

Krzysztof POLAKOWSKI

OBRAZOWANIE TOMOGRAFICZNE W PRZESTRZENI 2,5 D

STRESZCZENIE *W pracy przedstawiono przykład tworzenia obrazów tomograficznych w przestrzeni 2,5 D. Uproszczenie obliczeń przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej dokładności w tworzeniu obrazów tomograficznych analizowanych zjawisk fizycznych powinno przyczynić się do uzyskiwania wyników w krótszym czasie. Ta kwestia jest ważna, ponieważ od współczesnej tomografii oczekuje się obrazów tomograficznych w czasie rzeczywistym dynamicznie zmieniających się zjawisk. Względy bezpieczeństwa i ekologii wymuszają stosowanie dokładnych i niedrogich sposobów monitorowania przepływów gazów, szkodliwych wyziewów, płynów i mieszanin dwufazowych w przewodach rurowych. Praca przedstawia propozycje monitorowania i obrazowania tego typu problemów techniką tomografii ultradźwiękowej. Do tworzenia obrazów tomograficznych zastosowano liniowe zadanie najmniejszych kwadratów. Zaproponowana metoda została zilustrowana wynikami uzyskanymi z numerycznych symulacji.*

1. WSTĘP

W tomografii ultradźwiękowej obraz stworzony za pomocą techniki rekonstrukcyjnej przedstawia rozkład lokalnych wartości parametru akustycznego mierzonego metodą przejścia w technice skaningowej, z możliwie wielu różnych

dr inż. Krzysztof POLAKOWSKI
e-mail: kp@zkue.ime.pw.edu.pl

Politechnika Warszawska

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 247, 2010

kierunków [11, 12]. Metoda ta pozwala uzyskiwać ilościowe obrazy struktury wewnętrznej obiektów, w których wartości liczbowe każdego piksela opisują ich podstawowe własności fizyczne, takie jak np. gęstość, lepkość, współczynnik sprężystości [1].

Konstrukcja dwuwymiarowego obrazu ze zbioru jednowymiarowych pomiarów jest w rzeczywistości rekonstrukcją dwuwymiarowego przekroju obiektu z jego rzutów. W obiekcie musi istnieć taka zmienna, że każda wartość zmierzona w rzucie jest liniową całką tej zmiennej wzdłuż drogi wiązki [2].

Można wykazać, że czas przejścia fali ultradźwiękowej jest całką odwrotności lokalnych prędkości $f(x,y)$ po drodze propagacji s , a $f(x,y)$ oznacza prędkość dźwięku w punkcie (x,y) przekroju badanego obiektu.

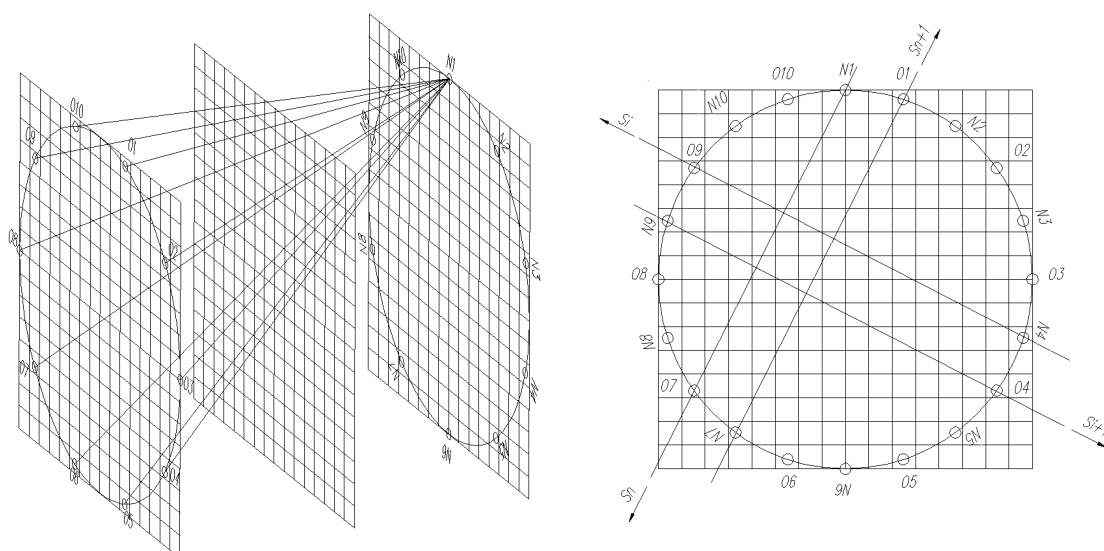
Mierząc bezpośrednio wartości czasu przejścia można zatem zrekonstruować obraz rozkładu lokalnych wartości prędkości dźwięku w mierzonym przekroju, co jest podstawą do monitorowania przepływów [1].

