
**XXI Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 18-20 marca 2015**

**NOWE METODY I ZASTOSOWANIA ULTRADŹWIĘKOWYCH
SYSTEMÓW PHASED-ARRAY**

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

1. WSTĘP

W ostatnich latach następuje dynamiczny rozwój metod, systemów i aplikacji głowic wieloelementowych w zastosowaniach do ultradźwiękowych badań nieniszczących. Systemy Phased-Array (PA) zapewniają wyższą jakość inspekcji poprzez różne mody obrazowania wad, zwiększoną prędkość badania i nowe możliwości skanowania obiektów (skany liniowe, kątowe). Oferowane obecnie na rynku systemy PA pozwalają na wizualizację w czasie rzeczywistym obrazów 2D za pomocą skanowania wiązką ultradźwiękową i rekonstrukcji obrazu metodą beamformingu.

Pojawiające się na horyzoncie metody syntetycznej apertury (ang. SAFT – Synthetic Aperture Focusing Technique), a w szczególności metoda akwizycji pełnej macierzy (ang. FMC – Full Matrix Capture), otwierają nowe możliwości obrazowania wad i zaawansowanego przetwarzania sygnałów ech. Niestety implementacja metod FMC wymaga nowych, znacznie bardziej wydajnych systemów akwizycji i przetwarzania sygnałów.

W referacie przedstawiono i porównano klasyczne metody obrazowania głowicami Phased-Array oraz nowe, oparte na technice syntetycznej apertury i akwizycji pełnej macierzy. Pokazano możliwości i aplikacje tych metod, które pojawiają się dopiero na horyzoncie. W drugiej części omówiono architekturę i wymagania dla wielokanałowej aparatury defektoskopowej niezbędnej do badania i wdrażania tych nowych metod. Przedstawiono także powstającą w IPPT PAN ultradźwiękową platformę badawczą, która została specjalnie zaprojektowana i zoptymalizowana do realizacji zaawansowanych metod rekonstrukcji.

2. METODY PHASED-ARRAY I FMC

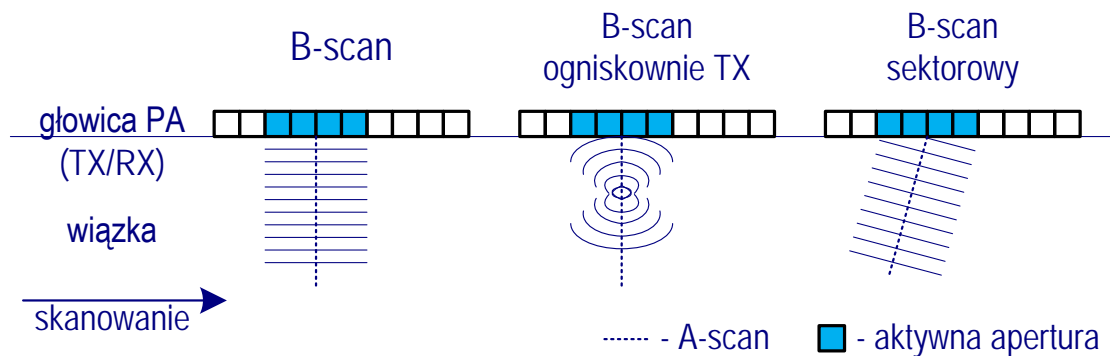
Podstawy fizyczne oraz metody rekonstrukcji obrazów z głowic PA były prezentowane przez autora na seminariach zakopiańskich w 2011 i 2012 roku [1,2].

2.1. Klasyczne systemy Phased-Array

Stosowane obecnie systemy Phased-Array wykorzystują głowice wieloelementowe do wytwarzania wiązek ultradźwiękowych, które symulują skanowanie standardowymi głowicami jednoelementowymi (płaskimi, ogniskowanymi lub kątowymi) [3]. Obrazy 2D są tworzone z kolejnych linii A-scan. Każda linia A-scan jest rekonstruowana z zadanej liczby kolejnych elementów głowicy PA (ograniczonej liczbą kanałów elektronicznych systemu).

