

# UNIWERSALNE STANOWISKO BADAWCZE DO ULTRADŹWIĘKOWEJ TOMOGRAFII TRANSMISYJNEJ

Krzysztof J. Opieliński, Tadeusz Gudra

Instytut Telekomunikacji i Akustyki, Politechnika Wrocławska,  
50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27,  
email: popi@zakus.ita.pwr.wroc.pl, gudra@zakus.ita.pwr.wroc.pl

## *Streszczenie*

*W pracy przedstawiono koncepcję, sposób realizacji oraz możliwości pomiarowe uniwersalnego stanowiska badawczego do wizualizacji struktury wewnętrznej obiektów, ich powierzchni, kształtu, rozmiarów i położenia w ośrodku ciekłym i gazowym, metodą ultradźwiękowej tomografii transmisyjnej (UTT). Opracowane stanowisko badawcze umożliwia wykorzystanie kilku sposobów sterowania pracą różnych głowic ultradźwiękowych z zastosowaniem różnych geometrii pomiarowych względem obiektu. Nadzór nad stanowiskiem sprawuje specjalnie opracowany program komputerowy sterujący poszczególnymi jego układami, co pozwala na badanie obiektów w sposób nieinwazyjny, za pomocą rekonstrukcji lokalnych wartości wybranego parametru akustycznego na podstawie zestawu zmierzonych wartości średnich. Uzyskana rozdzielczość obrazów wskazuje na wysoką efektywność zastosowanych rozwiązań. Cyfrowa rejestracja impulsu odbiorczego umożliwia uzyskanie kilku różnych obrazów struktury wewnętrznej obiektu, z których każdy pokazuje rozkład lokalnych wartości innego parametru akustycznego.*

*Dzięki opracowaniu dodatkowego oprogramowania, stanowisko badawcze może również służyć do precyzyjnego pomiaru przestrzennego pola akustycznego w cieczach i gazach.*

## 1. WSTĘP

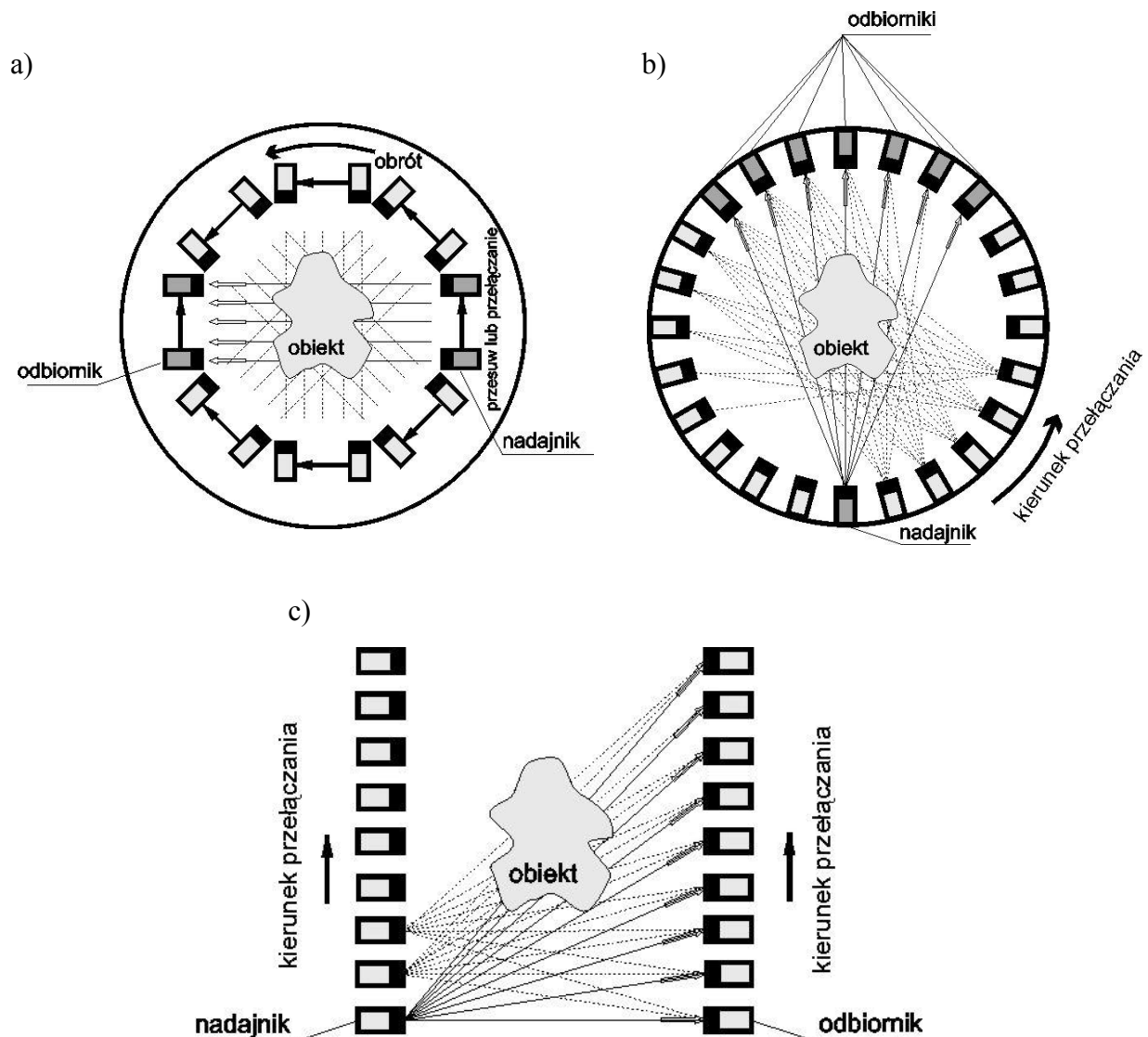
Ultradźwiękowa tomografia transmisyjna (UTT) jest metodą, która umożliwia rekonstruowanie obrazu struktury wewnętrznej obiektu [5], jego kształtu, rozmiarów i położenia [2], dzięki wykorzystaniu informacji zawartej w impulsach ultradźwiękowych przenikających przez badany obiekt i w pobliżu niego z wielu kierunków. Metoda ta pozwala również na wizualizację topologii obiektów dwuwymiarowych [11]. Zobrazowanie tomograficzne bazuje na tworzeniu obrazów przy użyciu metod matematycznych znanych jako rekonstrukcja z projekcji (rzutów) [6]. Praktyczna realizacja tej metody stała się możliwa dopiero po pojawieniu się komputerów o dużej mocy obliczeniowej. W celu uzyskania obrazów tomograficznych, oprócz szybkiego komputera, konieczny jest specjalny układ skanujący, który pozwala na zbieranie zestawu danych pomiarowych w odpowiednim układzie geometrycznym dookoła obiektu.

