

Zastosowanie metody pełnej akwizycji macierzy do wizualizacji wad w technice UT Phased-Array

Application of full matrix capture for the visualization of flaws in the UT Phased-Array technique

Streszczenie

Ultradźwiękowe systemy Phased-Array pozwalają na różne tryby skanowania i wizualizacji wad oraz zapewniają wyższą jakość inspekcji niż tradycyjne systemy jednokanałowe. Kolejnym krokiem w rozwoju tych systemów będzie metoda akwizycji pełnej macierzy oraz zaawansowane algorytmy rekonstrukcji obrazów. W artykule przedstawiono zasady działania tych technik oraz wymagania jakie stawiają one przed systemami akwizycji i przetwarzania sygnałów. Zaprezentowano także badawczy system Uniwersalnej Platformy Ultradźwiękowej, który został opracowany specjalnie do testowania i praktycznego wdrażania tych metod. Platforma posłużyła do badań i porównania dwóch metod rekonstrukcji przy wykorzystaniu akwizycji pełnej macierzy – metody STA (Synthetic Transmit Aperture) i metody PWI (Plane Wave Imaging).

Słowa kluczowe: UT Phased-Array; akwizycja pełnej macierzy; syntetyczna apertura

Abstract

Ultrasound Phased-Array systems allow the implementation of various modes of flaw scanning and visualization, as well as provide a higher inspection quality than traditional single-channel systems. Full matrix capture and advanced image reconstruction algorithms will surely constitute the next step in the developing of these systems. The paper describes the principle of how these techniques work, and the requirements which acquisition and signal-processing systems consequently face. Also presented in the paper is the Versatile Ultrasound Research Platform, which has been developed specifically for the testing and practical implementation of these methods. The platform has already served as a tool in the testing and comparison of two reconstruction methods that employ full matrix acquisition – the STA (Synthetic Transmit Aperture) and PWI (Plane Wave Imaging) method.

Keywords: UT Phased-Array; full matrix capture; synthetic aperture

Wstęp

Systemy ultradźwiękowe do badań nieniszczących (UT) z głowicami Phased-Array (PA) zapewniają wyższą jakość inspekcji, skracają czas badania i pozwalają na różne tryby skanowania i wizualizacji wad. Na rynku dostępne są przenośne systemy PA realizujące skanowanie i rekonstrukcję obrazów 2D w czasie rzeczywistym w oparciu o zaprogramowane prawa ogniskowania (ang. focal laws) [1]. Standardową metodą rekonstrukcji linii A-scan, z których, w kolejnym kroku, tworzony jest obraz 2D, nosi nazwę beamformingu [1].

W ostatnich latach rozwijana jest metoda pełnej akwizycji macierzy (ang. FMC – Full Matrix Capture), która polega na rejestracji danych surowych ze wszystkich kanałów odbiorczych dla każdej emisji. Metoda FMC otwiera zupełnie nowe możliwości przetwarzania sygnałów ech oraz rekonstrukcji obrazów. Jedną z tych możliwości jest technika syntetycznej apertury (SA), która pozwala na uzyskanie wyższej i jednorodnej w całym badanym obszarze rozdzielczości poprzecznej, dzięki wykorzystaniu pełnej apertury

głowicy ultradźwiękowej. Algorytm TFM (ang. Total Focusing Method) polega na numerycznym ogniskowaniu w każdym punkcie obrazu 2D za pomocą opóźnień wyliczanych z czasu propagacji impulsu od elementu nadawczego, do rozpraszacza i z powrotem do każdego elementu odbiorczego. Realizacja tego algorytmu wymaga dużej mocy obliczeniowej oraz ogromnej przepustowości danych z systemu akwizycji w reżimie pracy FMC. Dostęp do pełnej macierzy danych surowych umożliwia także realizację zaawansowanych algorytmów przetwarzania sygnałów i otwiera drogę do zupełnie nowych aplikacji i badania obiektów „trudnych”, dla których metoda PA była nieskuteczna [2].

W artykule krótko przedstawiono podstawy działania metod FMC oraz TFM, omówiono wymagania dot. aparatury do ich realizacji oraz zaprezentowano rezultaty badań własnych.

Należy się spodziewać, że omawiane techniki SA będą w najbliższych aktywnie rozwijane i wprowadzane do praktyki przemysłowych badań nieniszczących.