Grupa tych elementów głowicy, które są traktowane jako jeden wirtualny przetwornik ultradźwiękowy, jest nazywana aperturą¹.

Klasyczne metody PA skanowania wiązką (tzw. B-scan) przedstawiono na rys. 1. System elektroniczny zapewnia odpowiednie fazowanie (opóźnienia) sygnałów nadawczych dla poszczególnych elementów głowicy w celu sterowania wiązką. B-scan bez ogniskowania nadawczego polega na pobudzeniu wszystkich elementów apertury w tym samym czasie. Zastosowanie odpowiednich opóźnień pozwala na uzyskanie ogniskowania nadawczego na zadanej głębokości lub odchylenie wiązki (dla skanu kąтового). Po stronie odbiorczej sygnały echa odebrane z grupy tych samych elementów (apertura odbiorcza) są zamieniane na postać cyfrową i trafiają do układu rekonstrukcji – beamformera.



Rys. 1. Klasyczne metody Phased-Array ze skanowaniem (od lewej do prawej):
B-scan bez ogniskowania nadawczego, B-scan z ogniskowaniem nadawczym,
B-scan sektorowy bez ogniskowania nadawczego.

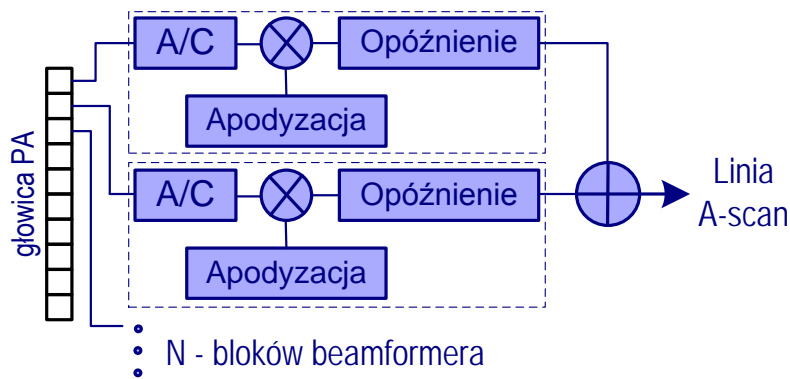
Układ beamformera (rys. 2) odpowiada za rekonstrukcję linii A-scan z sygnałów echa odebranych z poszczególnych elementów głowicy. Koncepcja beamformera sprowadza się do cyfrowego zsumowania przyczynków z pojedynczych elementów. W przypadku ogniskowania po stronie odbiorczej (analogicznie jak to miało miejsce przy nadawaniu) należy odpowiednio opóźnić odebrane sygnały przed ich zsumowaniem. Dodatkowo dla poprawy efektywnego kształtu wiązki ultradźwiękowej stosuje się apodyzację, czyli współczynniki wagowe dla poszczególnych elementów przed ich sumowaniem.

Dla emulacja głowicy płaskiej mamy do czynienia z brakiem ogniskowania (opóźnień) po stronie nadawczej i odbiorczej. Beamformer po prostu dodaje do siebie wartości sygnałów echa ze wszystkich elementów. Intuicyjnie można ten proces zrozumieć jako fizyczne elektryczne połączenie wszystkich elementów apertury przy nadawaniu i odbieraniu. W ten sposób z małych elementów głowicy PA tworzymy jeden większy płaski przetwornik, którego wielkość odpowiada grupie połączonych elementów (aperturze)².

W procesie nadawania wszystkie elementy pracują łącznie – dobrze emulując pojedynczy większy przetwornik. Przy odbiorze echa, które docierają do pojedynczych elementów sumują się elektrycznie i w ten sposób otrzymujemy klasyczny sygnał linii A-scan. Jak widać jest to ta sama operacja, którą realizuje sumator w beamformerze!