## 2. ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE

W UTT można rozróżnić dwie podstawowe geometrie zbierania danych pomiarowych (skanowania): geometrię rzutów równoległopromieniowych i geometrię rzutów rozbieżnych [5]. Dla obydwu geometrii obowiązuje założenie, że pomiary realizowane są wzdłuż linii prostych, a różnice pomiędzy nimi wynikają ze sposobu umiejscowienia nadajnika i odbiornika względem siebie oraz ze sposobu rozmieszczenia wielu nadajników i odbiorników wokół badanego obiektu. Założono, że stanowisko badawcze do UTT powinno umożliwiać zbieranie danych pomiarowych w następujących trzech geometriach (rys.1):

- w geometrii rzutów równoległopromieniowych,

- w geometrii rzutów rozbieżnych z zachowaniem równych kątów między promieniami,
- w geometrii rzutów rozbieżnych z zachowaniem równych odległości między promieniami.



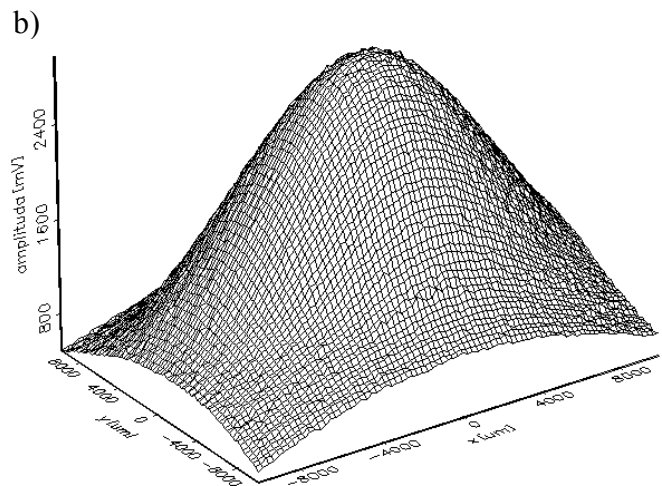
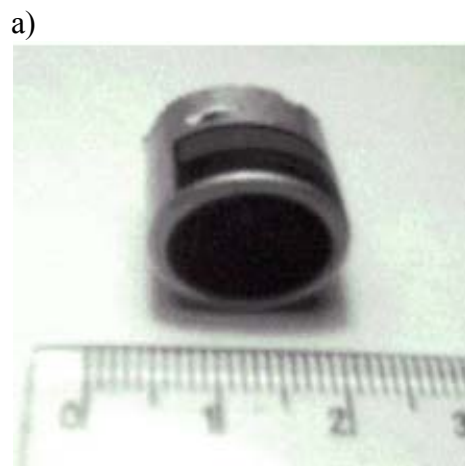
Rys.1. Wybrane geometrie zbierania tomograficznych danych pomiarowych: a) rzuty równoległopromieniowe, b) rzuty rozbieżne z zachowaniem równych kątów między promieniami, c) rzuty rozbieżne z zachowaniem równych odległości między promieniami.