W diagnostyce przemysłowej coraz większą rolę zaczyna odgrywać technika wykorzystująca metody echograficzne, w których badane jest echo impulsów ultradźwiękowych wysyłanych w obszar obiektu badanego. Echo to jest proporcjonalne do stosunku impedancji akustycznych sąsiadujących ośrodków badanych obiektów. Ta metoda pomiarowa jest podstawą ultrasonografii, mikroskopii ultradźwiękowej i defektoskopii ultradźwiękowej. Ultradźwiękowa tomografia transmisyjna UTT (ang. *Ultrasound Transmission Tomography*) umożliwia, z wykorzystaniem odpowiednich technik rekonstrukcyjnych, tworzenie przekrojowych obrazów obszaru badanego na podstawie uzyskanej informacji zawartej w odebranych impulsach przenikających badany obszar. Różnice lokalnych wartości określonych parametrów akustycznych, takich jak np.: prędkość przechodzenia impulsów ultradźwiękowych przez nadany obiekt, współczynnik ich tłumienia, zmiana częstotliwości środkowej impulsów odebranych, odpowiedzialne są zwykle za kontrast uzyskiwanych obrazów tomograficznych [2].

W metodach tych ważnym zagadnieniem jest opracowanie metody umożliwiającej obrazowanie tomograficzne w jak najszybszym czasie, bez konieczności stosowania drogich systemów komputerowych o bardzo dużych mocach obliczeniowych. Obrazowanie w przestrzeni 3 D wymaga zastosowania takich systemów, bo w innym przypadku czas obliczeń znacznie się wydłuża. Poszukiwane są więc inne metody, które dawałyby zadawalające wyniki w szybszym czasie. Jedną z takich metod może być zastosowanie obliczeń w przestrzeni 2,5 D. W dużym uproszczeniu polega ona nie tylko na dyskretyzacji badanego obszaru w płaszczyznach pomiarowych na piksele, ale również podział tego obszaru w kierunku trzeciego wymiaru, w celu uzyskania vokseli.

2. REKONSTRUKCJA OBRAZÓW W TOMOGRAFII

Odtworzenie profilu rozkładu prędkości w płaszczyźnie odbiorników oznacza wyznaczenie estymat skończonego zbioru nieznanych wartości prędkości, które możemy określić, jako $f(x,y)$. Na podstawie pomiarów czasów przebiegów impulsów penetrujących możemy uzyskać scałkowane wartości prędkości na drogach i -tych ścieżek pomiarowych (zwanych promieniami) między nadajnikami a odbiornikami, które mogą być, zgodnie z zaproponowaną przez Radona metodą tworzenia rzutu (lub projekcji), określane rzutami (lub projekcjami) s_i , co pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowa projekcja promieniami rzutującymi oraz powierzchnia warstwy projekcji zawarta pomiędzy warstwami nadajników i odbiorników

Pomiary i tworzenie obrazów tomograficznych następuje w płaszczyznach pomiarowych, a przejście do trzeciego wymiaru następuje na drodze aproksymacji uzyskanych wyników. Im dyskretyzacja w kierunku trzeciego wymiaru jest gęstsza, to tym dokładniej można uzyskiwać odwzorowanie przestrzenne badanego obszaru, co pokazano na rysunku 2.

Nowe generacje tomografów komputerowych bazują na algorytmach rekonstrukcji obrazu z projekcji wykonywanych z wykorzystaniem wiązek promieni najczęściej ustawionych do siebie równolegle [4]. W przedstawionym przypadku zastosowano algorytmy z grupy metod algebraicznych, bazujące na

aproksymacji przez szeregi o skończonej długości FS (ang. *finite series*). Obraz odtwarzany jest przy pomocy algorytmu dyskretyzującego badany obszar do postaci kwadratowych komórek o długości boku l , których środki geometryczne traktowane są jako piksele w odtwarzanym obrazie (ang. *the square pixels model*) [3].

Uzyskiwane w wyniku fizycznego pomiaru wartości średnie s_i reprezentują całą liniową nieznaną funkcję rozkładu lokalnych wartości mierzonego parametru w badanym przekroju obiektu wzdłuż drogi promienia. W tak zdyskretyzowanym modelu całka liniowa przechodzi w skończoną sumę, a cały model może być opisany układem równań liniowych.