¹ W optyce aperturą nazywamy rozmiar otworu/obiektywu. Tutaj mówiąc o aperturze mamy na myśli zarówno logiczną grupę kolejnych elementów nadawczych/odbiorczych, jak i ich całkowitą szerokość.

² Faktycznie występują małe przerwy pomiędzy kolejnymi elementami, czyli nasz połączony przetwornik jest nieco dziurawy, co wprowadza dodatkowe efekty fizyczne i modyfikuje wiązkę. Po szczegóły odsyłam do referatu [1].



Rys. 2. Schemat blokowy toru przetwarzania w metodzie beamformingu z głowicy Phased-Array. Z każdym elektronicznym kanałem odbiorczym związany jest jeden blok beamformera.

Tworzenie kolejnych linii A-scan odbywa się przez elektroniczne skanowanie aperturą nadawczo-odbiorczą całej głowicy ultradźwiękowej. Odpowiednie przełączenie kanałów elektronicznych urządzenia do kolejnych elementów głowicy PA jest analogiem fizycznego przesunięcia wirtualnego przetwornika (apertury). Fizyczna odległość pomiędzy kolejnymi przetwornikami w głowicy wieloelementowej (ang. pitch) jest minimalnym krokiem, o jaki system PA może przesunąć aperturę. Dla każdego położenia apertury beamformer rekonstruuje jedną linię A-scan, a kolejne linie tworzą w wyniku kompletny obraz B-scan. Konfiguracja systemu PA polega na ustaleniu tzw. praw ogniskowania (ang. focal laws), które określają wartości opóźnień stosowanych po stronie nadawczej i odbiorczej, a tym samym determinują kształt wiązki ultradźwiękowej używanej do obrazowania.

Cechy i ograniczenia klasycznej metody Phased-Array:

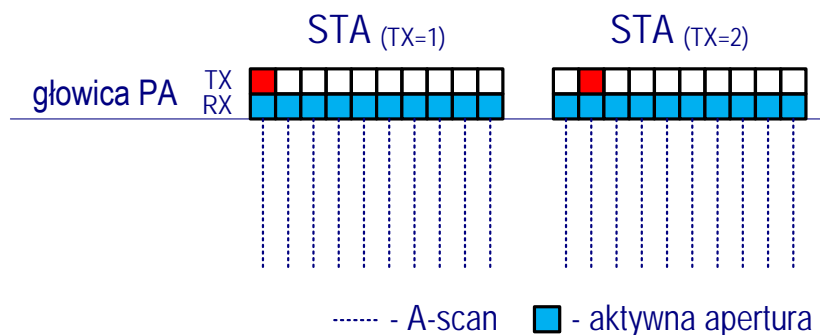
- Apertura nadawcza i odbiorcza są tożsame – ich wielkość jest ograniczona liczbą kanałów elektronicznych stosowanego systemu (zwykle w zakresie 16–128). Ponieważ rozdzielczość poprzeczna obrazowania jest proporcjonalna do długości fali oraz odwrotności apertury (kryterium Rayleigha), to zwiększanie apertury poprawia tę rozdzielczość. Systemy PA z mniejszą liczbą kanałów nie wykorzystują całej apertury stosowanej głowicy, więc nie zapewniają optymalnej rozdzielczości.
- Rekonstrukcja linii A-scan opiera się na prawach ogniskowania, które z kolei zakładają znajomość i stałość prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w badanym materiale. Wiele badanych obiektów nie spełnia tych założeń, co powoduje zniekształcenia przy rekonstrukcji ich obrazu.
- W większości komercyjnych systemów PA proces beamformingu jest realizowany sprzętowo, co powoduje, że surowe sygnały ech ultradźwiękowych giną w procesie rekonstrukcji (nie są zapamiętywane). Dlatego na etapie przeglądu nie można już zmieniać praw ogniskowania – tj. nie można powtórnie zrekonstruować obrazów/linii A-scan dla innych parametrów.

