrazowanie wad oraz określanie ich położenia, wielkości i kierunkowości, co znacząco rozszerza jakość badań w stosunku do klasycznej prezentacji typu A. Nieocenione znaczenie ma także możliwość zapisu danych surowych w systemach PA, która pozwala na dokładniejszą analizę wyników badań w późniejszym okresie oraz zapewnia dokumentację do celów audytowych.

Rekonstrukcja obrazu 2D odbywa się w systemach głowic fazowych na podstawie odebranych sygnałów ech wysokiej częstotliwości (w.cze.) z wybranych przetworników z uwzględnieniem ustawionych parametrów nadawczo-odbiorczych oraz wprowadzonych tablic opóźnień. Tablice opóźnień (zwane także prawami opóźnień lub ogniskowania) określają opóźnienia, które muszą zostać zastosowane dla sygnałów z każdego przetwornika odbiorczego w procesie rekonstrukcji obrazu. Parametry nadawczo-odbiorcze oraz prawa opóźnień są wyznaczane w programowaniu użytkowym służącym do projektowania badań.

Standardową metodą rekonstrukcji obrazów w systemach PA jest klasyczny beamforming (stosowany także w ultrasonografii medycznej), który polega na tworzeniu pojedynczej linii obrazu wynikowego (tzw. *scanline*) z zestawu sygnałów w.cz. pochodzących od sąsiednich przetworników głowicy (tzw. apertura odbiorcza). Sygnały w.cz. z poszczególnych przetworników są opóźnianie zgodnie z zadaną tablicą opóźnień i sumowane koherentnie. Powstająca w ten sposób linia obrazowa jest odpowiednikiem sygnału echa z głowicy jednoprzetwornikowej o odpowiadających parametrach.

## Metoda syntetycznej apertury

Metoda SA także opiera się na opóźnianiu i koherentnym sumowaniu przyczynków od ech w.cz. pochodzących od różnych przetworników, ale tutaj dla każdego nadania rekonstruowany jest cały obraz 2D, a nie pojedyncza linia obrazu. Skutkiem tego są bardzo wysokie wymagania na prędkość transmisji i przetwarzania danych. Obrazy uzyskiwane z pojedynczego nadania są nazywane obrazami niskiej rozdzielczość, gdyż nie zapewniają odpowiedniej jakości obrazowania. Stosując jeden ze schematów nadawczo-odbiorczych cała apertura przetwornika jest skanowana, a powstające obrazy niskiej rozdzielczość są sumowane tworząc obraz wynikowy wysokiej rozdzielczości. Ważnym wyróżnikiem metody SA jest uzyskiwanie jednoczesnego ogniskowania po stronie nadawczej i odbiorczej, co zapewnia równomierną wgłębnią rozdzielczość poprzeczną. Dla klasycznego beamformingu ogniskowanie nadawcze jest realizowane przez nadawanie zogniskowanej wiązki na określonej głębokości. Chcąc uzyskać równomierną rozdzielczość w całym zakresie głębokości konieczne jest wielokrotne nadawanie z ogniskami na różnych głębokościach, co powoduje wydłużenie czasu badania.

Istnieje bardzo wiele różnych schematów nadawczo-odbiorczych różniących się wykorzystywaną liczbą przetworników nadawczych i odbiorczych w jednym nadaniu oraz sposobem skanowania. Dzięki temu możemy optymalizować schemat i algorytm rekonstrukcji do konkretnego zastosowania.

## Zastosowania

Badania systemami PA są dzisiaj stosowane w całym spektrum zastosowań ultradźwiękowych badań nieniszczących.

W pracy [2] przedstawiono zalety systemów PA w badaniach spoin rurociągów. Poza uzyskaniem znacznie większej wydajności badań (do 5 razy) wskazano lepsze wykrycie wad oraz zapis pełnych danych umożliwiający późniejszą weryfikację i śledzenie zmian.