Tą metodę rekonstrukcji określa się jako metodę szeregów skończonych, która w przeciwieństwie do metod transformatowych oparta jest o model wiążący skończony zbiór znanych liczb reprezentujących dane projekcyjne ze skończonym zbiorem nieznanymi liczb reprezentujących obraz (funkcję f). W tak dyskretnie sformułowanym układzie uzyskany układ równań liniowych może być rozwiązywany na drodze numerycznej [3].

Zakłada się przy tym, że w dyskretyzowanym profilu rozkładu prędkości $f(x,y)$ w każdej j -tej komórce funkcja f_j określająca poszukiwaną wartość ma wartość stałą. Zależność między tak określonymi rzutami s_i a wartościami f_j można określić jako (1):

$$\sum_{j=1}^n w_{ij} f_j = s_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

gdzie:

- m – liczba wszystkich promieni;
- n – liczba komórek, które przecinają promienie;
- w_{ij} – współczynniki wagowe określające udział szukanej wartości dla j -tej komórki, w stosunku do całej pomierzonej wartości wzdłuż i -tego promienia.

Jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu jest znalezienie wektora f^* , który dla zadanej macierzy W i wektora s minimalizuje normę euklidesową wektora residualnego (2):

$$\|\mathbf{r}\|_2 = \min_{f \in R^n} \|\mathbf{s} - \mathbf{Wf}\|_2, \quad \|\mathbf{r}^*\|_2 = \min \|\mathbf{r}\|_2 \quad (2)$$

gdzie ostatnie minimum liczone jest po wszystkich wektorach f . Jest to tzw. liniowe zadanie najmniejszych kwadratów (LZNK) [5, 6].

3. EKSPERYMENT NUMERYCZNY

W opisywanym przypadku do badań przyjęto skomplikowany przestrzenne model przepływu (rys. 2). W kierunku osi z badany obszar przestrzeni podzielony został początkowo na pięć warstw (rys. 2a-b), a następnie na szesnaście warstw (rys. 2c-d), a każda z warstw została z kolei podzielona w płaszczyźnie (x,y) kwadratową siatką na $32 \times 32 = 1024$ pikseli. W analizowanym przypadku zastosowano 1536 promieni, co w efekcie spowodowało konieczność rozwiązania nadokreślonego układu równań. Rysunek 1a, c przedstawia powierzchnie projekcji tomograficznych, a rysunek 1b, d aproksymację 2,5 D badanego obiektu.