2.2. Metody FMC

Metody akwizycji pełnej macierzy (ang. FMC - Full Matrix Capture) są immanentnie związane z metodami syntetycznej apertury (ang. SAFT - Synthetic Aperture Focusing Technique) [2]. Koncepcja tych metod opiera się na numerycznej syntezie większej apertury z wielu mniejszych w celu zwiększenie rozdzielczości obrazowania.

W odróżnieniu od przedstawionych powyżej klasycznych metod PA, w metodach SAFT zwykle rozróżniamy aperturę nadawczą i odbiorczą oraz definiujemy schematy nadawczo-odbiorcze, które niezależnie określają położenie i wielkość każdej z nich. Przedstawienie

pełnego przeglądu i teorii metod syntetycznej apertury daleko wykracza poza zakres tego referatu. Dla ilustracji pokazemy jeden z najprostszych schematów – syntetyczną aperturę nadawczą (ang. STA – Synthetic Transmit Aperture). W schemacie STA (rys. 3) nadajemy i skanujemy pojedynczym elementem głowicy PA – apertura nadawcza jest 1-elementowa i przesuwa się o 1 element w każdym cyklu nadawczym. Po stronie odbiorczej zbieramy sygnał ze wszystkich elementów głowicy po każdym nadaniu. Jeśli głowica ma N elementów, to całkowita macierz sygnałów ech, po przeskanowaniu całej głowicy (N nadań), składa się z $N \cdot N$ ech ultradźwiękowych. Algorytm SAFT umożliwi rekonstrukcję całego obrazu (wszystkich linii A-scan) z pojedynczego nadania. Jest to tzw. obraz niskiej rozdzielczości, który dopiero po zsumowaniu z obrazami z kolejnych nadań tworzy obraz wynikowy. Jak widać, w tym schemacie apertura nadawcza jest inna niż apertura odbiorcza. Apertura nadawcza jest jednoelementowa, ale dzięki procedurze skanowania i sumowaniu rekonstruowanych obrazów niejako syntezujemy (rozszerzamy) aperturę nadawczą w każdym kroku, skąd jej nazwa.



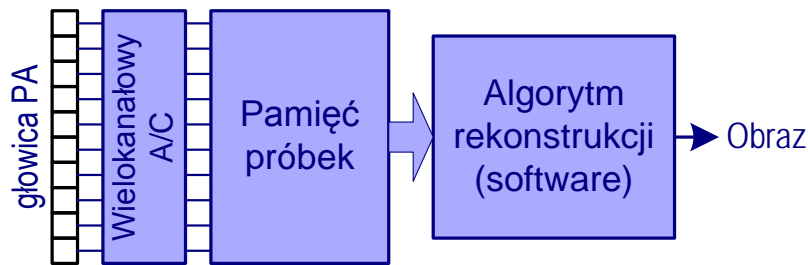
Rys. 3. Metoda syntetycznej apertury nadawczej (STA) z akwizycją pełnej macierzy.

Proces rekonstrukcji obrazów z odebranych sygnałów ech jest nieco podobny do metody beamformingu, z tą różnicą, że musimy uwzględnić opóźnienia, które powstają na geometrycznej drodze pomiędzy nadajnikiem, punktem obrazu i odbiornikiem. Należy także podkreślić, że przy każdym nadaniu rekonstruowany jest cały obraz (N linii), a nie pojedyncza linia, jak to miało miejsce przy beamformingu.

Z powyższego opisu można się zorientować, że wymagania związane z algorytmem tworzenia obrazu są wielokrotnie większe (co najmniej N razy) oraz że do kompletnej rekonstrukcji musimy mieć dostęp do pełnej macierzy danych ech³. W odróżnieniu od klasycznej metody PA odchodzimy tutaj od prostego emulowania zwykłych głowic jednoprzetwornikowych. Algorytmy rekonstrukcji SAFT są w stanie uzyskać ogniskowanie nadawcze i odbiorcze bez konieczności stosowania fizycznego ogniskowania wiązki nadawczej.