Jako podstawowy sposób zbierania danych pomiarowych, do realizacji stanowiska badawczego wykorzystano geometrię rzutów równoległopromieniowych, ze względu na możliwość wyboru rozmiarów badanych obiektów oraz możliwość precyzyjnej kontroli położenia nadajnika i odbiornika, jak również ze względu na koszty wykonania takiego układu.

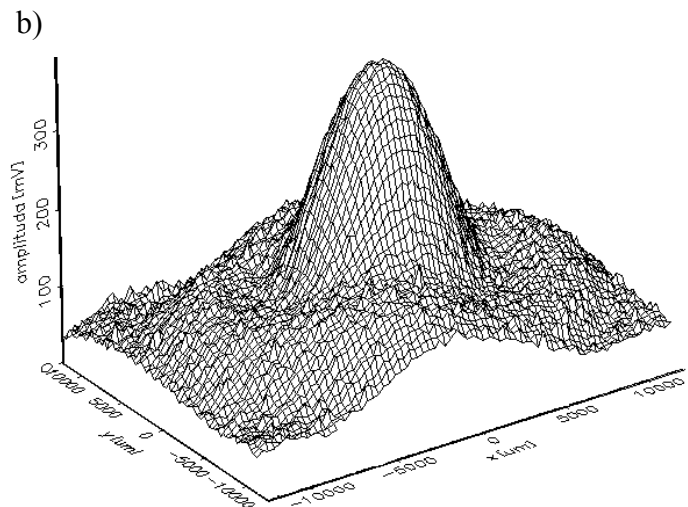
Problem rekonstrukcji z projekcji polega na znalezieniu rozkładu lokalnych wartości mierzonego parametru fizycznego na podstawie znanych rzutów (wartości średnich) dla każdej prostej w mierzonym przekroju. Mierzone wartości średnie muszą więc stanowić całki wartości lokalnych po drogach promieni wiązki fali ultradźwiękowej od nadajnika do



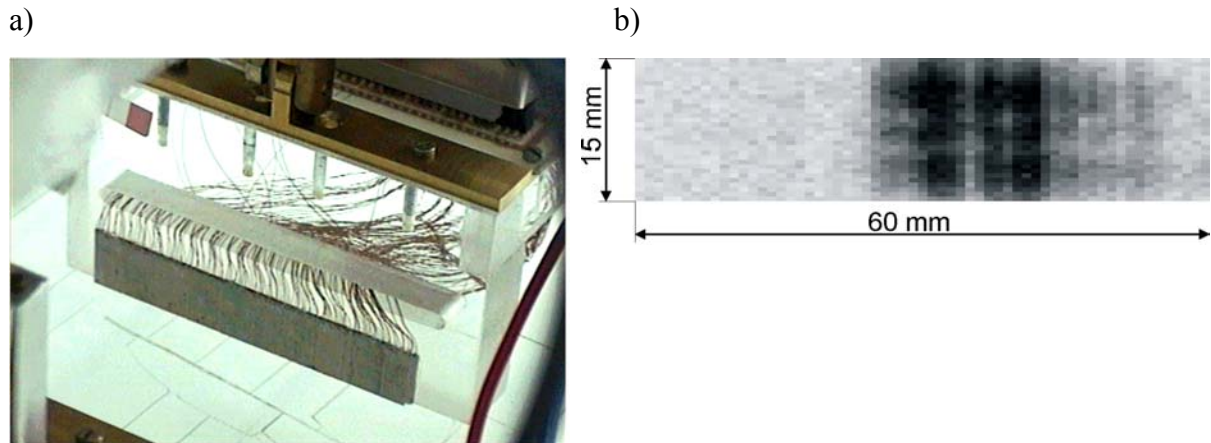
sygnału), oscyloskopu cyfrowego. Na rys.3 pokazano jeden z pojedynczych przetworników ultradźwiękowych wykorzystywanych do badań w powietrzu oraz jego charakterystykę promieniowania zmierzoną w powietrzu, w polu dalekim, w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni promieniującej. Na rys.4 pokazano jedną z pojedynczych głowic ultradźwiękowych wykorzystywanych do badań w wodzie oraz jej charakterystykę promieniowania zmierzoną w wodzie, w polu dalekim, w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni promieniującej. Na rys.5 przedstawiono opracowaną specjalnie do badań tomograficznych głowicę 128-elementową oraz charakterystykę promieniowania pojedynczego elementu piezoelektrycznego zmierzoną w wodzie, w polu dalekim, w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni promieniującej. Wszystkie charakterystyki promieniowania przetworników zmierzono na opracowanym stanowisku badawczym, wykorzystując dodatkowe mechanizmy przesuwu zapewniające możliwość precyzyjnego przesuwu źródła lub detektora w przestrzeni, w układzie XYZ. Pomiary w powietrzu wykonano za pomocą mikrofonu pomiarowego z wkładką MK 301 firmy RFT, a w wodzie za pomocą hydrofonu firmy Precision Acoustics Ltd serii HPM.