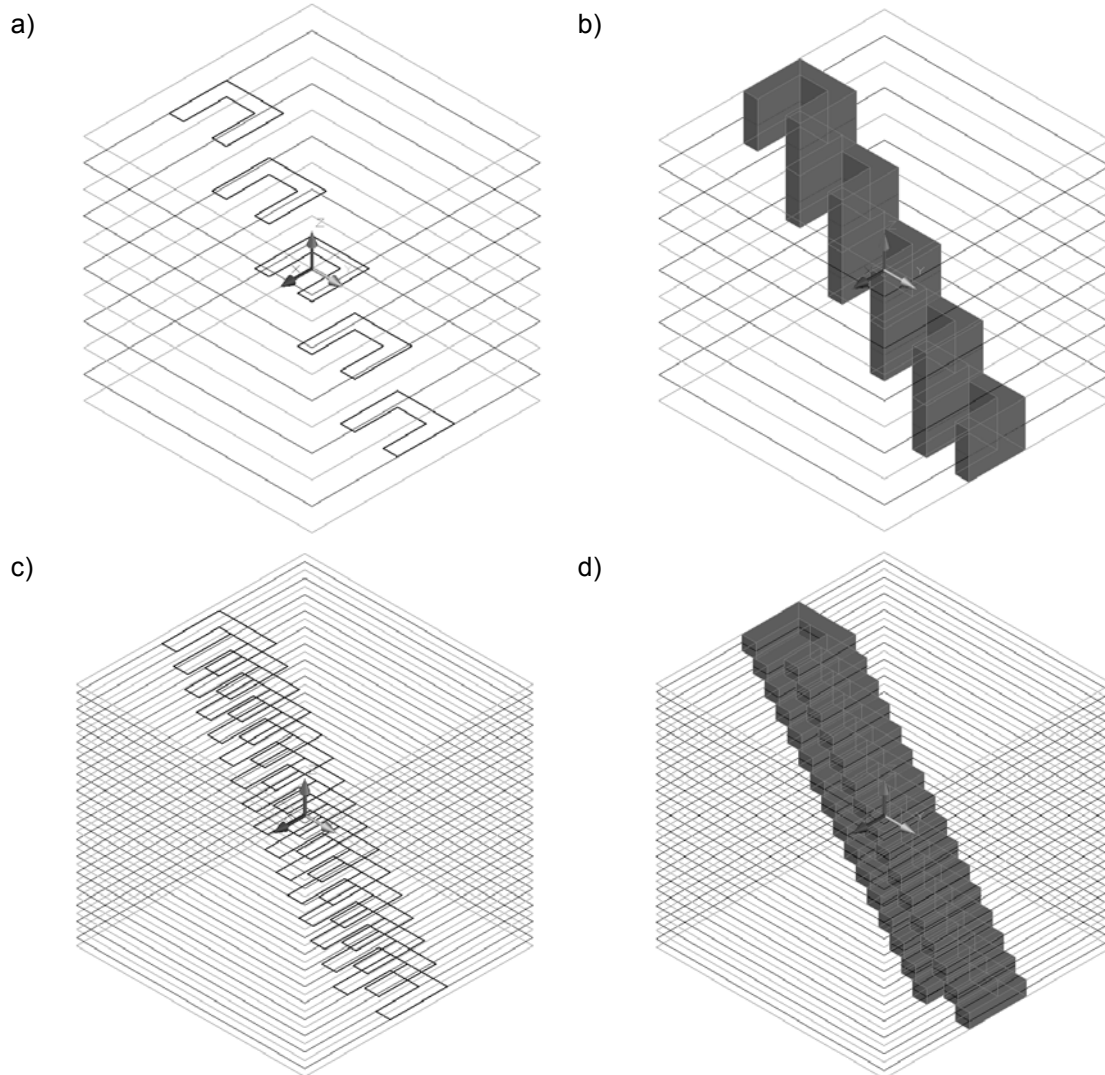
Algorytm obliczeń umożliwił uzyskiwanie w przyjętych warstwach obrazów tomograficznych wybranych przekrojów analizowanego przepływu. Sumując uzyskiwane wyniki w kierunku osi z uzyskano obraz przepływu w obszarze 2,5 D. Im więcej do obliczeń przyjętych zostanie warstw obliczeniowych, tym w efekcie zostanie uzyskany dokładniejszy obraz przestrzenny analizowanego przepływu [7, 8, 9].

Do obliczeń zastosowano dane zaszumione. Zaszumienie było realizowane zgodnie z algorytmem w którym dokonywano zmiany przebiegu promieni poprzez zmianę położenia nadajników i odbiorników zgodnie z zależnością (3), w której w przypadku zaszumienia do współrzędnej ny dodawano z wagą w losową wartość liczbową $llos$ z zakresu $\langle 0, 1 \rangle$ wyliczaną z pomocą generatora liczb losowych, a następnie pomniejszaną o 0,5 w celu uzyskania wartości dodatnich bądź ujemnych [10].

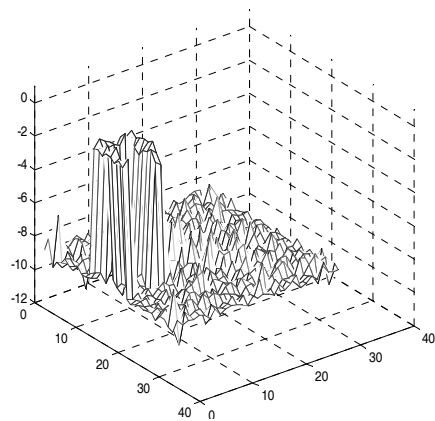
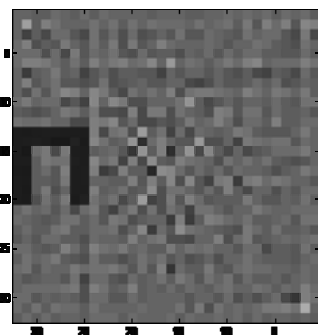
$$ny = ny + w \cdot (llos - 0,5) \cdot ny \quad (3)$$