Na rys. 4 przedstawiono schemat blokowy toru przetwarzania w metodzie FMC. Sygnały ze wszystkich elementów są próbkowane i trafiają w postaci cyfrowej do pamięci danych. Następnie oprogramowanie wykonuje algorytmy rekonstrukcji i tworzy obraz wynikowy. Komplet informacji jest przechowywany w pamięci i może być zapamiętany do dalszego przetwarzania.

³ Przykładowo dla 128 kanałowego systemu z próbkowaniem 8-bit/100MHz i głębokością obrazowania 10cm w stali, pełna macierz danych będzie miała ok. 55MB ($128 \cdot 128 \cdot 100\text{MHz} \cdot 2 \cdot 0,1\text{m} / 6000\text{m/s}$).



Rys. 4. Schemat blokowy toru przetwarzania w metodzie FMC.

Cechy i możliwości metody FMC:

- Apertura nadawcza i odbiorcza nie są tożsame – wielkość każdej z nich oraz metoda skanowania są określone przez konkretny schemat nadawczo-odbiorczy, który może być zoptymalizowany do danej aplikacji.
- Możliwe jest uzyskanie wyższej/optymalnej rozdzielczości poprzecznej dzięki wykorzystaniu pełnej apertury stosowanej głowicy PA.
- Istnieje możliwość dowolnego kształtowania praw ogniskowania, w szczególności uwzględnienia warstwowości i zmienności prędkości w ośrodku, co daje zupełnie nowe możliwości obrazowania w ośrodkach niejednorodnych.
- Wymagany jest system elektroniczny z odpowiednią liczbą kanałów akwizycji i/lub umożliwiającą niezależne przełączanie torów nadawczych i odbiorczych oraz akwizycję i zapamiętywanie surowych sygnałów ech z każdego kanału.
- Do realizacji obrazowania w czasie rzeczywistym wymagany jest system o bardzo wysokiej przepustowości danych i wydajności obliczeniowej.
- Dzięki możliwości zapamiętania pełnej macierzy danych możliwa jest wielokrotna rekonstrukcja obrazów dla różnych parametrów.

3. NOWE MOŻLIWOŚCI I APLIKACJE FMC

Porównanie jakości obrazowania klasycznych metod rekonstrukcji PA oraz metody SAFT działającej na danych FMC przeprowadził Holmes i wsp. [4]. W swojej pracy przebadał symulacyjnie i doświadczalnie metody B-scan (rys. 1): nieogniskowaną, ogniskowaną i sektorową oraz metodę STA. Dla 64-elementowej głowicy na częstotliwość 5MHz i symulowanej wady punktowej określono wskaźnik jakości w oparciu o kształt funkcji PSF (Point Spread Function). Wskaźnik ten określał pole powierzchni funkcji PSF na poziomie -6dB, unormowane do kwadratu długości fali – tj. im mniejsza wartość, tym mniejszy (bardziej skupiony) obraz na ekranie. Jego wartość wynosiła: 2,35 dla nieogniskowanego B-scan, 1,71 dla ogniskowanego B-scan, 2,33 dla sektorowego B-scan i tylko 0,46 dla STA.

Co ważniejsze, metody SAFT dają nie tylko obraz lepszej rozdzielczości, ale też umożliwiają dokładniejszą ocenę wielkości wad. Chahbaz i Sicard [5] porównali ocenę wielkości wad w bloku aluminiowym z bocznie nawierconymi otworami o średnicy 1mm. Klasyczny B-scan z jednym ogniskiem nadawczym i ogniskowaniem dynamicznym po stronie odbiorczej dał odczyty w zakresie 2–3mm, natomiast metoda SAFT w zakresie 0,9–1,1mm. Podobne wnioski przedstawił Kreutzbruck i wsp. [6], który porównał jakość detekcji oraz zgodność oceny rozmiaru wad w kole turbiny o średnicy 1,5m z wadami sztucznymi – otworami płaskodennymi o średnicy 1mm. Zastosowano 16-elementową głowicę PA o częstotliwości 2,25MHz. Porównano metodę TOFT oraz SAFT. Jakość detekcji (procent wykrywanych wad) był podobny w obu metodach, natomiast jakość oceny rozmiaru była znacznie lepsza dla metody SAFT niż dla TOFD.

