
XX Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 12-15 marca 2014

Marek Śliwowski
NDTEST Warszawa

Rekonstrukcja zobrażeń ultradźwiękowych przy pomocy techniki SAFT

1. WSTĘP

Badanie ultradźwiękowe wykorzystuje zakłócenia w rozchodzeniu się fal do wykrywania potencjalnie występujących wad materiałowych. Granice ośrodków, ze względu na różną impedancję akustyczną są źródłem sygnałów odbieranych od tych granic, których energia zależy od parametrów sygnału nadawczego. Większość technik badawczych opiera się na ocenie czasu przejścia i wysokości echa odbieranego. Informacja o lokalnym kształcie takiego wskazania jest ograniczona przez szerokość i kierunek wiązki padającej. Znacząco bardziej precyzyjną informację o położeniu, rozmiarach, nachyleniu powierzchni oraz kształcie wady lub reflektora można uzyskać stosując bardziej zaawansowane techniki analizy, gdzie informacja jest zbierana przy możliwie dużym kącie wiązki ultradźwiękowej. Zasięg kątowy, w zakresie którego reflektor jest widziany, nazywany aperturą, jest ważny z dwóch powodów. Z jednej strony, rozmiar apertury oraz długość fali określają możliwą rozdzielczość przestrzenną, podczas gdy z drugiej strony większe reflektory mogą być „widziane” w zawężonych przedziałach kąta wiązki padającej dla możliwego zakresu apertury (kątowej obserwacji).

Ogniskowanie, które jest konieczne dla uzyskania lepszej rozdzielczości przestrzennej (a tym samym zbliżonego do rzeczywistości wymiarowania), można przeprowadzić przy pomocy tradycyjnych głowic z soczewką ogniskującą. Jednakże głowice zogniskowane, aczkolwiek skuteczne w wielu zastosowaniach, są niewygodne w przypadkach analizy sygnałów ze względu na swoją wielkość, ponadto ich rozdzielczość pogarsza się wraz z odległością, a w przypadku lokalizacji reflektorów na różnych głębokościach wymagane będą różne głowice i różne kąty przeszukiwania.

Istotną alternatywę oferuje tu technika Zogniskowanej Syntetycznej Apertury – SAFT. Jest ona często stosowanym procesem rekonstrukcji sygnałów w szeregu wieloelementowych systemach zobrażenia takich jak radar, sonar czy ultrasonografia. Zastosowania procesu rekonstrukcji w badaniach NDT było do tej pory limitowane specyfiką analogowej akwizycji danych ultradźwiękowych i czasem ich obróbki w procesie rekonstrukcji.

W zastosowaniach UT wymagana jest w zasadzie standardowa głowica o możliwie szerokim kącie wiązki, co najłatwiej uzyskać stosując małe przetworniki o rozmiarach, najlepiej rzędu długości stosowanej fali. Jak wiadomo z praktyki ultradźwiękowej takie głowice są w większości przypadków zupełnie nieprzydatne do celów badawczych w technikach jednoprzetwornikowych, ze względu na stosunek sygnału do szumu – SNR. Obecnie problem ten znika wobec możliwości akwizycji sygnałów cyfrowych oraz stosowania głowic wieloprzetwornikowych (phased-array).

Dla poprawnego działania algorytmu SAFT konieczna jest pełna informacja o przebiegu sygnału ultradźwiękowego wzdłuż drogi fali od przetwornika do reflektora i z powrotem. Do

rekonstrukcji zobrazowania zastosowano geometryczny model nakładania na siebie sąsiadujących zobrazowań typu z uwzględnieniem ich wzajemnej korelacji czasowej (opóźnienia). W celu minimalizacji czasów obliczeniowych algorytmu, korelacja jest ograniczona do pewnej ilości sąsiadujących wskazań względem linii analizowanego położenia reflektora (jest to tzw. efektywna apertura lokalizacji wskazań).

Technika SAFT w zastosowaniach NDT szczególnie nadaje się do cyfrowej obróbki zobrazowań ultradźwiękowych typu B lub C. Zastosowanie tej techniki powoduje polepszenie rozdzielczości zobrazowania, bez potrzeby użycia tradycyjnych soczewek ultradźwiękowych. W pracy pokazano praktyczną implementację techniki SAFT (w postaci zrekonstruowanego zobrazowania) dla różnych przypadków zobrazowań typu B głowicami jednoprzetwornikowymi [1].

Kolejnym krokiem w udoskonaleniu technik SAFT jest burzliwy rozwój technik phase array [2]. W zastosowaniach technicznych stosowane są one nadal dosyć ostrożnie. Należy się jednak spodziewać, że w niedalekiej przyszłości połączenie technik phase array + SAFT mogą się zmienić z następujących powodów:

- zwiększonej wydolności komputerów skutkującej skróceniem czasów przetwarzania przy rekonstrukcji zobrazowań, nawet dla systemów PC;
- rozwój systemów zmechanizowanego badania ultradźwiękowego, co zapewnia określanie w sposób cyfrowy położenia głowicy, a konsekwencji cyfrowy zapis zobrazowań *A-scan* wzdłuż dostatecznie dużej apertury – co jest warunkiem koniecznym do uzyskiwania rekonstrukcji SAFT wysokiej jakości;
- techniki SAFT znakomicie nadają do obróbki zobrazowań uzyskiwanych cyfrowymi technikami phase –array, często w połączeniu z innymi (TOFD, creeping wave) [3]. Ten kierunek badania polepsza znakomicie wiarygodność i elastyczność stosowania różnorodnych technik badawczych w porównaniu z badaniami konwencjonalnymi.

2. ZASADY TECHNIKI SAFT I REKONSTRUKCJI ZOBRAZOWAŃ

2.1 Konwencjonalna technika SAFT-MSA

W konwencjonalnej technice SAFT zwanej czasami Monostatyczną Syntetyczną Aperturą zobrazowania (MSA), pojedynczy element pracuje jednocześnie jako nadajnik i odbiornik w tzw. technice (modzie) echa. Akwizycja sygnałów może się odbywać poprzez kontrolowany ruch położenia (cyfrowy zapis np. z enkodera) pojedynczego przetwornika *Rys. 1*, w ramach założonej syntetycznej apertury (obszaru przeszukiwania) lub jak to pokazano na *Rys. 2* przy nieruchomej głowicy phase-array, dla której elementy są aktywowane sekwencyjnie w ramach apertury te głowicy, przy czym pozycja każdego elementu jest znana.