Dr Marcin Lewandowski, inż. Mateusz Walczak, mgr. Tomasz Steifer – Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: mlew@ippt.pan.pl

Metody akwizycji pełnej macierzy

Odbiór i zapamiętanie sygnałów ech ze wszystkich elementów głowicy dla każdego nadania nazywany jest akwizycją pełnej macierzy – FMC (ang. Full Matrix Capture). Metoda ta wymaga znacznych zasobów pamięci oraz przepustowości systemu akwizycji, a jeśli proces wizualizacji ma być realizowany w czasie rzeczywistym, także bardzo dużej wydajności obliczeniowej. Przykładowo, dla 64 kanałów jednoczesnego próbkowania z częstotliwością 100 MHz i rozdzielczością 8-bitów, przepustowość strumienia danych FMC wynosi 6,4 GB/s.

Metoda TFM/STA

Metoda FMC sama z siebie nie definiuje schematu nadawczo-odbiorczego, czyli liczby i kolejności pobudzenia przetworników nadawczych, ani profilu opóźnień. Schemat ten należy rozpatrywać razem z planowaną metodą (algorytmem) rekonstrukcji obrazu. W wielu pracach z metodą FMC stosowany jest schemat i rekonstrukcja STA (ang. Synthetic Transmit Aperture), w której nadaje się po kolei każdym pojedynczym przetwornikiem [3]. Surowe dane (FMC) są wejściem do algorytmu rekonstrukcji obrazu, które polega na numerycznym ogniskowaniu odebranych ech w poszczególnych pikselach obrazu – algorytm ten znany jest w literaturze NDT pod nazwą Total Focusing Method (TFM). W podejściu tym w kolejnych seriach pojedyncze przetworniki nadają falę kulistą i rejestrowany jest sygnał powrotny na wszystkich przetwornikach odbiorczych. Dla każdego nadania rekonstruowane są obrazy na zadanej z góry siatce obrazowania. Takie obrazy niskiej rozdzielczości są następnie uśredniane pomiędzy nadaniami dla uzyskania pojedynczego obrazu wysokiej rozdzielczości.

Obrazowanie falą płaską

Wadą metody STA jest względnie długi czas akwizycji danych oraz duża ilość danych do obliczeń oraz liczba obliczeń. Algorytm rekonstrukcji tworzy wynikową wartość każdego piksela obrazu z N^2 sygnałów ech, gdzie N jest rozmiarem pełnej apertury nadawczo-odbiorczej.

Metoda obrazowania falą płaską (Plane Wave Imaging – PWI) jest obecnie szeroko stosowane w obrazowaniu medycznym do szybkiego obrazowania ruchomych struktur [4]. W odróżnieniu od klasycznych metod obrazowania, w których pojedyncza linia obrazu powstaje w oparciu o sygnał z nadania jednej ogniskowanej wiązki, w metodzie PWI z pojedynczego nadania uzyskujemy pełny obraz 2D. Rozwiązanie takie skutkuje istotnym wzrostem w częstotliwości odświeżania pełnego obrazu (proporcjonalnym do liczby przetworników głowicy). Jednocześnie, ponieważ w nadawaniu uczestniczy większa liczba przetworników, wzrasta moc akustyczna wprowadzana do ośrodka, a co za tym idzie – większy jest stosunek sygnału do szumu.

Nadawanie w metodzie PWI polega na nadaniu fali płaskiej pełną aperturą głowicy (tj. jednoczesnym pobudzeniu

wszystkich przetworników). W efekcie, fale kuliste generowane przez pojedyncze przetworniki tworzą w ośrodku falę o (w przybliżeniu) płaskim froncie falowym. Pozwala to na uzyskanie stałego ogniskowania we względnie szerokim przedziale głębokości pomiarowej. Ponadto, wprowadzając liniowe opóźnienia dla kolejnych przetworników nadawczych możemy wygenerować także falę płaską pod różnymi kątami do osi głowicy. Wykorzystanie informacji z kilku kątów nadawczych pozwala na poprawę jakości obrazu – jest to technika składania obrazów (ang. Compounding). Zgodnie z rozważaniami teoretycznymi, już niewielka liczba kątów pozwala osiągnąć podobne lub lepsze parametry obrazu, co w przypadku metody STA [5].

Rekonstrukcja

W przypadku obu metod rekonstrukcja odbywa się podobnie. Dla każdego punktu na zadanej siatce rekonstrukcji obrazu i dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów liczone są opóźnienia: od każdego nadajnika, do danego piksela i z powrotem do każdego elementu odbiorczego (standardowo przy założeniu znanej i stałej prędkości fali w ośrodku). Wypadkowa energia sygnału w punkcie liczona jest jako średnia odpowiednio opóźnionych sygnałów.