Szczególnie interesującą nową aplikacją metod FMC jest badanie i obrazowanie obiektów niejednorodnych lub warstwowych. Sutcliffe i wsp. [7] zaimplementował obrazowanie w czasie rzeczywistym bloku stalowego z wadami sztucznymi z niepłaskiej powierzchni o znanej geometrii. 32-elementowa głowica PA o częstotliwości 5MHz była przyłożona przez dopasowaną przekładkę z tworzywa do krzywej powierzchni wzorca stalowego. Na podstawie znanej geometrii zostały wyliczone parametry rekonstrukcji algorytmu SAFT, w którym uwzględniono dwie różne prędkości w warstwach ośrodka. Dane z systemu *Micropulse 5PA* były przekazywane do komputera PC, gdzie na procesorze GPU zaimplementowano algorytm rekonstrukcji. Uzyskano poprawne obrazowanie wad sztucznych.

Jeszcze bardziej spektakularny algorytm automatycznego ogniskowania zaprezentował Camacho i wsp. [8]. W badaniu zanurzeniowym 128-elementowa głowica PA na częstotliwość 5MHz miała obrazować krążek aluminiowy z wadami sztucznymi. W odróżnieniu od pracy [7], tutaj algorytm nie znał geometrii układu, lecz stosował automatyczne wykrywanie krawędzi – powierzchni wejścia do automatycznej adaptacji parametrów rekonstrukcji. Po fazie adaptacji algorytm realizował poprawne obrazowanie wzorca.

Podane przykłady zastosowań i rezultatów uzyskanych metodami FMC wskazują na duży potencjał aplikacyjny tej metody. Należy jednak pamiętać, że praktyczne wdrożenie tych metod wymaga nowej aparatury zdolnej do udźwignięcia dużej przepustowości akwizycji danych i złożonych algorytmów obliczeniowych.

4. APARATURA DLA APLIKACJI FMC

Dostępne obecnie na rynku systemy PA zostały opracowane do obrazowania metodami klasycznego beamformingu (Olympus, Zetec). Część z nich ma możliwości zapamiętywania pojedynczych zestawów danych surowych do późniejszej rekonstrukcji off-line. Wewnętrzna architektura akwizycji i przetwarzania sygnału tych systemów nie może być łatwo dostosowana do implementacji nowych metod obrazowania takich jak FMC.

W laboratoriach naukowych do prowadzenia badań metod FMC stosuje się najczęściej systemy wielokanałowej akwizycji danych i przetwarzanie post-processing.

Przykładowym systemem, który chwali się wsparciem dla algorytmów SAFT, jest system *PCUS pro Array* [9] opracowany przez Instytut Fraunhofera. *PCUS* obsługuje głowice PA do 64 elementów w konfiguracji 16:64. Zewnętrzny interfejs o przepustowości do 100MB/s pozwala na transfer danych surowych do zewn. komputera PC, ale przy bardzo niskiej częstotliwości powtarzania.

4.2. Uniwersalna Platforma Ultradźwiękowa

W ciągu ostatnich 5 lat w IPPT PAN została opracowana zupełnie nowa badawcza Platforma Ultradźwiękowa zoptymalizowana do implementacji nowych zaawansowanych metod obrazowania i przetwarzania.

Rozwiązanie Platformy jest oparte na architekturze strumieniowego przesyłania i przetwarzania danych. Jako interfejs komunikacyjny wybrano PCIe gen. 2, który zapewnia przepustowość do 6GB/s⁴. Całość przetwarzania danych (w tym rekonstrukcji obrazów) została zaimplementowana na procesorach graficznych (GPU). Platforma jest skalowalna zarówno w zakresie liczby obsługiwanych kanałów, jak i dostępnej mocy obliczeniowej.