Badania szyn kolejowych [3], obręczy kół [4] i osi [5] są szczególnie ciekawe ze względu na skalę prowadzonych badań zarówno przy produkcji, jak i eksploatacji.

Zainteresowanie PA wkracza także na krajowym rynku, co jest widoczne zwiększającą się ilością referatów podejmujących tę problematykę na corocznym zaskopiańskim Seminarium Nieniszczących Badań Materiałów [6÷9].

## Badania

Przeprowadzono badania laboratoryjne mające na celu porównanie jakości oraz efektywności badania wad za pomocą metody SA oraz metody klasycznego beamformingu.



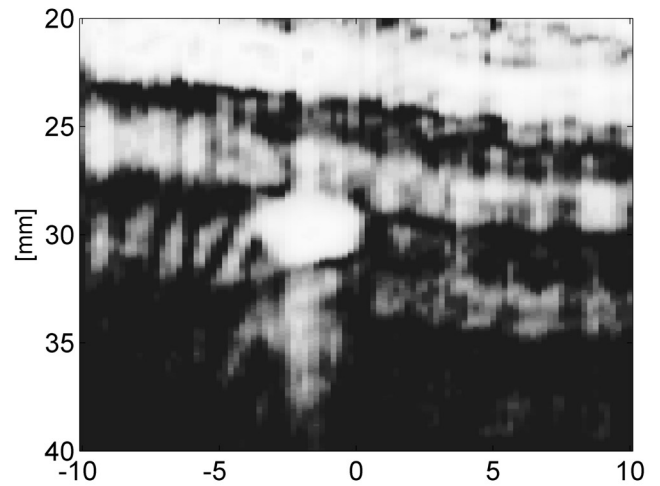
Rys. 1. Widok układu pomiarowego  
Fig. 1. Meter circuit view

Dane pomiarowe zostały zebrane przy pomocy ultrasonografu badawczego Ultrasonix SonixTOUCH (Kanada). Aparat ten dzięki specjalnemu oprogramowaniu badawczemu umożliwia zaprogramowanie sekwencji nadawczo-odbiorczych oraz akwizycję surowych danych w.cz. z każdego przetwornika. Sygnał ech był próbkowany z częstotliwością 40 MHz i rozdzielczością 12-bit. Zastosowano liniową głowicę ultradźwiękowa o 128 elementach i odległości między przetwornikami (pitch) równej 0,3048 mm. Użyto głowicy o częstotliwości 4,2 MHz, a napięcie nadawcze wynosiło 94 V.

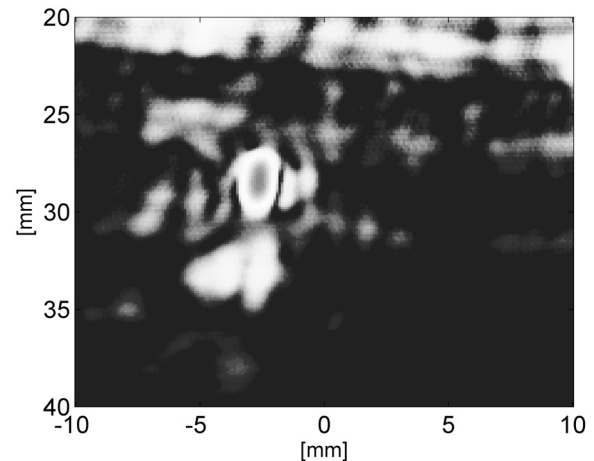
Akwizycja danych została przeprowadzona w układzie laboratoryjnym z nieruchomą głowicą na fragmencie szyny kolejowej z poprzecznie nawierconym otworem o średnicy 2 mm znajdującym się na głębokości 28 mm.