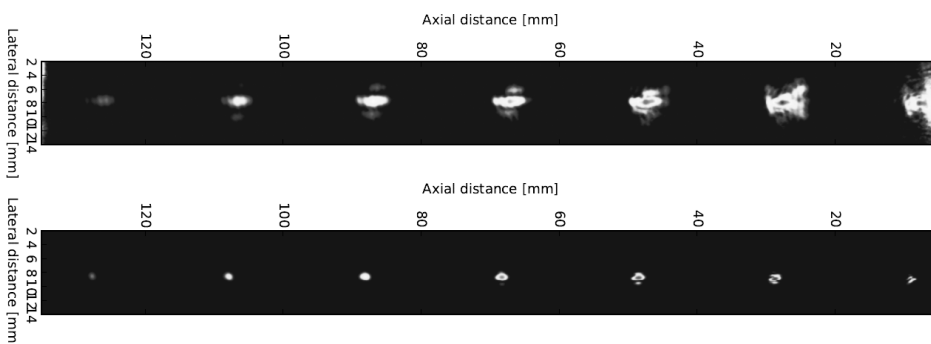
Umiejętne przedstawienie obliczeń w postaci prostych operacji macierzowych pozwala na ich łatwe zrównoleglenie i tym samym znaczne przyspieszenie. Zależnie od charakterystyki ośrodka rekonstrukcja może wymagać uwzględnienia dodatkowych efektów, takich jak np. refrakcja.

Ponadto, jakość obrazu może być dalej optymalizowana przez wykorzystanie dodatkowych metod i algorytmów – np.: apodyzacja po stronie odbiorczej, alternatywne metody rekonstrukcji, adaptacyjny beamforming, etc.

Na rysunku 1 pokazano porównanie metody STA oraz PWI dla 64-elementowej głowicy Phased-Array (Olympus® 5L64) i częstotliwości nadawczej 5,5 MHz. Dla metody PWI wykonane były jedynie 21 nadania, zaś dla STA 64 nadania. W obu metodach stosuje się pełną akwizycję macierzy, więc całkowita ilość danych do przetwarzania zależy liniowo od liczby nadań. Zastosowany algorytm rekonstrukcji TFM pozwala na uzyskanie jednorodnej rozdzielczości poprzecznej w całym zakresie głębokości.

Przegląd rozwiązań

Dostępne na rynku przenośne i stacjonarne systemy UT Phased-Array (m.in. Olympus, Zetec) działają w oparciu o klasyczne algorytmy rekonstrukcji obrazów. Większość systemów ma ograniczoną do 32 liczbę równoległych kanałów akwizycji – i taka jest maksymalna wielkość apertury używana w procesie tworzenia obrazu. Zastosowane układy multiplexerów pozwalają na obsługę głowic PA o liczbie elementów do 128. Na dzień dzisiejszy jedynym przenośnym systemem z wbudowaną funkcją FMC jest aparat GEKKO firmy Karl Deutsch. System ten potrafi realizować rekonstrukcję metodą TFM z prędkością ok. 20 obrazów/sek.



Rys. 1. Obraz B-mode wad w monobloku z 7 otworami $\phi=3\text{mm}$ nawierconymi bocznie: (górny) rekonstrukcja PWI (21 nadań); (dolny) rekonstrukcja STA (dla 64 nadań). Wizualizacja w zakresie dynamiki 20dB.

Fig. 1. A B-mode image of defects in the monobloc with 7 side-drilled holes $\phi=3\text{mm}$: (top) the PWI reconstruction (21 firings); (bottom) the STA reconstruction (64 firings). Visualization dynamic range of 20dB.

Z drugiej strony są dostępne stacjonarne systemy PA, które wspierają nawet do 256 równoległych kanałów akwizycji (np. Zetec DYNARAY oraz systemy modułowe: Olympus FOCUS PX, Zetec QUARTZ). Niestety, żaden z tych systemów nie umożliwia wydajnej implementacji metody FMC z powodu ograniczonej przepustowości interfejsu danych (<50 MB/s).

Ograniczenia dostępnych systemów powodują, że niemal wszystkie prace badawcze dot. metod FMC korzystają z implementacji w trybie off-line. Opracowana w IPPT PAN Uniwersalna Badawcza Platforma Ultradźwiękowa (rys. 2) została oparta na nowej architekturze akwizycji i równoległego przetwarzania danych na procesorach graficznych (GPU). Platforma zapewnia realizację akwizycji danych metodą FMC oraz ich przetwarzania w czasie rzeczywistym z użyciem algorytmu TFM.