Ze względu na rozmiary elementów głowic phase-array emitowane fale mogą być traktowane jako kuliste. Zatem każdy z aktywowanych elementów może w takiej sekwencji nadawać i odbierać sygnały przychodzące, które są sekwencyjnie zbierane i rejestrowane w postaci cyfrowych *A-scanów*. Zbiór taki, zawierający N *A-scanów*, jest podstawą do rekonstrukcji zobrazowania typu B (*B-scanu*) – $Y(t, i)$, gdzie t jest czasem przejścia sygnału natomiast i jest indeksem identyfikującym położenie każdego elementu nadawczo/odbiorczego przy przejściu od 1 do N . Pojedynczy *A-scan* odpowiadający i -temu elementowi oznaczono $f_i(t)$

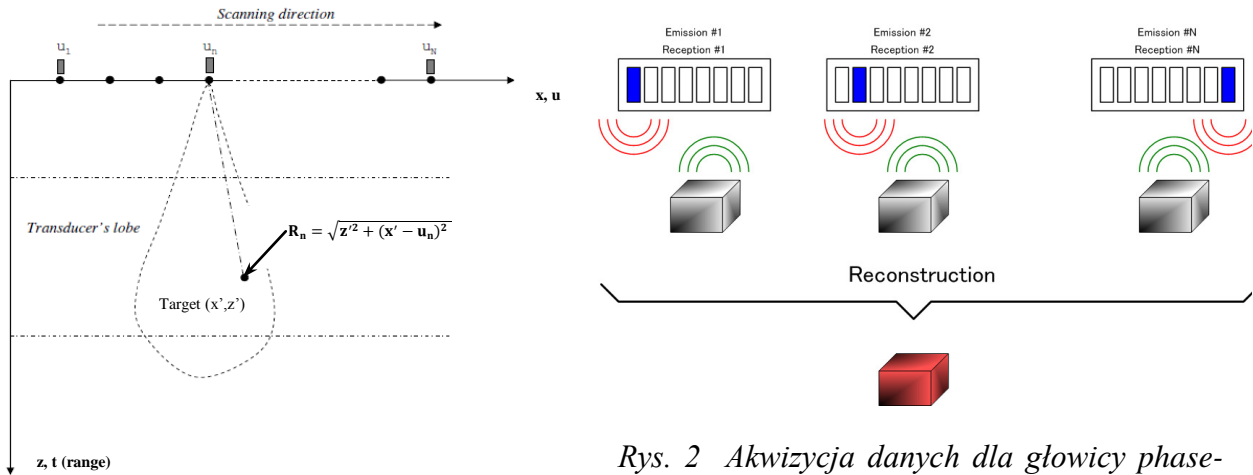
$$Y(t, i) = \sum_{i=1}^N f_i(t)$$

Proces rekonstrukcji polega na przeprowadzeniu koherentnego (spójnego) sumowania sygnałów pochodzących z różnej odległości. Jest to zasada procesu Opóźniaj i Sumuj (DAS).

Proces rekonstrukcji rozpatrzono tutaj na płaszczyźnie dwuwymiarowej (x,z) , elementy apertury przetwornika są rozmieszczone na linii $z=0$. Rekonstruowane zobrazowanie $Q(x,z)$ jest wyliczane wg algorytmu z twierdzenia Pitagorasa (Rys.1, 3) uwzględniając właściwe opóźnienie:

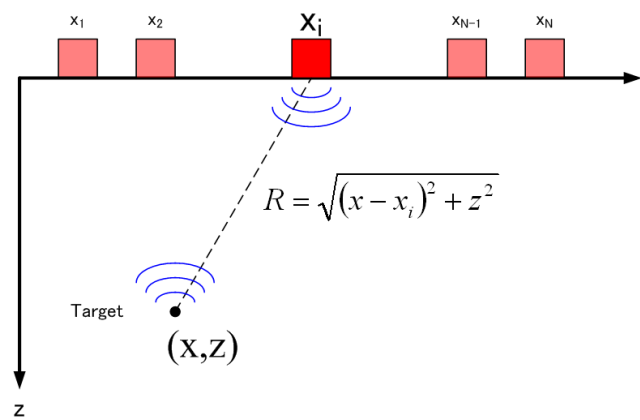
$$Q(x,z) = \sum_{i=1}^N f_i \left(\frac{2\sqrt{(x-x_i)^2+z^2}}{c} \right),$$

gdzie c jest prędkością fali a x_i położeniem aktywnego elementu.

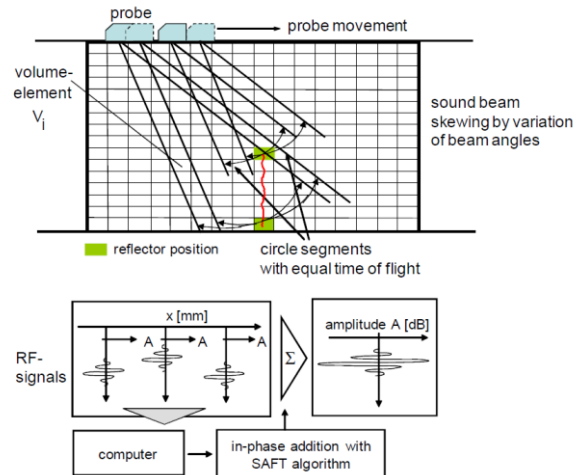


Rys. 1 Akwizycja danych dla głowicy normalnej w procesie rekonstrukcji techniką konwencjonalnego SAFT – MSA

Rys. 2 Akwizycja danych dla głowicy phase-array w procesie rekonstrukcji techniką konwencjonalnego SAFT – MSA



Rys. 3 Schemat drogi sygnału pomiędzy elementem aktywnym x_i oraz elementem rekonstruowanym (x,z) dla konwencjonalnego SAFT – MSA



Rys. 4 Graficzna prezentacja algorytmu techniki rekonstrukcji SAFT-MSA – głowica pojedyncza, echa dyfrakcyjne.

W rzeczywistości zbieranie danych odbywa się z dokładnością do czasu opóźnienia (a ściślej biorąc dla różnych przebiegów czasowych, dotyczących tego samego punktu, ale nałożonych na siebie zgodnie w fazie). Na Rys. 4 pokazano prezentację graficzną algorytmu DAS zastosowanego w technikach SAFT.