Rys.3. Przetwornik MPU-R firmy CERAD przeznaczony do pracy w powietrzu na częstotliwości  $f=36.6$  kHz: a) widok w obudowie, b) zmierzona charakterystyka promieniowania w polu dalekim.



Rys.4. Głowica defektoskopowa UNIPAN\_4 LN\_1.3 przystosowana do pracy w wodzie na częstotliwości  $f=4$  MHz: a) widok, b) zmierzona charakterystyka promieniowania w polu dalekim.



Rys.5. 128-elementowa głowica tomograficzna przeznaczona do pracy w wodzie na częstotliwości  $f=1.8$  MHz: a) widok, b) zmierzona charakterystyka promieniowania pojedynczego elementu piezoelektrycznego głowicy o wymiarach  $0.5$  mm x  $18$  mm.

W przypadku zastosowania pary głowic wieloelementowych (nadawczej i odbiorczej), komputer steruje ich obrotem poprzez port RS 232, z wykorzystaniem sterownika silników krokowych oraz przełącza liniowo przetworniki w głowicach wieloelementowych, przesyłając przez port LPT (bezpośrednio lub z wykorzystaniem generatora adresu binarnego) odpowiednią sekwencję bitów do multipleksera i demultipleksera. Przetworniki ultradźwiękowe wieloelementowej głowicy nadawczej pobudzone są za pomocą generatora sygnału typu *burst* (impuls sinusoidalny o ustalonym czasie trwania). Impuls ultradźwiękowy po dotarciu do odbiornika jest wzmacniany i rejestrowany na twardym dysku komputera bezpośrednio lub po odpowiedniej obróbce za pomocą oscyloskopu cyfrowego lub komputerowej karty defektoskopowej osadzonej w złączu ISA.

W przypadku zastosowania pary pojedynczych głowic ultradźwiękowych (nadawczej i odbiorczej), generator adresu binarnego, multiplekser i demultiplekser nie są używane na stanowisku badawczym, ponieważ liniowy przesuw głowic realizowany jest za pomocą mechanizmu z silnikiem krokowym sterowanym z komputera. Komputerowa karta defektoskopowa może wykorzystywać własny układ nadawczy lub układ zsynchronizowany z generatorem *burst*'u. Miernik *sing-around* wykorzystuje własny układ nadawczy i odbiorczy, dokonując pomiaru częstotliwości powtarzania impulsu w pętli elektroakustycznej [1]. Wartość tej częstotliwości czytywana jest z częstościomierza i przesyłana do komputera za pomocą portu LPT, a następnie przeliczana na średnią prędkość dźwięku.

Opracowany system skanowania w geometrii rzutów równoległopromieniowych umożliwia przesuw pary głowic wzdłuż badanego obiektu z minimalnym krokiem  $12.5$   $\mu\text{m}$  w zakresie około  $316$  mm oraz obrót z minimalnym skokiem  $0.015^\circ$  w Nielimitowanym zakresie kątowym. W przypadku wykorzystywania głowic wieloelementowych, minimalna odległość pomiędzy poszczególnymi przetwornikami elementarnymi ( $0.5$  mm szerokości każdy) wynosi  $0.2$  mm, co przy głowicy 128-elementowej daje możliwość skanowania liniowego w zakresie  $84.4$  mm z minimalnym skokiem liniowym  $0.6$  mm.