Uniwersalna badawcza platforma ultradźwiękowa

Platforma może obsługiwać wszystkie ultradźwiękowej głowice PA [6]. Obecnie, dzięki specjalnemu adapterowi, możemy korzystać ze standardowych głowic od aparatu OmniScan firmy Olympus®. Platforma posiada 192 elektroniczne tory nadawczo-odbiorcze oraz tyle samo równoległych kanałów akwizycji. Dzięki temu możliwa jest akwizycja pełnej macierzy danych z całej 192-elementowej głowicy jednocześnie.

Surowe dane, sygnały w.cz., są przesyłane z prędkością do 9GB/s do pamięci wbudowanego komputera PC, a następnie trafiają do procesorów GPU, gdzie zaimplementowane są algorytmy rekonstrukcji obrazów. Wyposażenie systemu w max. 5 wysokowydajnych karty GPU (Nvidia® Titan X) daje dostępną moc obliczeniową 30 TFLOP/s dla liczb zmiennopozycyjnych pojedynczej precyzji. Implementacja własnych algorytmów obliczeniowych odbywa się przy użyciu standardowych narzę-

dzi programistycznych – tj. środowiska Nvidia® CUDA lub OpenCL. Dostępna przepustowość i wydajność pozwala na realizację w czasie rzeczywistym rekonstrukcji 2D algorytmem TFM z prędkością do kilkuset obrazów na sekundę.

Pełna programowalność systemu, zarówno w zakresie określania schematów nadawczo-odbiorczych, jak i przetwarzania sygnałów, daje niemal nieograniczone możliwości realizacji badań porównawczych oraz testowania i walidacji nowych metod i algorytmów diagnostycznych.



Rys. 2. Widok Uniwersalnej Badawczej Platformy Ultradźwiękowej ze standardową 128-elementową głowicą Phased-Array firmy Olympus®
Fig. 2. A view of the Versatile Ultrasound Research Platform with a standard 128-element Phased-Array Olympus® probe.

Podsumowanie

W IPPT PAN aktywnie prowadzimy prace B+R w zakresie nowych metod i aparatury do diagnostyki ultradźwiękowej w aplikacjach medycznych i przemysłowych. Opracowana przez nas Uniwersalna Badawcza Platforma Ultradźwiękowa jest unikalnym narzędziem pozwalającym na testowanie, wdrażanie i walidację dowolnych metod akwizycji sygnałów i przetwarzania surowych sygnałów ech w.cz. z głowic Phased-Array.

Metody rekonstrukcji bazujące na pełnej macierzy danych pozwalają nie tylko na zwiększenie rozdzielczości oraz poprawę oceny wielkości/kształtu wad, ale także na zastosowanie obrazowania do zupełnie nowych materiałów i obiektów niejednorodnych, które dotychczas były trudne lub niemożliwe do badania. Rozwijane obecnie algorytmy obrazowania adaptacyjnego pozwolą na uzyskanie obrazowania z poprawną geometrią dla obiektów wielowarstwowych i/lub z nierówną powierzchnią wejścia.

Nasza Platforma jest unikalnym urządzeniem badawczym, które może znaleźć zastosowanie zarówno w laboratorium przy realizacji prac B+R w zakresie metod UT, jak i na linii produkcyjnej do wdrożenia zaawansowanych metod FMC w praktyce.

Literatura

- [1] M. Lewandowski: Metody rekonstrukcji obrazu z głowic Phased-Array, XVIII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów Zakopane, 13-16 marca 2012.
- [2] M. Lewandowski: Nowe metody syntetycznej apertury dla systemów Phased-Array, XXII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 18-20 marca 2016.
- [3] M. Lewandowski: Nowe metody i zastosowania ultradźwiękowych systemów Phased-Array, XXI Seminarium Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów Zakopane, 18-20 marca 2015.
- [4] M. Tanter, M. Fink: Ultrafast imaging in biomedical ultrasound, IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 61(1):102-19, 2014.
- [5] L. Le Jeune, S. Robert, E. Lopez Villaverde, C. Prada: Plane Wave Imaging for ultrasonic non-destructive testing: Generalization to multimodal imaging, Ultrasonics, 64:128-138, 2016.
- [6] M. Lewandowski, M. Walczak, B. Witek, P. Kulesza, K. Siewlewicz: Modular & Scalable Ultrasound Platform with GPU Processing, IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Dresden, Germany, 2012.