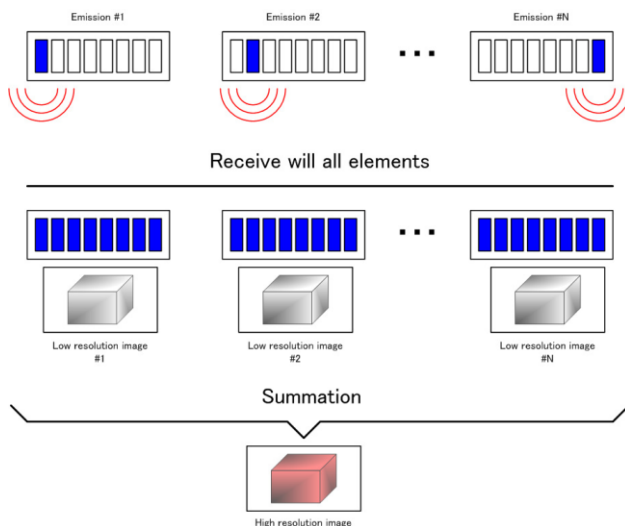
W algorytmie techniki SAFT badana objętość, w obszarze napromieniowania falą akustyczną, zostaje podzielona na małe elementy objętości (piksele), przy czym każdy jest sukcesywnie traktowany jako reflektor. W numerycznym algorytmie nakładania pochodzących od jakiegoś reflektora echa o zgodnej fazie, ale różnych czasach przejścia, następuje konstruktywna interferencja prowadząca do dużego echa wypadkowego, dla bieżącego punktu objętości,

zawierającego reflektor. Dla wszystkich innych pikseli taka superpozycja prowadzi do niewielkiego lub braku echa wypadkowego w wyniku tzw. destruktywnej interferencji. Ostatecznie każdy piksel otrzyma przypisaną wypadkową wartość amplitudy, co kończy proces rekonstrukcji pierwotnego zobrazowania objętego syntetyczną (efektywną) aperturą. Zaletą takiej wtórnej obróbki sygnału jest możliwość sterowania procesem rekonstrukcji przez dobór gęstości siatki. Jest to ważne w kontekście czasu obliczeniowego i ewentualnego zagęszczania siatki wokół obszarów wad oraz wyboru efektywnej apertury, mającej istotny wpływ na jakość rekonstrukcji zobrazowania.

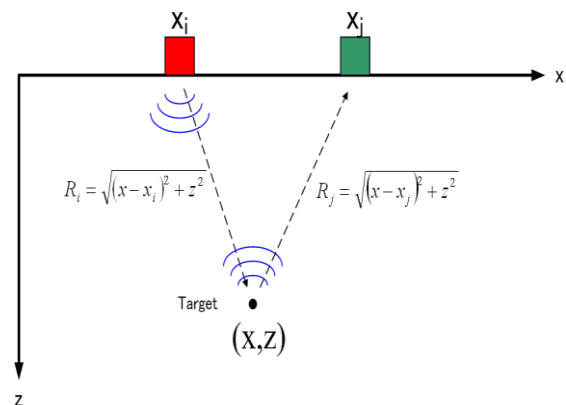
Zamiast przetwornika z soczewką skupiającą wiązkę w miejscu położenia reflektora symulowana jest numeryczna procedura skanowania, dla przetwornika o rozmiarach odpowiadających przeszukiwanemu obszarowi. W tym sensie procedura skanowania symuluje aperturę (rozmiary) przetwornika oraz proces ogniskowania wiązki i dlatego zyskuje nazwę techniki syntetycznej apertury ogniskowania – SAFT. Wysoki poziom stosunku sygnału do szumu (SNR) uzyskuje się w procedurze superpozycji sygnałów, ponieważ część sygnałów związana z szumami ulega zmniejszeniu ze względu na statystyczny charakter rozłożenia szumów. Z drugiej strony zmniejszenie SNR jest jednak ograniczone dla małych przetworników, które ze względu na dużą rozbieżność wiązki dostarczają dużą liczbę sygnałów rozproszenia od granic ziaren, gdy jednocześnie odbierany sygnał charakteryzuje się małą energią.

W celu polepszenia SNR i zwiększenia zdolności rozdzielczej, można wykorzystywać głowice phase-array, które z racji swojej budowy mają duże kąty rozbieżności wiązki, jednocześnie przy dużej aperturze (rozmiarach). Pozwala to jednocześnie sterować kątem wiązki w procedurze nakładania sygnałów, a jednocześnie uzyskiwać sygnały o dostatecznie dużej energii i z wystarczająco dużej apertury (można ją zwiększać stosując zmienny kąt wiązki i ewentualny ruch głowicy phase-array).

2.2 Rozszerzona technika SAFT-STA



Rys. 5 Akwizycja danych dla głowicy phase array w procesie rekonstrukcji techniką rozszerzonego SAFT – STA



Rys. 6 Schemat drogi sygnału pomiędzy elementem aktywnym nadawczym x_i , elementem rekonstruowanym (x, z) oraz elementem aktywnym odbiorczym x_j dla rozszerzonego SAFT – STA

Rozszerzona wersja konwencjonalnej techniki SAFT polega na tym, że w odbiorze sygnałów uczestniczą wszystkie elementy apertury (i jest to możliwe tylko dla apertury elementów wieloprzetwornikowych).

Ten algorytm nazywany jest *Syntetyczną Aperturą Transmitowaną* (STA), gdzie proces akwizycji danych został pokazany na Rys. 5. Ponieważ technika ta pozwala na odbiór sygnałów pola ultradźwiękowego poprzez wszystkie elementy apertury, to skutkuje podwyższeniem stosunku sygnału do szumu – SNR. Z drugiej strony wymaga to zwiększonych mocy obliczeniowych i pamięciowych (dla N elementów nadawczo-odbiorczych należy zapisać i przeliczyć N^2A -scanów). Dla obecnych komputerów takie czasy obliczeniowe nie stanowią już istotnej bariery.

Proces rekonstrukcji przebiega w tym przypadku dla sekwencyjnej aktywacji wszystkich elementów nadawczych przy wszystkich elementach aktywnych (Rys. 5) w takcie odbioru sygnału:

$$Q(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} \left(\frac{\sqrt{(x-x_i)^2+z^2} + \sqrt{(x-x_j)^2+z^2}}{c} \right),$$

Bieżące położenia elementów nadawczych x_i oraz odbierających x_j pokazano na Rys. 6. Proces rekonstrukcji sygnałów STA odbywa się podobnie jak dla konwencjonalnego SAFT. W technice STA można sterować wielkością syntetycznej apertury nadawczej oraz odbiorczej. W tym celu posługujemy się pojęciami *Syntetycznej Apertury Nadawczej* oraz *Syntetycznej Apertury Odbiorczej*.

2.3 Efektywna długość apertury

W celu określenia liczby A – scan’ów, które powinny być włączone do syntetycznej apertury wprowadzono koncepcję *Efektywnej długości apertury*. Efektywna długość apertury L_{eff} jest limitowana efektami interferencyjnymi dla skończonych wymiarów przetwornika. Generalnie wszystkie przetworniki charakteryzują się pewnym modelem wiązki, związanej z jej charakterystyką kierunkową w postaci listka głównego i pewnej liczby listków bocznych. Zasadnicze parametry głowicy, takie jak poprzeczna rozdzielczość zasięgowa, definiuje się poprzez kształt (rozpiętość) listka głównego.

Parametr L_{eff} jest definiowany jako największa długość odpowiadająca zastosowanej długości fal λ , która decyduje jeszcze o osiągniętej rozdzielczości poprzecznej (bocznej) przy stosowaniu techniki SAFT. Przyjmuje się, że sygnały odbierane przez wszystkie elementy syntetycznej apertury są wykorzystane efektywnie jeśli L_{eff} jest nie dłuższa niż połowa szerokości listka głównego (połowa szerokości wiązki) przetwornika zastosowanego z algorytmem SAFT dla określonego zakresu. Dla przetwornika kołowego o średnicy D połowa szerokości listka głównego w odległości s wynosi:

$$L_{eff} = \frac{c}{f D} s$$

gdzie c jest prędkością fal a f ich częstotliwością.