Dzięki zastosowaniu komputerowej karty defektoskopowej lub oscyloskopu cyfrowego, możliwe jest próbkowanie i rejestracja sygnału odbiorczego, co pozwala na programowy pomiar różnych parametrów akustycznych. W szczególności, obydwa urządzenia umożliwiają również bezpośredni pomiar czasu przejścia, amplitudy i widma sygnału odbiorczego.

Dokładność pomiaru czasu przejścia za pomocą miernika *sing-around* wynosi około  $\pm 200$  ns; błąd ten związany jest głównie z zastosowaniem stałego progu detekcji impulsu (kształt impulsu odbiorczego znacznie się zmienia) oraz koniecznością ograniczenia dokładności pomiaru częstotliwości powtarzania ze względu na długi czas zliczania [9]. Rozdzielczość pomiaru czasu przejścia za pomocą komputerowej karty defektoskopowej wynika przede wszystkim z częstotliwości próbkowania sygnału i wynosi 14 ns, a w przypadku oscyloskopu cyfrowego wynosi 2.5 ns.

Opracowane stanowisko badawcze pozwala również na pomiary w geometrii rzutów rozbieżnych. Za pomocą wieloelementowych głowic liniowych możliwe jest całkowite wyeliminowanie mechanizmów przesuwu i obrotu przez zastosowanie skanowania w geometrii rzutów rozbieżnych z zachowaniem równych odległości pomiędzy promieniami (skanowanie realizowane jest za pomocą odpowiedniego przełączania elementarnych przetworników w głowicy nadawczej i odbiorczej – patrz rys.1c). Skanowanie w geometrii rzutów rozbieżnych z zachowaniem równych kątów pomiędzy promieniami również pozwala na wyeliminowanie ruchu głowic, jednakże wymaga to skonstruowania specjalnej wieloelementowej ultradźwiękowej głowicy pierścieniowej (rys.1b). Zastosowanie takich sposobów realizacji pomiarów daje możliwość uzyskiwania obrazu w bardzo krótkim czasie (kilka sekund).

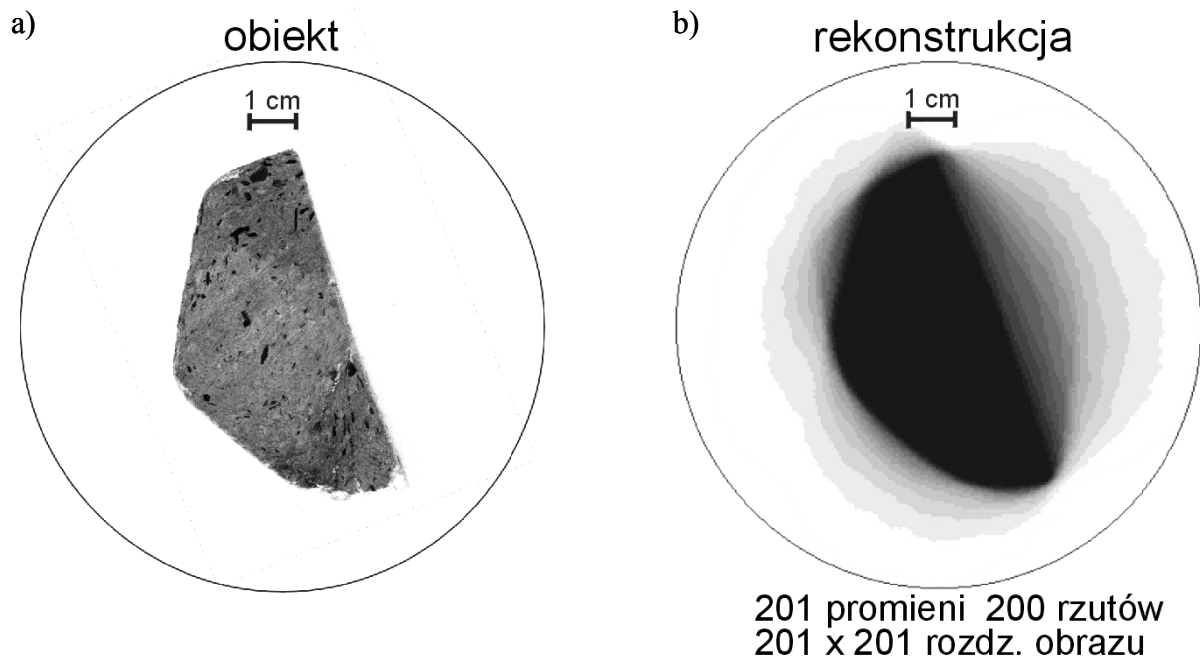
Opracowane stanowisko badawcze do UTT może być również wykorzystywane do określania kształtu, rozmiarów i położenia obiektów zarówno w cieczech jak i w gazach [7]. Przy takich pomiarach, dane tomograficzne zapisywane są w formie binarnej: np. 0 jeśli sygnał został odebrany poza obiektem, 1 – jeśli sygnał został odebrany po przejściu przez obiekt lub jeśli nie dotarł do odbiornika (np. w wyniku całkowitego odbicia na granicy medium – obiekt [7]). Wadą metody zerojedynkowej jest możliwość wizualizacji tylko kształtów wypukłych, ze względu na tzw. efekt cienia.