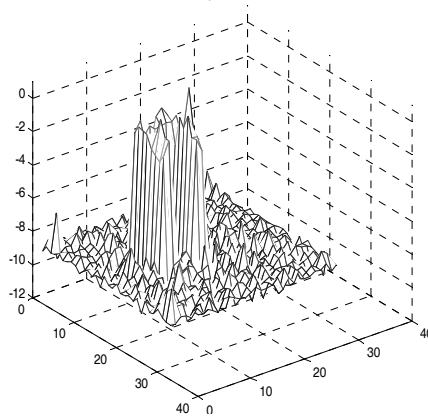
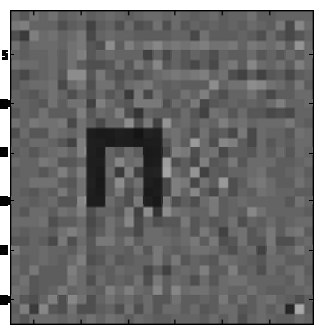
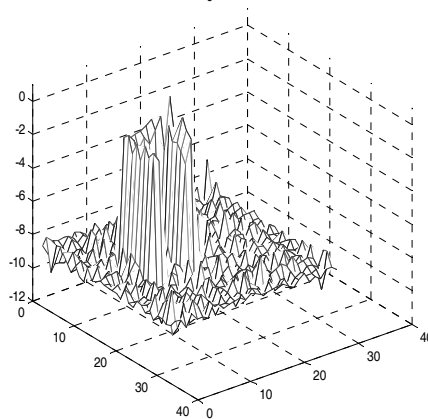
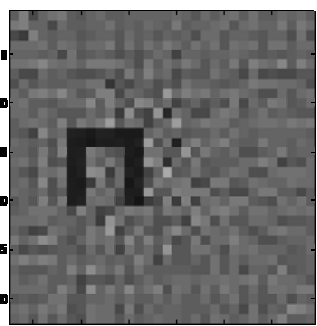
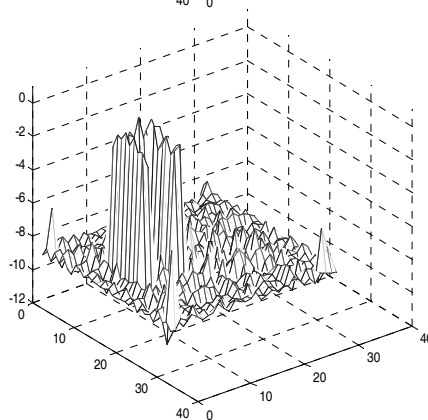
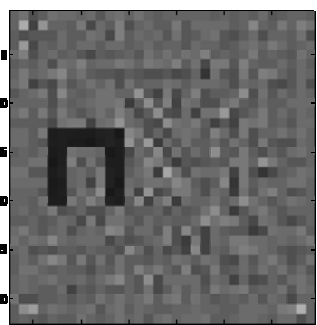
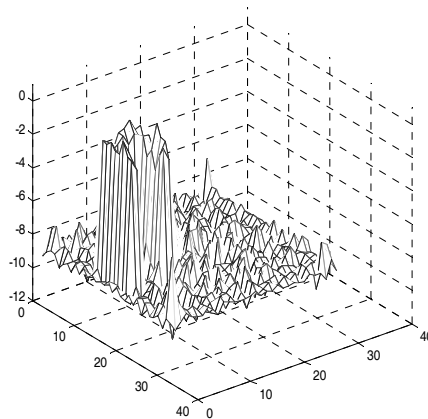
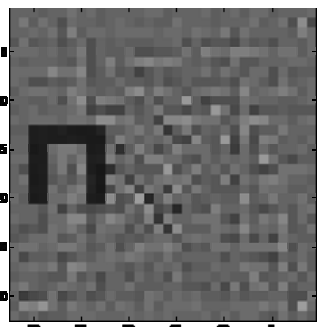
Zaszumienie danych obliczeniowych nie spowodowało w zastosowanej metodzie obliczeniowej dużych deformacji uzyskiwanych obrazów. Jest to istotny fakt, ponieważ rzeczywiste dane są również „zaszumiane” błędami pomiarowymi.