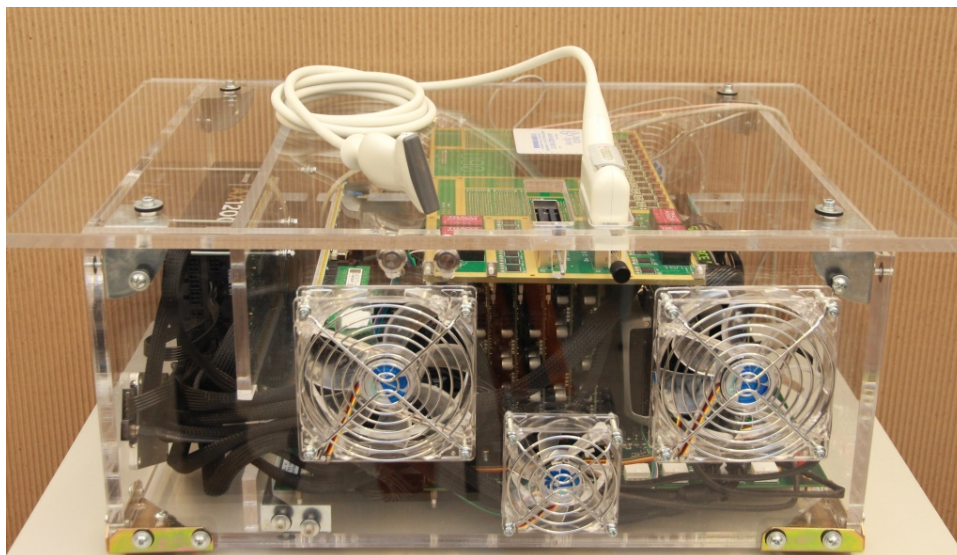
Opracowano dwa prototypy Platformy:

1. Uniwersalny system badawczy (rys. 5) obsługujący 64–192 kanałów akwizycji oraz 192 kanały nadawcze [11]. System współpracuje z głowicami do 192 elementów.

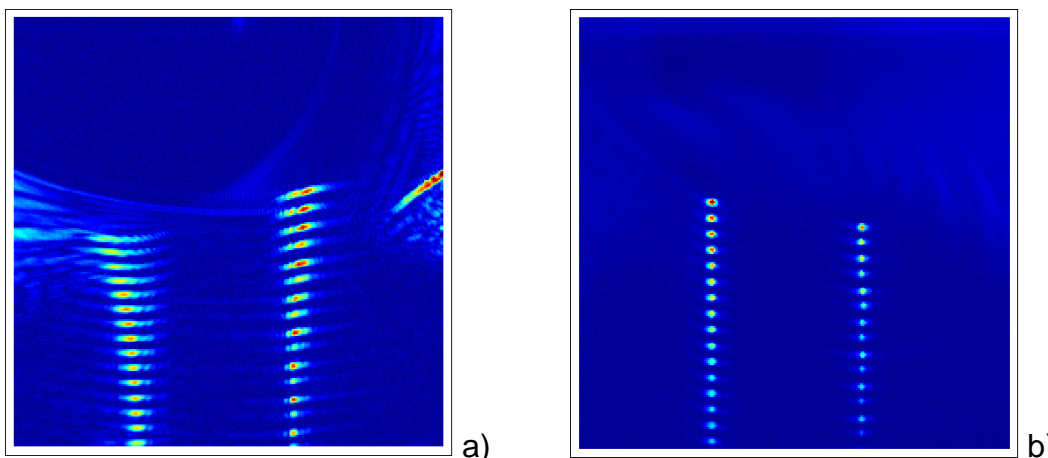
⁴ *GE Sensing & Inspection Technologies* zaprezentowało przemysłowe rozwiązanie wielokanałowego systemu ultradźwiękowego opartego na standardzie ACTA i interfejsie PCIe gen. 1 [10].