## Wyniki

Zebrane sygnały w.cz. dla schematu nadawczo-odbiorczego STA (Synthetic Transmit Aperture) zostały poddane obróbce w celu rekonstrukcji obrazu metodą SA oraz klasycznego beamformingu. W schemacie apertura nadawcza składała się z 2 przetworników, a odbiorcza ze 128. Do rekonstrukcji przyjęto prędkość podłużnej fal ultradźwięków równą 5883 m/s. Poniżej przedstawiono obrazy wad w prezentacji typu B



Rys. 2. Obraz wady w klasycznym beamformingu  
Fig. 2. The view of defect in the classic beamforming



Rys. 3. Obraz wady w metodzie syntetycznej apertury  
Fig. 3. The view of defect in the synthetic aperture method

uzyskane metodą klasycznego beamformingu (rys. 2) i metodą syntetycznej apertury (rys. 3).

Prezentacje typu B pokazane są w zakresie dynamiki wynoszącym 30 dB. Widoczna jest lepsza detekcja wady w przypadku obrazu SA. Maksymalna wartość w centrum obrazu wady była na poziomie 19 i 26 dB względem tła odpowiednio dla klasycznego beamformingu i dla metody SA.

## Podsumowanie

Systemy PA umożliwiają wizualizację w czasie rzeczywistym dając całościowy obraz wad i pozwalając na określanie ich położenia i rozmiarów. Możliwości, szybkość i efektywność badań systemami głowic fazowych stanowi nową jakość w stosunku do ciągle powszechnie stosowanej aparatury jednokanałowej i prezentacji typu A.

Zaprezentowano wstępne wyniki rekonstrukcji obrazów wad za pomocą algorytmów syntetycznej apertury oraz klasycznego beamformingu. Wszystkie rekonstrukcje uzyskano z jednego zestawu danych pomiarowych otrzymanych za pomocą badawczego ultrasonografu medycznego. Metoda SA zapewnia wyższą jakość obrazowania wad niż stosowana obecnie

w komercyjnych systemach PA metoda klasycznej beamformingu. Dodatkowo możliwość modyfikacji schematu nadawczo-odbiorczego w metodzie SA w celu optymalizacji jakości obrazowania lub prędkości badania zwiększa jej uniwersalność.

Budowana w ZU IPPT PAN aparatura umożliwi realizację tego typu obrazowania w czasie rzeczywistym dając nowe narzędzie dla praktyków zajmujących się badaniami nieniszczącymi.

## Literatura

- [1] Lewandowski M.: Systemy głowic wieloprzetwornikowych podstawy fizyczne, XVII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 8-11 marca 2011.
- [2] Moles M.: Phased Arrays For General Weld Inspections, OLYMPUS NDT, 2010.
- [3] U.S. Department of Transportation, Application Of Ultrasonic Phased Arrays For Rail Flaw Inspection, DOT/FRA/ORD-06/17 July 2006.
- [4] Lonsdale C., Wagner R., Traxler J., Meyer P.: Phased Array Ultrasonic Inspection Of New Wrought Railroad Wheel Rims, [www.standardsteel.com/rdpapers/phasedarray.pdf](http://www.standardsteel.com/rdpapers/phasedarray.pdf), 2001.
- [5] Hansen W., Hintze H., Schubert H.: Ultrasonic testing of railway axles with phased array technique, 8th European Conference on Nondestructive Testing Proceedings, Barcelona (Spain), June 17-21, 2002.
- [6] Kopeć A., Bobrowski P.: Doświadczenia z wykorzystania ultradźwiękowej techniki phased array w diagnostyce urządzeń energetycznych, XV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 10-13 marca 2009.
- [7] Ignaszak Z., Bobrowski P., Ciesiółka J.: Phased Array w odlewnictwie nowe możliwości identyfikacji nieciągłości, XVI Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów Zakopane, 9-12 marca 2010.
- [8] Lipnicki M.K., Mroczek K., Ostrowski B., Wójcik M. J.: Zaawansowane badania diagnostyczne wirników turbin energetycznych techniką Phased Array na przykładzie badania kształtowych elementów mocowania łopatek, XVII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 9-11 marca 2011.
- [9] Dragan K.: Zastosowanie głowic Phased Array w diagnostyce konstrukcji lotniczych, XVII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 9-11 marca 2011.

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