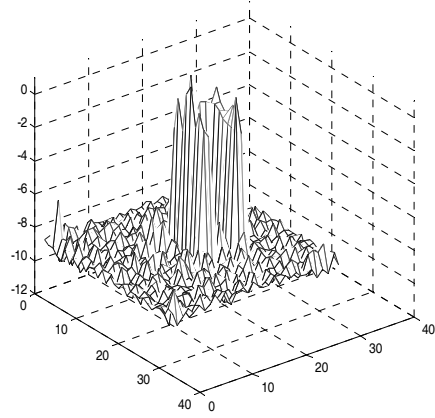
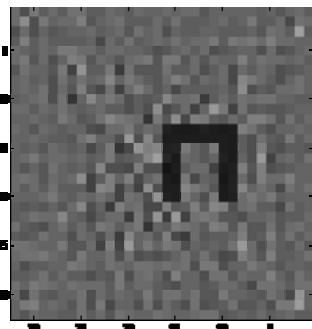
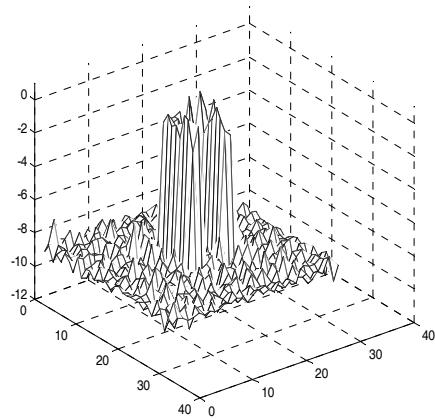
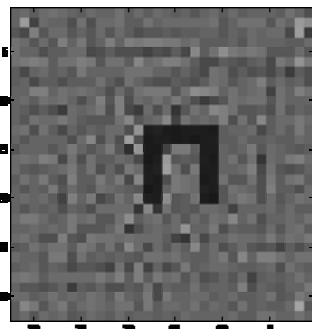
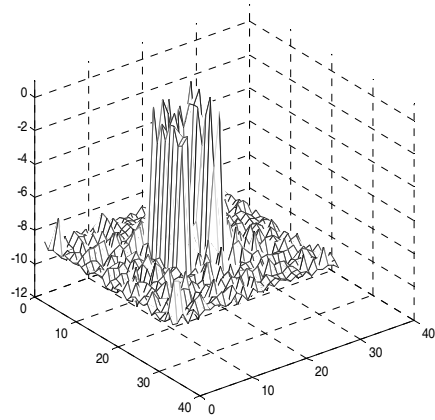
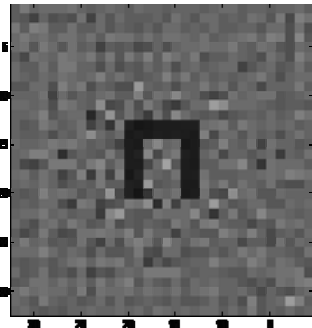
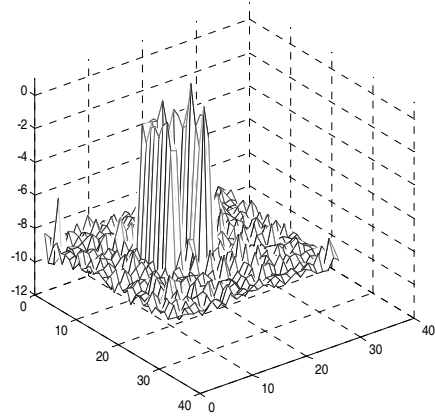
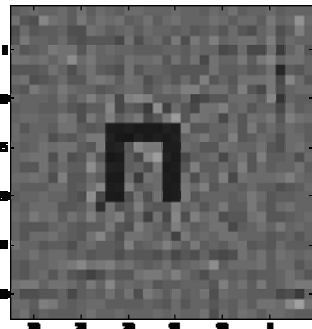
Obrazy uzyskanych w szesnastu warstwach projekcji rozwiązań obrazów tomograficznych oraz ich przestrzennych profili są przedstawione na rysunku 3. Dla modelowanego obiektu w kształcie litery C najlepsze rozwiązanie uzyskano dla progu obcięcia wykresu $\|\mathbf{r}^{(k)}\| = f\{\|\mathbf{f}^{(k)}\|\}$ ustawionego na wartości osobliwej $\sigma_k = 0,0661$, gdzie $k = 1000$ – (przyjęto wszystkie wartości osobliwe aż do tej wartości). Rozkład wartości osobliwych mieścił się w zakresie od 0,0661 do 43,6937.