Dla określonego przetwornika (stałe f oraz D) wielkość efektywnej apertury L_{eff} rośnie wraz z zasięgiem przeszukiwania s . Z drugiej strony przy ustalonym zakresie przetworniki o małej średnicy D i niskiej częstotliwości f skutkują zwiększeniem efektywnej apertury.

2.4 Rozdzielczość poprzeczna

Zgrubnym miarą rozdzielczości poprzecznej przetwornika jest połowa szerokości listka głównego, zdefiniowanego przy -3 dB spadku, czyli wielkość efektywnej apertury L_{eff} .

$$L_{eff3dB} \cong \frac{c}{f D} s_o$$

gdzie s_o jest zasięgiem odpowiadającym ogniskowaniu elementu techniką SAFT.

Zasadniczą różnicą pomiędzy standardowym ogniskowaniem dla głowic phase-array oraz techniką syntetycznej apertury SAFT jest fakt, że wynikowa rozdzielczość poprzeczna SAFT jest dwukrotnie lepsza (zdefiniowana przy -3 dB spadku listka głównego i można ją interpretować jako oszacowanie rozmiaru reflektora). Dla przypadku gdy tylko pojedynczy element głowicy phase-array nadaje i odbiera sygnały, tzw. technika monostatyczna technika SAFT – MSA, wynosi ona:

$$\delta_{y3dB} \cong \frac{c s_o}{2 f L_{eff3dB}}$$

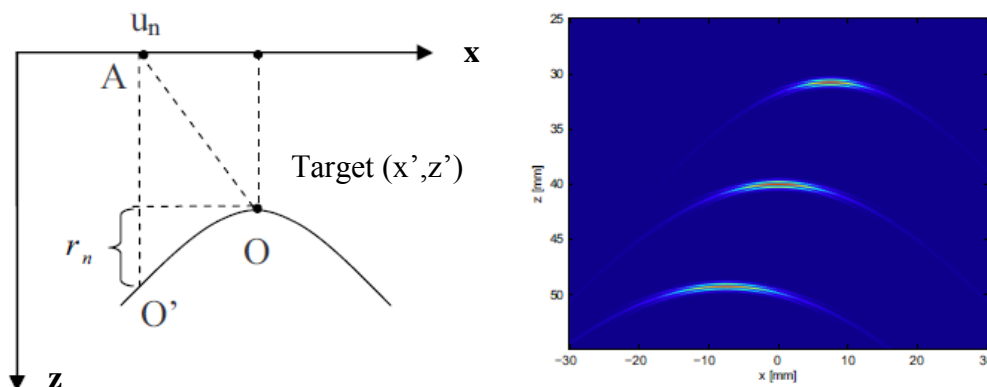
gdzie L_{eff3dB} jest efektywną długością apertury, zdefiniowaną dla największej apertury (pojedynczy czynny element – rzędu długości fali) oraz ustalonych wartości częstotliwości f oraz ogniskowej s_o . Ostatecznie na podstawie powyższego można oszacować, że teoretyczna rozdzielczość - rozmiar reflektora (zarówno w przypadku konwencjonalnej techniki SAFT – MSA, jak też rozszerzonego SAFT – STA będzie co najwyżej wynosić:

$$\delta_{y3dB} \cong \frac{D}{2}$$

Oznacza to iż w przypadku zastosowania techniki SAFT dla głowic typu phase-array o rozdzielczości decyduje wielkość pojedynczego elementu tzw. pitch'a. Z drugiej jednak strony należy pamiętać, że minimalna wielkość jest limitowana przez stosunek sygnału do szumu - SNR, konieczny do detekcji określonego reflektora.

3. ANALIZA ZOBRAZOWAŃ UT – ILUSTRACJA EKSPERYMENTÓW

3.1 Mechanizm powstawania surowych zobrażeń typu B - B-scan



Rys. 7 Surowe dane skanowania typu B wiązką normalną, w postaci hiperbol B-scan. Generowanie hiperbol następuje podczas przemieszczania głowicy wzdłuż osi x z identyfikacją położenia głowicy. Hiperbole odpowiadają 3 reflektorom zlokalizowanym na różnej głębokości.

Z powodu rozbieżności wiązki oraz tłumienia w materiale badanym wraz ze zmieniającą się głębokością obraz wskazań będzie skutkował różną odpowiedzią w postaci hiperboli. Jak to pokazano na Rys. 7 przetwornik w położeniu A określa echo z punktu obserwowanego

(reflektora) O jako echo „rozproszone” na głębokości $AO' = AO$, przypisując punktowi O' wartość amplitudy wynikającą z rejestracji echa wzdłuż drogi AO. Po wykonaniu skanowania przez ruch przetwornika (przejście apertury) wzdłuż osi y, hiperbola pokazana na Rys. 7 jest obrazem rozproszenia sygnału od reflektora znajdującego się w punkcie obserwowanym O i jest interpretowana jak zobrazowanie typu B (B-scan). Im bliżej syntetycznej apertury tym bardziej kontrastowe zobrazowanie hiperboli.

Zastosowanie algorytmów techniki SAFT do zobrazowań typu B (syntetyczne ogniskowanie w obszarze każdego reflektora) prowadzi do „zawężenia” hiperbol, a tym samym do polepszenia rozdzielczości zasięgowej – co skutkować będzie polepszeniem oszacowania rozmiaru.

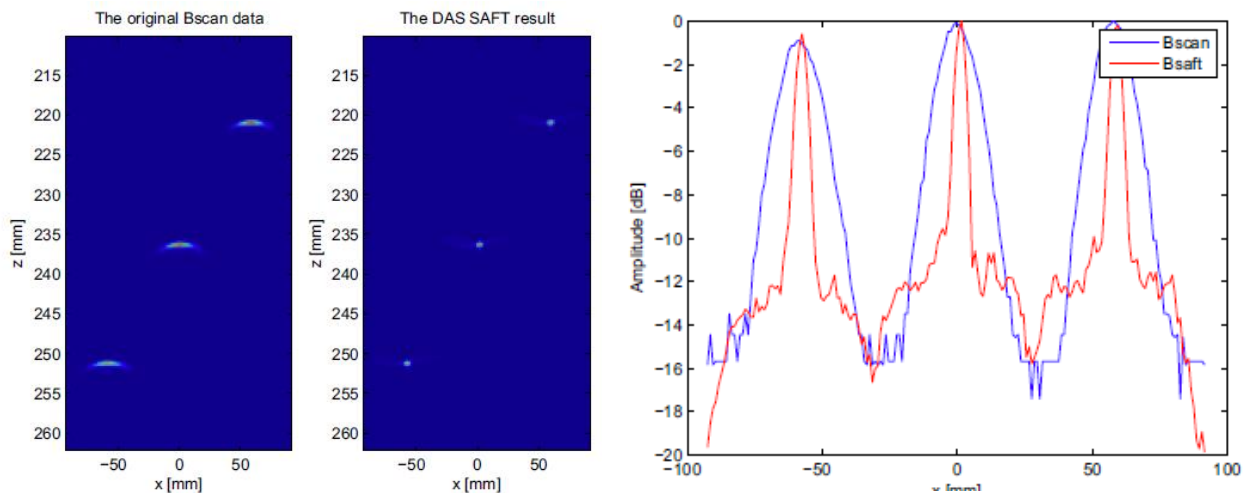
3.2 Ilustracja rekonstrukcji zobrazowania SAFT-MSA