Kolejnym sposobem wykorzystania stanowiska badawczego jest wizualizacja sprężystych własności cienkich płyt za pomocą fal Lamba [11]. W tym układzie przetworniki nadawczy i odbiorczy ustawione są w powietrzu w niewielkiej odległości nad powierzchnią badanej płyty i w ustalonej odległości względem siebie oraz skierowane są powierzchnią promieniującą w kierunku powierzchni płyty pod takim kątem, aby wzbudzić za pośrednictwem powietrza określony mod drgań fali Lamba w płycie. Obraz zrekonstruowany z pomiarów średnich wartości prędkości określonego modu fali Lamba jest obrazem rozkładu wartości lokalnych, który uwidacznia własności sprężyste badanego obszaru płyty, pokazując jego defekty topologiczne.

#### **4. POMIARY KONTROLNE**

Pomiary kontrolne na opracowanym stanowisku badawczym do UTT przeprowadzono w powietrzu i w wodzie. Na rys.6÷8 przedstawiono wybrane ich rezultaty.

Obiektem mierzonym w powietrzu był m.in. graniastosłup wykonany ze sprasowanych wiórów drewnianych, o przekroju poprzecznym pokazanym na rys.6a. Do pomiarów wykorzystano parę głowic ultradźwiękowych pracujących na częstotliwości  $f=50$  kHz. Pomiary wykonano w geometrii rzutów równoległopromieniowych (wg rys.1a), a rekonstrukcji kształtu, rozmiarów i położenia obiektu dokonano za pomocą algorytmu rzutowania wstecznego [7]. Uzyskany obraz przedstawiono na rys.6b.



Rys.6. Obiekt mierzony w powietrzu – graniastoshup: a) przekrój poprzeczny, b) zrekonstruowany obraz.

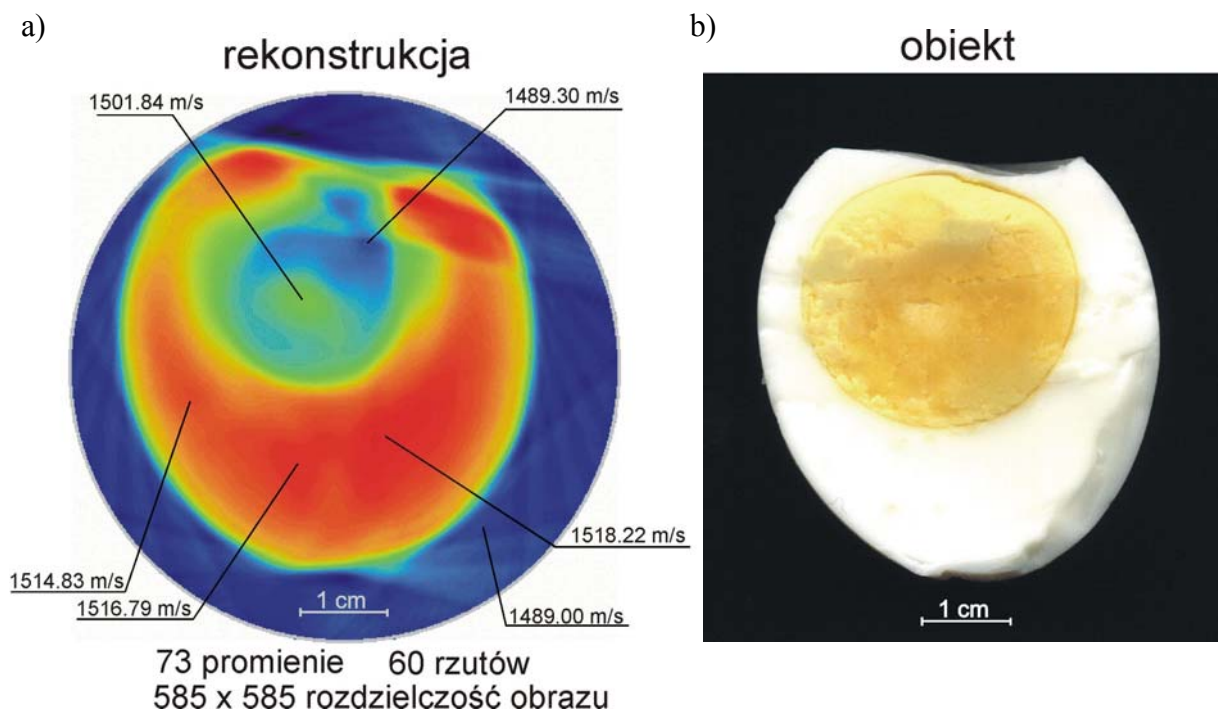
Innym obiektem mierzonym w powietrzu był kołowy wycinek powierzchni blachy aluminiowej o grubości 0.5 mm z otworem o średnicy 6 mm. Do pomiarów wykorzystano jako nadajnik – przetwornik ultradźwiękowy o częstotliwości pracy 100 kHz, a jako odbiornik – ćwierćcalowy mikrofon pomiarowy firmy RFT. Pomiary wykonano w geometrii rzutów równoległopromieniowych (wg rys.1a), a rekonstrukcji obrazu wycinka powierzchni płyty dokonano za pomocą algorytmu splotu i rzutowania wstecznego [3]. Uzyskany obraz przedstawiono na rys.7.