2. System przenośny ograniczony do 32 kanałów nadawczo-odbiorczych z multiplexerem do obsługi głowic do 128 elementów [12].

Do implementacji algorytmów używane są standardowe języki programowania procesorów GPU – Nvidia CUDA/OpenCL, co znacznie ułatwia i przyspiesza proces tworzenia i testowania nowych metod. Na rys.6 pokazano rezultat działania algorytmu STA zaimplementowanego na Platformie.



Rys. 5. Widok prototypu badawczej Platformy Ultradźwiękowej.



Rys. 6. Przykładowe zrekonstruowane obraz fantomu nitkowego metodą STA dla 128 nadajników i odbiorników: a) obraz niskiej rozdzielczości, b) obraz wysokiej rozdzielczości.

5. PODSUMOWANIE

Systemy Phased-Array są dzisiaj najnowocześniejszym rozwiązaniem w zakresie ultradźwiękowych metod NDT. Z drugiej strony, rozwijane naukowo nowe metody akwizycji i przetwarzania danych pokazują dalsze możliwości udoskonalania tej techniki. Przedstawione w referacie metody FMC wymagają nowej zoptymalizowanej aparatury oraz bardzo wydajnych rozwiązań obliczeniowych.

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.

Opracowane w IPPT PAN wydajne wielokanałowe Platformy Ultradźwiękowe mogą już dzisiaj służyć do testowania i wdrażania wszystkich przedstawionych metod. Planujemy dalszy rozwój tych systemów w kierunku aplikacji przemysłowych i liczymy na zainteresowanie ze strony jednostek badawczych oraz partnerów komercyjnych.

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] M.Lewandowski, Systemy głowic wieloprzetwornikowych – podstawy fizyczne, XVII Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW Zakopane, 8–11 marca 2011.
- [2] M.Lewandowski, Metody rekonstrukcji obrazu z głowic Phased-Array, XVIII Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW Zakopane, 13–16 marca 2012.
- [3] Olympus NDT, Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline”, Olympus NDT, 2004.
- [4] C.Holmes, B.W. Drinkwater, P.D. Wilcox, Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation, *NDT&E International* 38(2005):701–711.
- [5] A.Chahbaz, R.Sicard, Comparative Evaluation Between Ultrasonic Phased Array and Synthetic Aperture Focusing Techniques, in: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Bellingham, Washington, 14-19 July 2002 (AIP Conference Proceedings / Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation)*, American Institute of Physics, 2003.
- [6] M.Kreutzbruck, J.Prager, R.Böhm, J.Kitze, G.Brekow, Progress in Acoustical Defect Sizing NDT Methods for the Inspection of Power-Plant Components, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa.
- [7] M.Sutcliffe, M.Weston, B.Dutton, I.Cooper, Real-time full matrix capture with focusing of known geometry through dual-layered media, The 51st Annual Conference of The British Institute of Non-Destructive Testing, 2012.
- [8] J. Camacho, J.F. Cruza, J. Brizuela, C. Fritsch, Automatic Dynamic Depth Focusing for NDT, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 61(4):673-684, 2014.
- [9] Fraunhofer PCUS Array, <http://www.izfp-d.fraunhofer.de/english-izfp-d/competence/systeme/pcusarray.html>
- [10] J.Buechler, N.Steinhoff, High-End Ultrasonic Phased-Array System for Automatic Inspections, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa.
- [11] M.Lewandowski, M.Walczak, B.Witek, P.Kulesza, K.Sielewicz, Modular & Scalable Ultrasound Platform with GPU Processing, *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Dresden, Germany, 2012.
- [12] M.Lewandowski, K.Sielewicz, M.Walczak, A Low-cost 32-channel Module with High-speed Digital Interfaces for Portable Ultrasound Systems, *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Dresden, Germany, 2012.