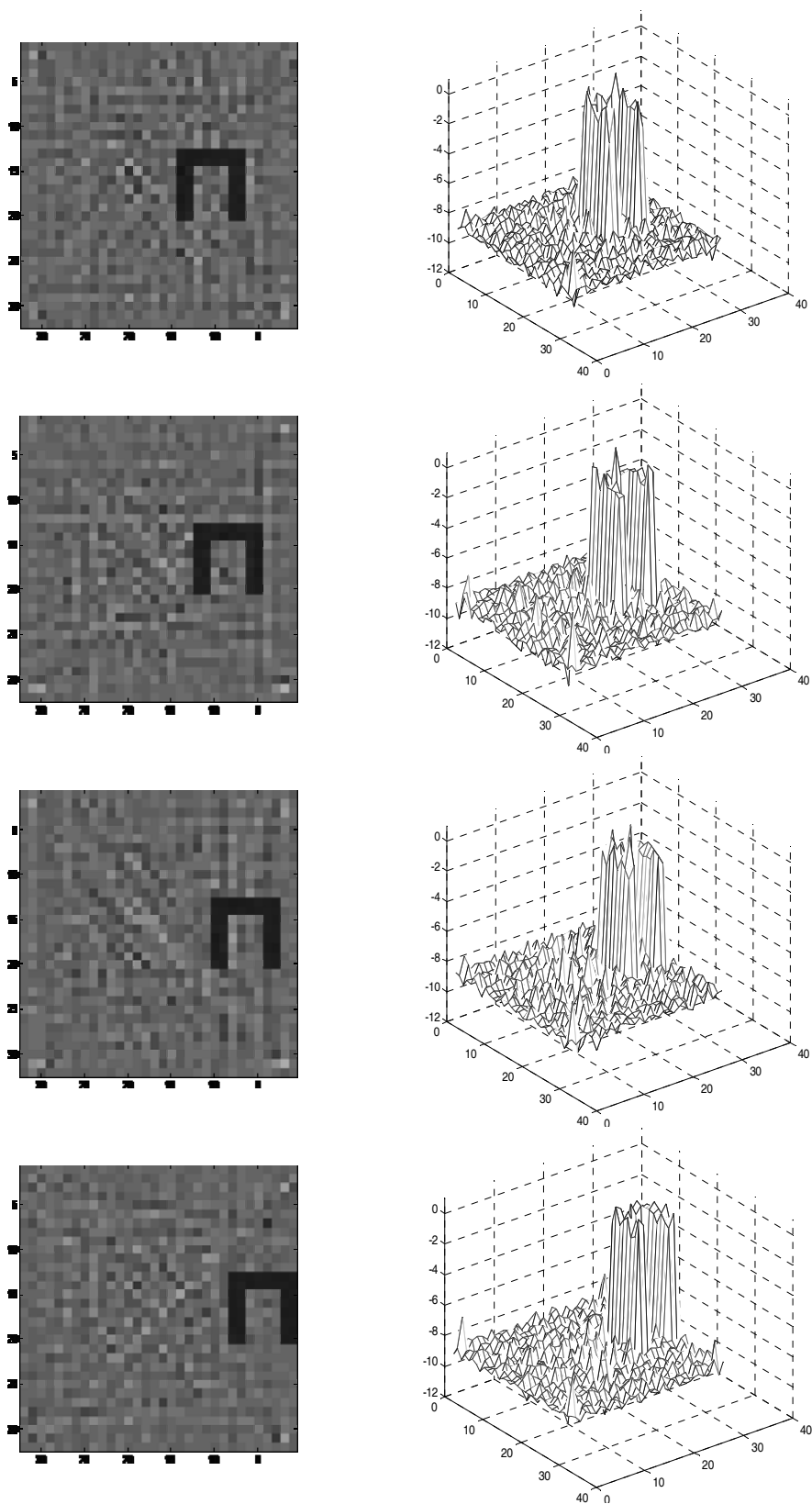


Rys. 2. Modelowany w pięciu (a) oraz szesnastu (b) warstwach projekcji obiekt o kształcie C w przekroju płaszczyzną prostopadłą do osi z w obszarze sześcianu o boku $a = 200$ jednostek i jego aproksymacja 2,5 D (b, d)









Rys. 3. Obrazy tomograficzne w szesnastu warstwach projekcji i ich profile uzyskane dla progu obcięcia wykresu $\|\mathbf{r}^{(k)}\| = f\left\{\|\mathbf{f}^{(k)}\|\right\}$ ustawionego na wartości osobiwej $\sigma_k = 0,0661$

Uzyskane wyniki nie są surowym obrazem odwzorowań tomograficznych, tzn. uzyskanych dla danych syntetycznych, ale zbliżonymi poprzez zaszumienie do rzeczywistych, „zaszumianych” błędami pomiarowymi. Nie zostały one poddane dodatkowym (poza obcięciem bardzo małych wartości osobliwych) procesom filtracyjnym, mającym na celu minimalizację skutków zaszumienia. Pomimo to uzyskano wyraźne obrazy tomograficzne badanego obiektu.

Przejsie do odwzorowania przestrzennego następuje poprzez aproksymację uzyskanych wyników 2,5 D w trzecim wymiarze, czyli poprzez przejście od pikseli do vokseli. Jak widać z rysunku 2, zwiększanie liczby powierzchni projekcyjnych przybliża wynik do pełnego rozwiązania 3 D. Wydłuża to obliczenia, ale nie w takim stopniu, jak dla przypadków poszukiwania rozwiązań w przestrzeni 3 D, w której istnieje konieczność rozwiązywania układów równań o liczebności milionów elementów. Dla przypadków 3 D należałoby zastosować wysublimowane metody algorytmów wielosiatkowych, które umożliwiłyby skrócenie czasu obliczeń przy jednoczesnej komplikacji procesu obliczeniowego [13].