Rys.7. Obiekt mierzony w powietrzu – kołowy wycinek powierzchni płyty aluminiowej z otworem (obszar otworu zaznaczono linią przerywaną).

Zniekształcenie i rozmycie granic otworu w zrekonstruowanym obrazie (rys.7) spowodowane jest zmianą sprężystych własności płyty w ich pobliżu na skutek uszkodzeń mechanicznych dokonanych w procesie wiercenia jak również wynika ze zbyt małej liczby promieni i rzutów pomiarowych.

Obiektem mierzonym w wodzie było m.in. ugotowane na pół-twardo jajko kurze pozbawione skorupki, którego wewnętrzną strukturę zbadano w przekroju wzdłużnym. Do pomiarów wykorzystano parę głowic ultradźwiękowych pracujących na częstotliwości  $f=3.8$  MHz. Pomiarów wykonano w geometrii rzutów równoległopromieniowych a rekonstrukcji obrazu struktury wewnętrznej obiektu dokonano za pomocą algorytmu splotu i rzutowania wstecznego [6]. Na rys.8a pokazano zrekonstruowany obraz przekroju jajka w skali szarości odpowiadającej zakresowi zmian zrekonstruowanych lokalnych wartości prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w badanej strukturze. Dokładność pomiarów prędkości oszacowano na około  $\pm 0.01$  m/s. Na rys.8b pokazano optyczny obraz struktury wewnętrznej tego samego jajka po przecięciu go wzdłuż mierzonego wcześniej przekroju.



Rys.8. Obiekt mierzony w wodzie – jajko kurze: a) zrekonstruowany obraz w skali szarości, b) obraz optyczny struktury wewnętrznej jajka po przecięciu go wzdłuż mierzonego wcześniej przekroju.

## 5. WNIOSKI

Opracowane stanowisko badawcze pozwala na rekonstrukcję obrazu przekroju struktury wewnętrznej obiektu na podstawie pomiarów parametrów impulsów ultradźwiękowych po przejściu przez obiekt z wielu kierunków. Pozwala ono również na rozpoznawanie kształtów, rozmiarów i położenia obiektów w ośrodku ciekłym lub gazowym a także na badanie topologii obiektów dwuwymiarowych. Dzięki opracowaniu dodatkowego oprogramowania, stanowisko badawcze może również służyć do pomiaru przestrzennego pola akustycznego w cieczech i gazach a w szczególności do precyzyjnego pomiaru przestrzennych charakterystyk promieniowania przetworników ultradźwiękowych.

Uzyskana dokładność odwzorowania badanych struktur i obiektów jak również jakość obrazu zrekonstruowanego na podstawie pomiarów wskazują na wysoką efektywność zastosowanych rozwiązań technicznych. Opracowane stanowisko pozwala na wizualizację struktury wewnętrznej obiektów nie tylko w sposób jakościowy (obraz), ale również ilościowy z dużą dokładnością (każdy punkt obrazu reprezentuje określoną wartość mierzonego parametru). Ze względu na zjawiska towarzyszące propagacji fali ultradźwiękowej (załamanie, tłumienie, odbicie) i stosowaną metodę transmisyjną, na stanowisku badawczym możliwa jest poprawna wizualizacja tylko takich struktur wewnętrznych obiektu, w których prędkość propagacji fali ultradźwiękowej niewiele różni się od prędkości w otaczającym ich ośrodku (wskaźnik załamania bliski jedności [5]) i w których tłumienie fal ultradźwiękowych nie jest zbyt duże [8]. Minimalne rozmiary struktur jakie można rozpoznać w zrekonstruowanym obrazie zależą przede wszystkim od częstotliwości pracy zastosowanych głowic ultradźwiękowych (długość fali) ale również od zadanej rozdzielczości skanowania obiektu w wybranej geometrii pomiarowej (liczba promieni i rzutów pomiarowych).

Zastosowana tu nieinwazyjna metoda tomograficzna może zostać wykorzystana zarówno w celach diagnozowania zmian patologicznych w tkankach biologicznych *in vivo* i *in vitro* jak również do badania i monitorowania obiektów znajdujących się w ośrodkach uniemożliwiających pobyt ludzi (zanieczyszczonych, skażonych) oraz do inspekcji różnych procesów technologicznych i badań powierzchniowych.

Opracowane stanowisko badawcze do UTT jest pierwszą i jak na razie jedyną w Polsce i jedną z niewielu w świecie laboratoryjną wersją ultradźwiękowego tomografu transmisyjnego. Autorzy poszukują sponsora lub inwestora do budowy modelu ultradźwiękowego tomografu transmisyjnego z wieloelementową głowicą pierścieniową, służącego do nieinwazyjnego badania sutka piersi kobiet *in vivo* w celu wczesnego wykrywania zmian nowotworowych. Przewiduje się, że model ten stanowić może podstawę do budowy pierwszych w świecie ultradźwiękowych tomografów transmisyjnych do badania sutka piersi kobiet współpracujących z każdym komputerem PC wyższej klasy.

## LITERATURA

- [1] **J.Bednarek, T.Ciszewski, T.Gudra, J.Golanowski, E.Talarczyk**, Miernik prędkości ultradźwięków w cieczech, Raport Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, nr I-28/R-153/78, Wrocław 1978.
- [2] **G.J.Brown, D.Reilly**, Ultrasonic tomographic imaging of solid objects in air using an array of fan-shaped-beam electrostatic transducers, *Ultrasonics*, 34, pp.111-115, 1996.
- [3] **A.B.Dobrucki, K.J.Opieliński**, Adaptation of Image Reconstruction Algorithm for Purposes of Ultrasound Transmission Tomography (UTT), *Archives of Acoustics* 25, 4, 395-422 (2000).
- [4] **T.Gudra, K.J.Opieliński, A.B.Dobrucki**, Model of multielement probes for ultrasound transmission tomography, Proc. of the fifth European Conference on Underwater Acoustics ECUA 2000, vol.2, pp.1423-1428.
- [5] **A.C.Kak, M.Slaney**, *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, R.F.Cotellessa, IEEE Press, pp.329, 1988.
- [6] **R.M.Lewitt**, Reconstruction Algorithms: Transform Methods, *Proceedings of the IEEE*, 71 (3), pp.390-408, 1983.
- [7] **K.J.Opieliński, T.Gudra, A.Kolano**, Rozpoznawanie kształtu, rozmiarów i położenia obiektów w ośrodku gazowym metodami ultradźwiękowymi, XLVII Otwarte Seminarium z Akustyki OSA'2000, Rzeszów – Jawor, 2000, t.1, str. 285-290.

- [8] **K.J.Opieliński, T.Gudra**, Ultrasound transmission tomography image distortions caused by the refraction effect, *Ultrasonics* 38 (2000), p.424-429.
- [9] **K.J.Opieliński, T.Gudra**, Ultrasound Transmission Tomography Image Distortions Caused by the Run-Time Measurement Inaccuracy, *Molecular and Quantum Acoustics*, Vol.20, Upper Silesian Division of the Polish Acoustical Society, Gliwice 1999, Poland, str.169-179.
- [10] **M.Stapper, G.Sollie**, Characterization of Biological Tissues by Means of Ultrasound Transmission Tomography Using a Personal Computer, In *Ultrasonics International '87*, London, United Kingdom, pp.321-326, 1987.
- [11] **W.Wright, D.Hutchins, D.Jansen, D.Schindel**, Air-Coupled Lamb Wave Tomography, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 44 (1), pp.53-59, 1997.
- [12] **D.Zhang, X.Gong, B.Rui, Q.Xue, X.Li**, Further Study on the Nonlinearity Parameter Tomography for Pathological Porcine Tissues, In *Ultrasonics World Congress WCU 97*, Yokohama, Japan, pp.196-197, 1997.