Jako ilustrację działania algorytmu SAFT – MSA pokazano lokalizację trzech stalowych drucików o średnicy 0,2 mm zanurzonych na różnych głębokościach w stanowisku do badań zanurzeniowych. Prezentuje to przypadek badania jednorodnego ośrodka z 3 punktowymi wadami na różnych głębokościach. Parametry badania podano w Tabeli 1:

Tabela 1 : Parametry i wyniki rekonstrukcji SAFT dla 3 drucików

Częstotliwość przetwornika	2.25 Mhz
Średnica przetwornika	10 mm
Prędkość fal	1480 m/s
Częstotliwość próbkowania	80 MHz
Częstotliwość próbk. przestrzenna	1 mm
Długość syntetycznej apertury	40 mm
Rozdzielczość -3dB dla surowego Bscan	12,4 mm
Rozdzielczość -3dB dla B-SAFT - MSA	2,9 mm

Efektywną długość syntetycznej apertury, dla wybranego przetwornika - opierając się na zapisie surowych zobrazowań typu B, oszacowano na 40 mm.



Rys. 8 Lokalizacja 3 drucików w technice zanurzeniowej. Surowy B-scan (lewy góra); B-scan po rekonstrukcji (prawy góra); Profile amplitudy sygnału w[dB] dla obydwu B-scan'ów w celu porównania poprzecznej rozdzielczości zasięgowej

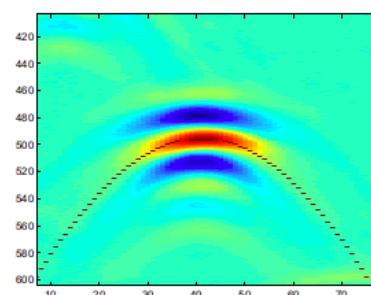
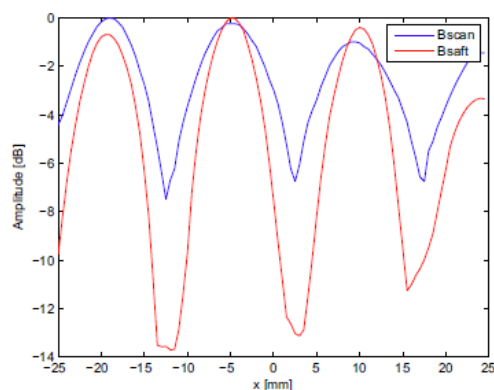
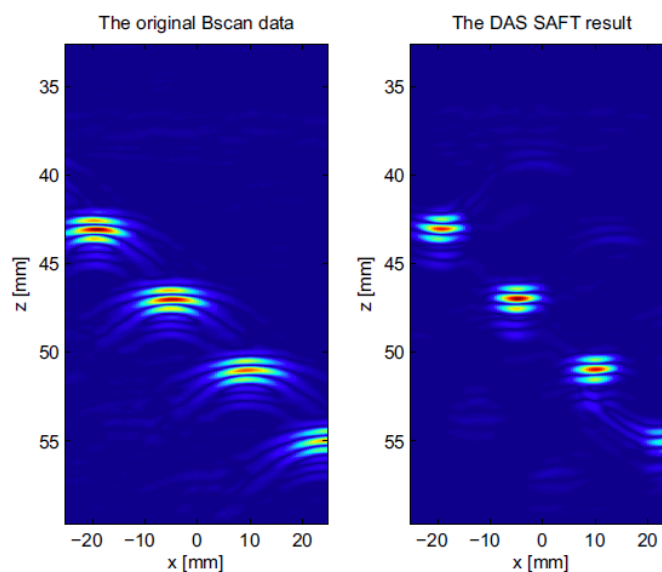
Rekonstrukcja techniką SAFT generuje znacznie lepsze wyniki niż oryginalny (surowy) B-scan. Po procesie obróbki SAFT następuje ponad 4 – krotne podwyższenie rozdzielczości poprzecznej – oszacowania rozmiaru reflektorów na obrazowaniu typu B.

3.3 Badania próbek z miedzi techniką kontaktową

Badania bloku polegały na lokalizacji i wymiarowaniu otworków poprzecznych mających charakter 4 reflektorów SDH ($D_{SDH} = 2 \text{ mm}$), usytuowanych na głębokościach od 43 do 55 mm w próbce miedzi drobnoziarnistej. Parametry badania podano w Tabeli 2. Opierając się na zapisie surowych zobrazowań typu B, efektywną długość syntetycznej apertury dla wybranego przetwornika oszacowano na 36 mm.

Tabela 2: Parametry i wyniki rekonstrukcji SAFT dla 4 otworów SDH

Częstotliwość przetwornika	2.25MHz
Srednica przetwornika D	12,7mm
Prędkość fal	4660m/s
Częstotliwość próbkowania	80 MHz
Częstotl. próbk. przestrzenna	0,5 mm
Długość syntetycznej apertury	36 mm
Rozdz.-3dB dla surowego Bscan	6,25mm
Rozdz. -3dB dla B-SAFT-MSA	4,0 mm
Rozdzielczość teoretyczna D/2	6,35mm



Rys. 9 Lokalizacja 4 reflektorów SDH techniką kontaktową w bloku miedzi. Surowy B-scan (lewy góra); B-scan po rekonstrukcji (prawy góra); Profile amplitudy sygnału w[dB] dla obydwu B-scan'ów w celu porównania poprzecznej rozdzielczości zasięgowe, odpowiednio $\delta_{Bscan/-3dB} = 6,25 \text{ mm}$ oraz $\delta_{BSAFT/-3dB} = 4,0 \text{ mm}$. W prawym dolnym rogu pokazano teoretyczną symulację hiperboli opóźnienia sygnału na tle zarejestrowanego surowego B-scanu dla jednego z otworków.

Ocena rozmiaru na podstawie sygnału surowego zapisu B-scanu $\delta_{Bscan/-3dB} = 6,25 \text{ mm}$.
Ocena rozmiaru na podstawie sygnału po rekonstrukcji B-SAFT $\delta_{BSAFT/-3dB} = 4,0 \text{ mm}$

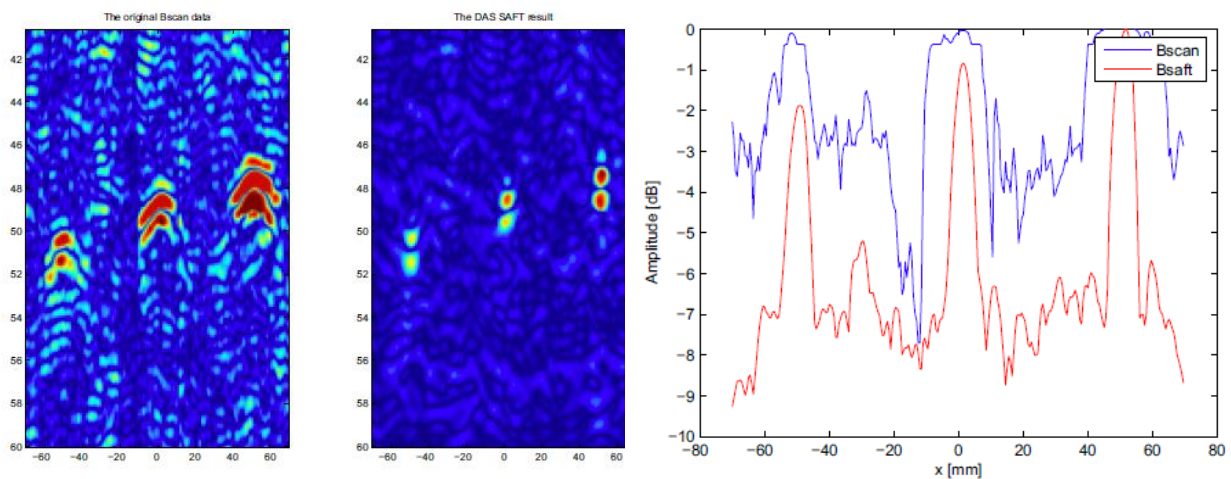
3.4 Badania próbek ze stali austenitycznej

Badania bloku polegały na lokalizacji i wymiarowaniu otworków poprzecznych mających charakter 3 reflektorów SDH ($D_{SDH} = 5\text{ mm}; 8\text{ mm}; 10\text{ mm}$) usytuowanych w przybliżeniu na głębokościach około 50 mm w próbce stali austenitycznej gruboziarnistej. Parametry badania podano w Tabeli 3.

Tabela: Parametry i wyniki rekonstrukcji SAFT dla 4 otworów SDH

Częstotliwość przetwornika	2.25 Mhz	
Srednica przetwornika D	12,7 mm	
Prędkość fal	5800 m/s	
Częstotliwość próbkowania	80 MHz	
Częstotliwość próbk. przestrzenna	0,5 mm	
Długość syntetycznej apertury	36 mm	
Ocena 3dB dla surowego Bscan	27,3 mm	
Ocena 3dB dla B-SAFT - MSA	5,1 mm	
Ocena teoretyczna D/2	6,35 mm	

Opierając się na zapisie surowych zobrazowań typu B, efektywną długość syntetycznej apertury dla wybranego przetwornika oszacowano na 36 mm



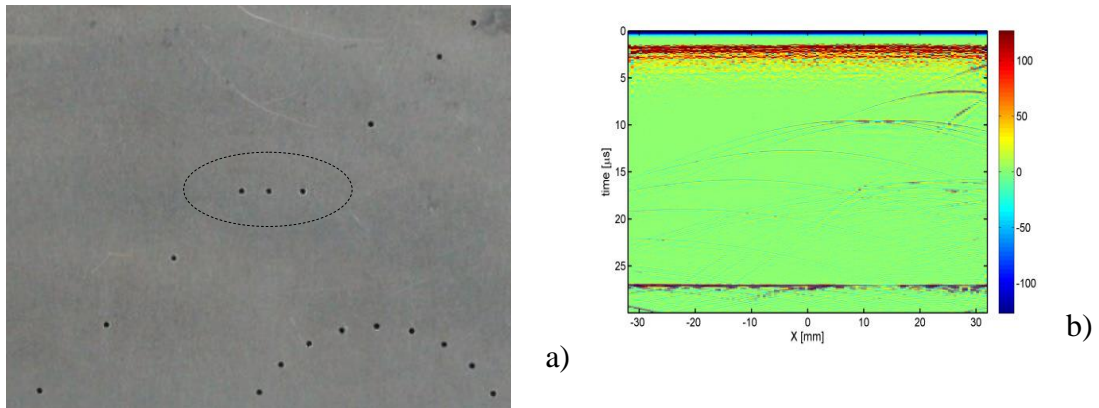
Rys. 10 Lokalizacja 3 reflektorów SDH techniką kontaktową w bloku stali austenitycznej. Surowy B-scan (lewy) wykazuje słaba rozdzielczość i duże szумы strukturalne; B-scan po rekonstrukcji SAFT-MSA (środek); Profile amplitudy sygnału w [dB] dla obydwu B-scan'ów w celu porównania poprzecznej rozdzielczości zasięgowe, odpowiednio $\delta_{Bscan/-3dB} = 27,3\text{ mm}$ oraz $\delta_{BSAFT/-3dB} = 4,0\text{ mm}$. W prawym dolnym rogu pokazano teoretyczną symulację hiperboli opóźnienia sygnału na tle zarejestrowanego surowego B-scanu dla jednego z otworków.

Oryginalny B-scan pokazuje bardzo złą rozdzielczość wskazań $\delta_{Bscan/-3dB} = 27,3\text{ mm}$ oraz wysoki poziom szumów strukturalnych ($SNR \leq 3\text{ dB}$) wynikający z rozproszenia na granicach ziaren gruboziarnistej stali austenitycznej.

Ocena rozmiaru na podstawie sygnału po rekonstrukcji B-SAFT pozwala oszacować średni rozmiar otworów - $\delta_{BSAFT/-3dB} = 5,1\text{ mm}$. Jednocześnie na profilach amplitudy widać znakomity wzrost $SNR \geq 6\text{ dB}$.

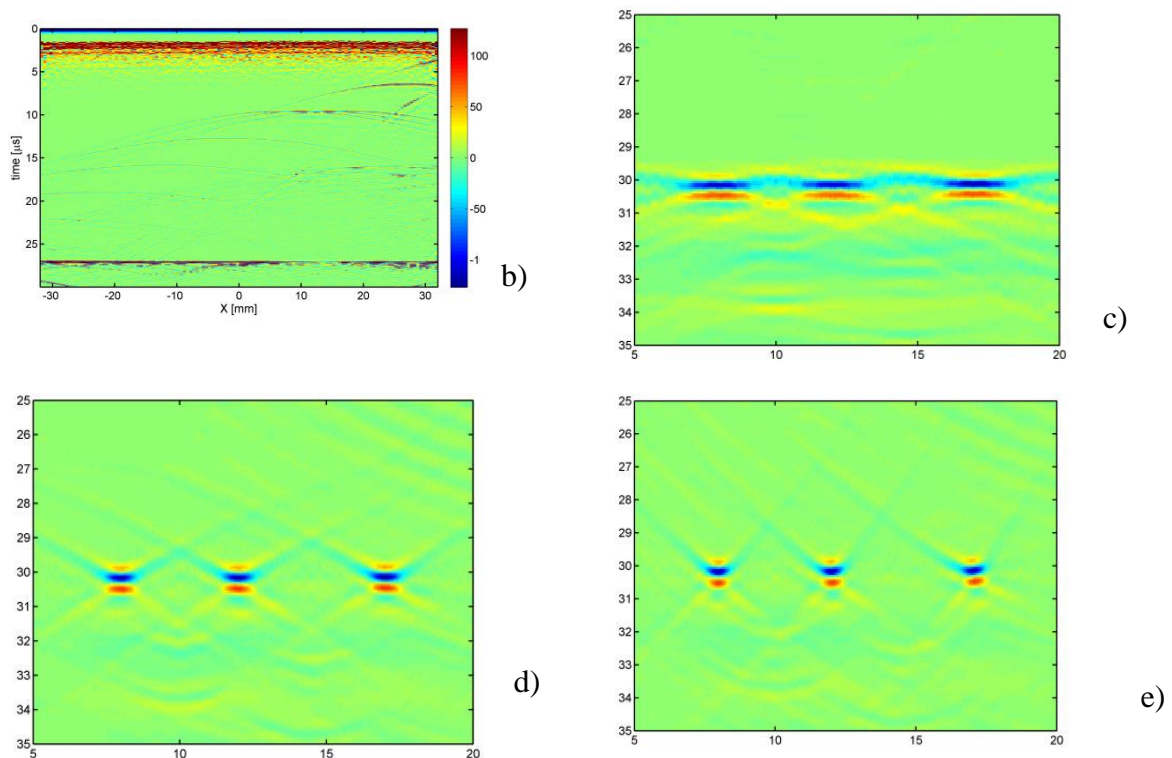
3.5 Porównanie rekonstrukcji obrazowania SAFT-MSA oraz SAFT-TSA

W tej części wykorzystano wyniki badania ultradźwiękowego prostej próbki odniesienia, w której wykonano otworki przelotowe – ułożone w różnej konfiguracji, jak na Rys. 5.



Rys. 11 Wyniki rekonstrukcji techniką konwencjonalnego SAFT – MSA, przy zastosowaniu 128 – elementowej głowicy, pitch = 0,5 mm, $f = 5$ MHz; a) obraz próbki podlegającej skanowaniu, b) surowy (nierekonstruowany) B - scan

Najpierw prześledzono działanie algorytmu konwencjonalnego SAFT – MSA. Badanie przeprowadzono na 3 otworkach cylindrycznych SDH (zaznaczonych przerywana elipsą) na próbce aluminium - Rys. 5 a).

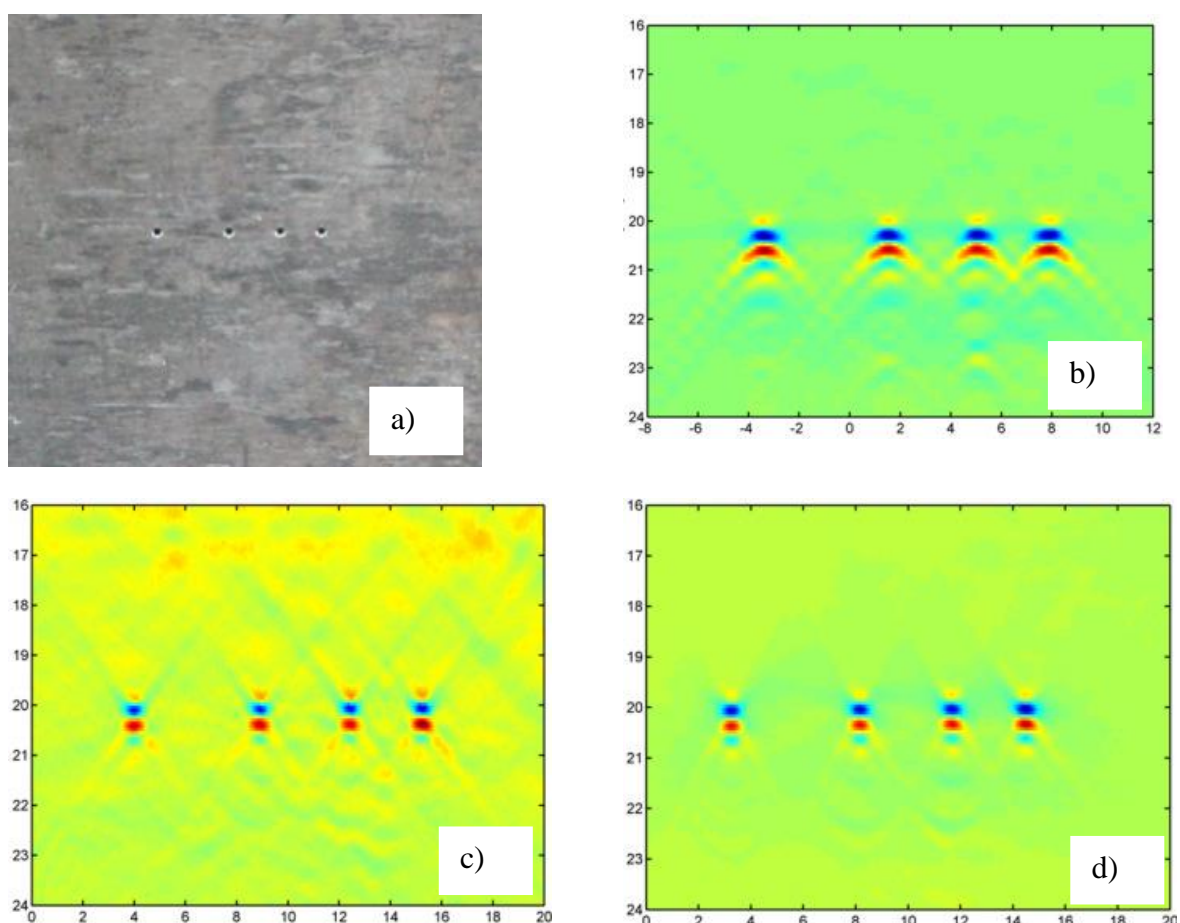


Rys. 11(kont.) Wyniki rekonstrukcji techniką konwencjonalnego SAFT – MSA, przy zastosowaniu 128 – elementowej głowicy, pitch = 0,5 mm, $f = 5$ MHz; b) surowy (nierekonstruowany) B – scan, c) obraz rekonstruowany – Syntetyczna Apertura SA = 10 mm, d) obraz rekonstruowany – SA = 30 mm, e) obraz rekonstruowany – SA = 50 mm

Obserwowano wpływ rozmiaru syntetycznej apertury (por *Rys. 5 b), c), d)* oraz *e)*). Można zaobserwować, że czym większa apertura tym bardziej precyzyjna jest rozdzielczość zasięgowa, tzn. bardziej precyzyjne jest oszacowanie rzeczywistego rozmiaru reflektorów SDH. Wiąże się to z faktem, że dla dużej apertury kąt widzenia jest duży.

W kolejnym kroku zaprezentowane są wyniki badania próbki z aluminium z czterema przelotowymi otworkami cylindrycznymi typu reflektorów SDH, rozmieszczonymi jak na *Rys. 6a)*. Dokonano tutaj porównania kilku technik polepszania jakości zobrazowania.

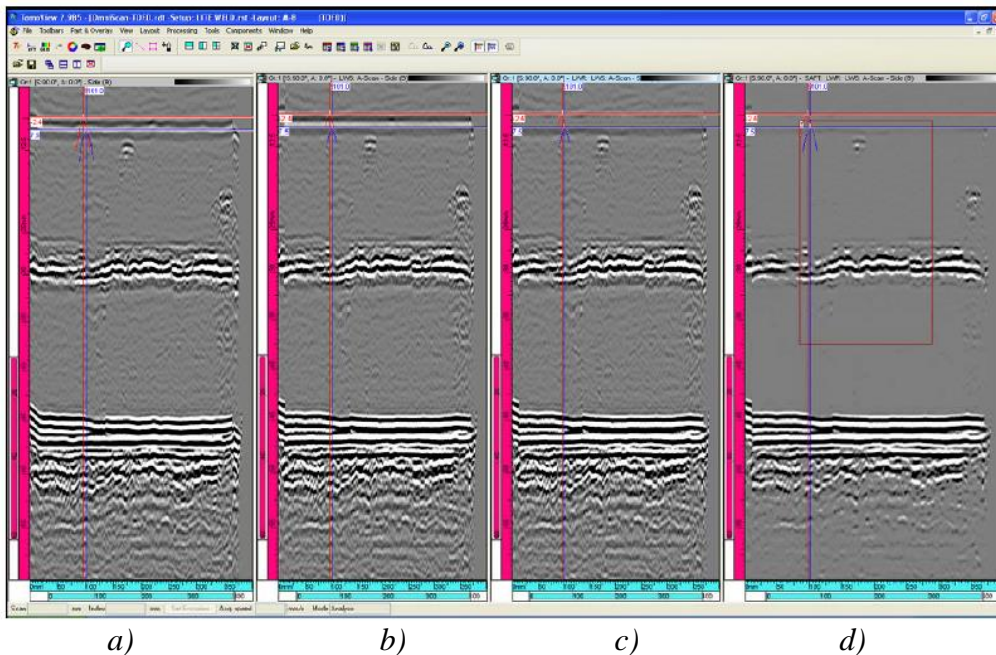
Na *Rys. 6b)* pokazano wyniki lokalizacji reflektorów przy pomocy wiązki zogniskowanej klasycznie w głowicy phase-array, stosując przy tym interpolację położenia ogniska pomiędzy otworami. Natomiast na dalszych zaprezentowano wyniki techniki SAFT w wydaniu konwencjonalnym MSA (syntetyczna apertura dla pojedynczych pitch,ów) oraz w wydaniu rozszerzonym STA (syntetyczna apertura odbiorcza i nadawcza dla wszystkich pitch,ów w ramach tego samego rozmiaru apertury).



Rys. 12 Wyniki rekonstrukcji obrazu różnymi technikami, przy zastosowaniu 128 – elementowej głowicy, pitch = 0,5 mm, f = 5 MHz; a) obraz próbki podlegającej skanowaniu, b) klasyczne wiązki głowicy phase-array, stosując interpolację położenia ogniska pomiędzy otworami; c) B - scan techniką konwencjonalnego SAFT – MSA (syntetyczna apertura SA = 30mm); d) B - scan techniką rozszerzonego SAFT – STA (syntetyczna apertura SA_{transmit} = 30mm, SA_{received} = 30mm);

Należy stwierdzić, że rekonstrukcja SAFT prowadzi do zdecydowanie lepszej rozdzielczości wskazań i coraz lepszemu oszacowaniu ich rzeczywistych rozmiarów reflektorów. Należy jednocześnie pokreślić polepszenie stosunku sygnału do szumu SNR dla najbardziej zaawansowanej techniki rekonstrukcji SAFT – STA.

3.6 Przykład rekonstrukcji zobrażeń TOFD



Rys. 13 a) surowy B-scan TOFD ; b) obróbka cyfrowa obrazu – prostowanie fali podpowierzchniowej; c) obróbka cyfrowa obrazu – usunięcie fali podpowierzchniowej; d) rekonstrukcja zobrazenia TOFD techniką SAFT - MSA.

Należy stwierdzić, że rekonstrukcja SAFT B-scan TOFD prowadzi do lepszej rozdzielczości wskazań oraz zdecydowanego polepszenia stosunku sygnału do szumu SNR.

4. PODSUMOWANIE KOŃCOWE

Technika cyfrowej rekonstrukcji zobrażeń ultradźwiękowych SAFT jest przykładem zastosowania nowoczesnych technik komputerowych dla polepszania jakości obrazu w oparciu o cyfrową rejestrację surowych wyników badania i zaawansowane techniki ogniskowania sygnału.

Jako podstawowe zalety algorytmów SAFT w zastosowaniach NDT należy wymienić:

- bezpośrednie wykorzystanie zobrażeń ultradźwiękowych typu B lub C się do rekonstrukcji obrazu, powodującej jakościową zmianę w interpretacji;
- możliwość obróbki wyników dla głowic jednoprzetwornikowych, jak też phase-array;
- polepszenie rozdzielczości zobrazenia, bez potrzeby użycia tradycyjnych soczewek ultradźwiękowych;
- istotny wzrost sygnału do szumu SNR, co przekłada się na jakość zobrazenia;
- polepszenie rozdzielczości i eliminacja szumów stanowi istotny krok w kierunku szacowania rozmiarów w czasie rzeczywistym badania.

5. LITERATURA

1. T. Stepinski, Synthetic Aperture Focusing Technique in Ultrasonic Inspection Of Coarse Grained Materials, SKI Report, 2008, Uppsala University, Sweden
2. D.B. Braconnier, Synthetic focusing aperture for non-destructive testing of materials, KJDT, Osaka , Japan, 2012
3. J. Kitze, D. Brackrock, G. Brekow, J. Prager, M. Gaal, M.Kreutzbruck: SAFT and TOFD – Compared in Ultrasonic Defect Detection, BAM, Germany, DGZfP 2010