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawione badania prowadzą do powstania nowych efektywnych algorytmów konstrukcji obrazu w monitorowaniu szybko zmiennych przepływów. Zaproponowana metoda konstrukcji obrazu tomografii ultradźwiękowej okazała się dla tych celów efektywna, dużo szybsza i wystarczająco precyzyjna.

W przedstawionych badaniach dużo uwagi poświęcono tworzeniu algorytmów obliczeniowych, które dawałyby możliwość tworzenia obrazów przepływów z wymaganą dokładnością i w jak najkrótszym czasie. Jest to istotny problem, ponieważ przepływomierz tomograficzny powinien umożliwiać obserwację zmian przepływów w czasie rzeczywistym. Uzyskane wyniki wskazują, że zaproponowano skuteczną i efektywną metodę tworzenia wiernych odwzorowań obiektów w postaci obrazów tomograficznych, która może znaleźć zastosowanie w tomografach nieposiadających drogich systemów o dużych mocach obliczeniowych.

LITERATURA

1. Ciernik R.: Tomografia komputerowa. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2005.
2. Gudra T.: Właściwości i zastosowanie przetworników ultradźwiękowych do pracy w ośrodkach gazowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2005.

3. Kak A.C., Slaney M.: Principles of Computerized Tomographic Imaging. IEEE Press, 1999.
4. Kurniadi D., Trisnobudi A., Suanto S.: Ultrasonic Tomography for Airflow Velocity Profile Measurement using Multipath Transducers. Proc. Of 4th world Congress on Industrial Process Tomography, Aizu, Japan, 2005.
5. Lawson C.L., Hanson R.J.: Solving Least Squares Problems. Classics in Applied Mathematics 15, SIAM, 1995.
6. Polakowski K. i in.: Algebraiczne metody konstrukcji obrazów tomografii ultradźwiękowej. Prace Instytutu Elektrotechniki, 2007.
7. Polakowski K. i in.: Image construction problems in ultrasound tomography. XIV International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET'07 and SEEM'07, 2007.
8. Polakowski K., Sikora J.: Visualization and image analysis problems in multipath ultrasonic tomography. 5th World Congress on Industrial Process Tomography WC IPT5, Bergen, Norway, 2007.
9. Polakowski K. i in.: Obrazowanie obiektów przestrzennych w tomografii ultradźwiękowej. Przegląd Elektrotechniczny, 1, 2008.
10. Polakowski K. i in.: Computer method for monitoring workflows of gases used in the automotive systems; rozdział w monografii: Computer Applications in Electrical Engineering. Red. R. Nawrowski. Poznan University of Technology, 2008.
11. Sikora J.: Podstawy Metody Elementów Skończonych. Zagadnienia Potencjalne Pola Elektromagnetycznego. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa, 2008.
12. Sikora J.: Boundary Element Method for Impedance and Optical Tomography. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007.
13. Brezina M., Falgout R., MacLachlan S., Manteul T., McCormick S., Ruge J.: Adaptive Smoothed Aggregation Multigrid, SIAM, 2005.

Rękopis dostarczono dnia 09.04.2010 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Jan Sikora

TOMOGRAPHIC IMAGE FORMING IN 2,5 D

Krzysztof POLAKOWSKI

ABSTRACT *An example of tomographic image forming in 2,5 D space was presented in this paper. The simplification of calculations with assuring the sufficient accuracy in making tomography images of analyzed physical phenomenon should provide results faster. This issue is important because the contemporary tomography is expected to bring real time, tomography images of dynamically changing environment. Taking into consideration growing ecology and safety demands, there is a need for more accurate and cheaper ways to monitor workflows of gases, vapors, fluids and biphasic mixtures in coaxial surfaces of the pipes. The tomographic images constructions were done with an aid of LSM (Linear Least Squares Method). Proposed approach was illustrated with a numerical simulation results.*



Dr inż. Krzysztof POLAKOWSKI ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej. Już w czasie studiów rozpoczął pracę na macierzystej uczelni (w Instytucie Maszyn Elektrycznych), gdzie również zrealizował doktorat. Jego zainteresowania naukowe związane są z modelowaniem w przestrzeni 3 D z wykorzystaniem metod CAD oraz elektrotechniką samochodową. Dotyczy to również zastosowań technik szeroko pojętej tomografii. Jest współzałożycielem specjalizacji Elektrotechnika Samochodowa na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej.