

Andrzej LEŚNIAK, Tomasz DANEK, Anna PIĘTA

Akademia Górniczo – Hutnicza, Kraków

Kierunki rozwoju modelowań numerycznych sejsmicznego pola falowego

Słowa kluczowe

numeryczne modelowanie pola falowego, obliczenia równoległe, modelowania 3D, anizotropia

Streszczenie

W artykule przedstawiono postęp, jaki dokonał się w ostatnich latach w modelowaniach pełnych, sejsmicznych obrazów falowych, głównie pod kątem ich wykorzystania w sejsmice prospekcyjnej oraz sejsmice górniczej i sejsmologii. Postęp ten miał miejsce dzięki dynamicznemu rozwojowi metod informatycznych i numerycznych. Zasadnicze znaczenie miała tu możliwość prowadzenia modelowań numerycznych w rozproszonych, heterogenicznych środowiskach obliczeniowych oraz w innych środowiskach architekturach równoległych. Dodatkowym czynnikiem stymulującym ten rozwój był także wzrost mocy obliczeniowych dokonujący się dzięki ciągłemu rozwojowi sprzętu komputerowego. Wszystkie wymienione czynniki pozwalają na prowadzenie obliczeń w wersji 3D w ośrodkach o dowolnym stopniu złożoności przy zachowaniu akceptowalnego czasu obliczeń.

1. Wstęp

Modelowanie pełnego pola falowego jest nieodłącznym narzędziem interpretacji prowadzonej w sejsmice poszukiwawczej lub sejsmologii inżynierskiej. Modelowania pozwalają zobrazować sposób rozprzestrzeniania się górotworze drgań wzbudzonych w sposób sztuczny lub naturalny. Ich rezultatem są syntetyczne obrazy drgań w dowolnie wybranych punktach ośrodka.

Modelowania sejsmicznego pola falowego znajdują zastosowanie praktycznie na każdym etapie badań sejsmicznych. Są one przydatne na etapie projektowania połowych pomiarów sejsmicznych – uzyskane w wyniku modelowań rezultaty pozwalają między innymi na optymalne rozmieszczenie czujników drgań. Modelowania są również niezbędne w procesie odtworzenia budowy ośrodka geologicznego, w którym odbywa się propagacja a także jego wybranych parametrów geomechanicznych. Dla zmieniających się modeli ośrodka proces modelowania jest wielokrotnie powtarzany w celu otrzymania jak najlepszego dopasowania wymodelowanych rejestracji drgań do rejestracji połowych. Model ośrodka, dla którego otrzymane rejestracje są najbardziej zbliżone do zarejestrowanych jest uznawany za model najlepiej aproksymujący ośrodek rzeczywisty.

Modelowania propagacji fal sejsmicznych odgrywają również kluczową rolę w sejsmologii górniczej. Umożliwiają zwiększenie dokładności lokalizacji źródeł emisji sejsmicznej, np. wstrząsów indukowanych podziemną działalnością górniczą. Podobnie jak w badaniach

sejsmicznego modelowania numerycznego umożliwiają odtworzenie budowy górotworu w rejonie objętym wstrząsami.

Szczegółowe odtworzenie rzeczywistego ośrodka geologicznego na podstawie pomiarów geofizycznych jest praktycznie niemożliwe. Składają się na to głównie przyczyny natury fizycznej, związane z rozdzielczością konkretnej metody pomiarowej oraz matematyczne ograniczenia procedur inwersji. Z reguły dąży się do odzyskania parametrów pewnych uproszczonych ośrodków – typowymi przykładami mogą tu być ośrodki płasko-równoległe. W wypadku ograniczenia się do tej klasy ośrodków modelowania mogą być prowadzone dla stosunkowo prostych modeli jednowymiarowych – 1D. Nawet, jeśli modelujemy pełne pole falowe, obliczenia dla tego typu ośrodków nie są złożone numerycznie nawet dla stosunkowo dużych rozmiarów modeli.

Dążenie w kierunku odtworzenia rzeczywistej budowy ośrodka geologicznego wymusza stosowanie modelowań, dla co najmniej dwuwymiarowych (2D) modeli ośrodka. Są to ośrodki, w których parametry geomechaniczne zmieniają się wzdłuż jednej z osi poziomych i wraz z głębokością. Granice poszczególnych warstw budujących tego typu ośrodki nie są, jak w poprzednim wypadku, równoległe. Modelowania numerycznego pełnego pola falowego dla ośrodków 2D są znacznie bardziej czasochłonne niż dla ośrodków 1D. Mimo dużych kosztów obliczeniowych modelowania 2D są bardzo popularne z uwagi na znacznie większe możliwości rekonstrukcji ośrodków geologicznych.

Wraz z rozwojem sejsmicznych metod pomiarowych oraz z powszechnym użyciem sieci sejsmologicznych złożonych z kilkudziesięciu czujników pojawiła się konieczność prowadzenia modelowań dla ośrodków trójwymiarowych – 3D. Również dopuszczenie możliwości istnienia anizotropii prędkości propagacji fal sejsmicznych wymusza zwiększenie ilości wymiarów modelowanego ośrodka tak by umożliwić przestrzenną analizę rozchodzących się fal sejsmicznych. Jak zostanie to poniżej zilustrowane przejście od modelowań 2D do 3D powoduje iż ilość operacji zmiennoprzecinkowych rośnie w sposób znaczący na tyle by praktycznie uniemożliwić realizację tego typu obliczeń na pojedynczym komputerze o architekturze szeregowej.

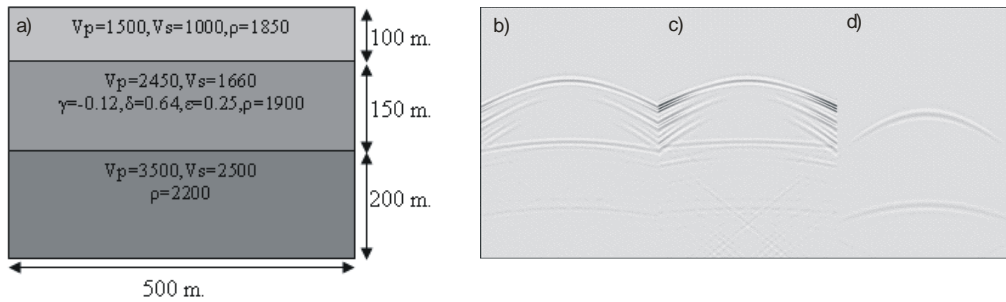
W artykule omówiono podstawowe algorytmy numeryczne stosowane w modelowaniach pełnego pola falowego w złożonych ośrodkach geologicznych. Zestawiono szacunkową złożoność obliczeniową poszczególnych algorytmów dla modeli jedno-, dwu- i trójwymiarowych. Przedyskutowano podstawowe rozwiązania sprzętowe i softwarowe pozwalające na zwiększenie efektywności obliczeń tego typu. Szczególną uwagę poświęcono popularnym ostatnio metodom obliczeń równoległych na klastrach komputerów oraz możliwościom obliczeń prowadzonych z wykorzystaniem procesorów kart graficznych.

2. Metody numeryczne w modelowaniach sejsmicznych

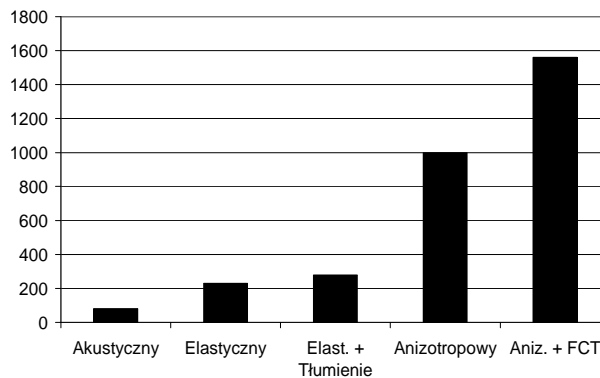
Modelowanie sejsmicznego pola falowego metodą różnic skończonych sprowadza się do iteracyjnego rozwiązywania układu liniowych równań różnicowych. W zależności od stopnia złożoności modelowanego pola, wielkości modelu, skomplikowania warunków brzegowych i warunków stabilności, a także horyzontu czasowego, dla którego ma być przeprowadzone modelowanie, ilość koniecznych do wykonania operacji zmiennoprzecinkowych może sięgać miliardów. Czasy obliczeń w przypadku podstawowych modeli fizycznych górotworu i typów rozwiązań dla prostego modelu (rys. 2.1) przedstawia wykres 2.2. Przetawione wyniki należy traktować w sposób przybliżony z uwagi na fakt, że ilość iteracji potrzebnych do

wygenerowania pola dla zadanego czasu zależy dodatkowo od warunków stabilności. Tym nie mniej wyraźnie widoczny jest dramatyczny wzrost zapotrzebowania na moc obliczeniową wraz z wzrostem zaawansowania numerycznej metody obliczeń. Równie duży wzrost czasu obliczeń następuje przy zwiększeniu wymiarowości ośrodka, o czym wspomniano we wstępie artykułu.

Mimo iż przy przejściu z ośrodków 2D do 3D czas modelowań dramatycznie wrasta, nie to stanowi główny problem w przypadku obliczeń szeregowych. Podstawowym problem dotyczy ilości dostępnej pamięci RAM. W przypadku ośrodków anizotropowych maksymalny możliwy do wyliczenia w środowisku 32 bitowym model może mieć między 1003-2003 węzłów obliczeniowych. W architekturach 64 bitowych to ograniczenie nie istnieje, ale nawet maszyny ze stosunkowo dużą ilością pamięci RAM (kilkanaście GB) mogą być wykorzystywane do modelowań pola falowego w kostkach o długościach krawędzi liczonych raczej w setkach metrów niż w kilometrach (ze względu na warunki stabilności). Jednym rozwiązaniem problemu jest prowadzenie obliczeń w środowiskach rozproszonych.



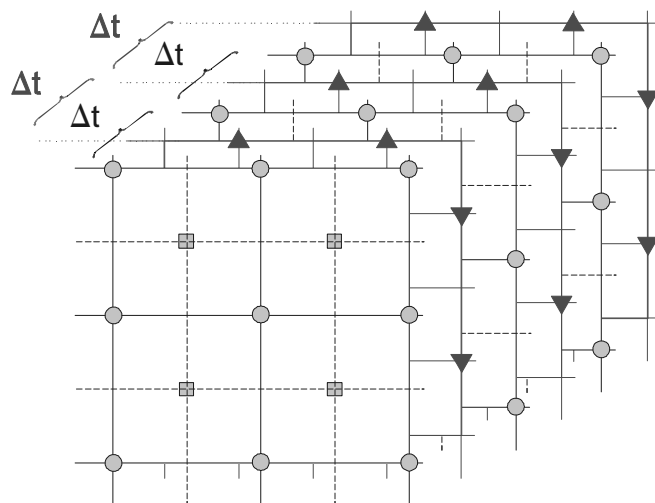
Rys. 2.1. Trójwarstwowy model ośrodka (a); ze środkową warstwą anizotropową (γ, δ, ϵ – stałe Thomsena). Składowe: pionowa (a), pozioma (b) i „crossline” (c) wektora prędkości
Fig. 2.1. Three layer medium. Anisotropy in second layer. (γ, δ, ϵ – Thomsen constants). Vertical (a), horizontal (b) and “crossline” (c) components of velocity vector.



Rys. 2.2. Czasy obliczeń dla kilku podstawowych rodzajów ośrodków i algorytmów (FCT – flux corrected transport). (Danek 2005)
Fig. 2.2. Computational times for basic media and algorithms. (FCT - flux corrected transport). (Danek 2005)

Nowoczesnym i efektywnym sposobem numerycznego rozwiązania układu równań jest zastosowanie metody siatek wzajemnie przesuniętych (ang. staggered grid). Metoda ta posiada szereg własności, które są szczególnie użyteczne dla modelowań przeprowadzanych na użytek badań sejsmicznych. Podstawową zaletą metody siatek wzajemnie przesuniętych jest jej stabilność dla wszystkich wartości współczynnika Poissona, co jest istotne z punktu widzenia poszukiwań morskich oraz przy modelowaniu równania ruchu w ośrodkach charakteryzujących się wysokimi wartościami tego współczynnika. Dodatkowym atutem metody są małe błędy związane ze zjawiskiem dyspersji obserwowanym na siatce obliczeniowej oraz brak wpływu wartości współczynnika Poissona na wyniki modelowania. Innymi równie ważnymi zaletami metody siatek wzajemnie przesuniętych jest łatwość implementacji źródła powierzchniowego i podpowierzchniowego fali sejsmicznej oraz łatwe spełnianie warunków brzegowych na powierzchniach swobodnych [Levander A, 1988].

Rozwiązanie układu równań różniczkowych otrzymuje się zastępując pochodne występujące w równaniu różniczkowym odpowiednimi ilorazami różnicowymi oraz stosując dwuwymiarową siatkę obliczeniową o węzłach wzajemnie przesuniętych w przestrzeni i czasie (rysunek 2.3).



Rys. 2.3. Schemat siatki o węzłach wzajemnie przesuniętych. Wartość składowych wektora prędkości dla kroku czasowego $(k+1/2)\Delta t$ liczona jest na podstawie wartości składowych wektora prędkości (kolor szary) wyznaczonych dla poprzedniego kroku czasowego oraz składowych tensora naprężeń wyznaczonych w czasie $k\Delta t$ (kolor czarny)

Fig. 2.3. Staggered grid computational grid. Velocity components for $(k+1/2)\Delta t$ time step calculated from the same previous time step components and $k\Delta t$ time step stress tensor components

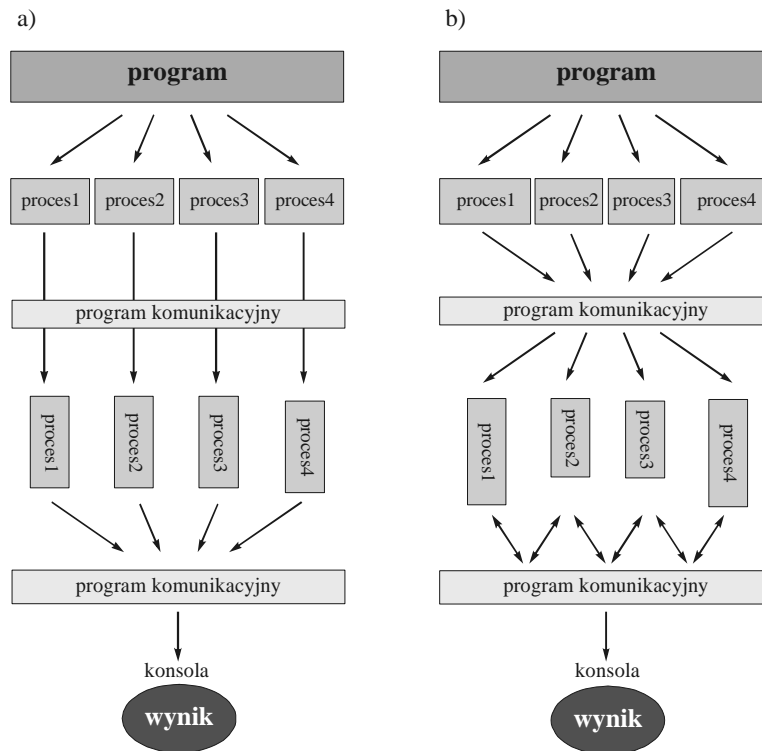
3. Możliwości przyspieszenia obliczeń

Jak wykazano w poprzednim rozdziale praktyczne wykorzystanie ogromnych możliwości jakie dają modelowania pół falowych jest bardzo silnie ograniczane ich dużą czasochłonnością oraz wysokimi wymaganiami jakie stawiają one środowiskom obliczeniowym. Nawet bardzo znaczny wzrost mocy obliczeniowych komputerów w połączeniu z efektywnymi algorytmami nie jest wystarczający dla uzyskania rezultatów modelowań w czasie zbliżonym do tego, jaki

zapewnia metoda trasowania promienia sejsmicznego. Dlatego też podejmowane są liczne próby ograniczenia czasu obliczeń, a tym samym uczynienia tego narzędzia bardziej powszechnym w praktyce sejsmicznej. Aktualne najlepsze rezultaty uzyskiwane są poprzez zastosowanie obliczeń równoległych. Szczególnie dotyczy to obliczeń realizowanych w klastrach komputerów typu PC, które stanowią tanią i efektywną alternatywę dla superkomputerów oraz wykorzystania procesorów kart graficznych.

Kluczowym zagadnieniem, wpływającym na efektywność algorytmów równoległych jest dekompozycja zadania obliczeniowego oraz dobór odpowiednich narzędzi umożliwiających realizację obliczeń w równoległym środowisku obliczeniowym.

Dla równoległej implementacji algorytmu modelowania pola falowego stosuje się dwie strategie podziału: dekompozycję trywialną i dekompozycję domenową. W podziale trywialnym zadanie obliczeniowe jest podzielone na równe, co do wielkości podzadania. Każde z wydzielonych części liczone jest przez osobny proces i nie istnieje konieczność komunikowania się procesów podczas całego cyklu obliczeń. Podział domenowy dopuszcza zmienny rozmiar podzadań i wymagał implementacji mechanizmu komunikacji pomiędzy jednostkami obliczeniowymi. Schemat obliczeń równoległych dla obu typów dekompozycji przedstawiono na rysunku 3.1.

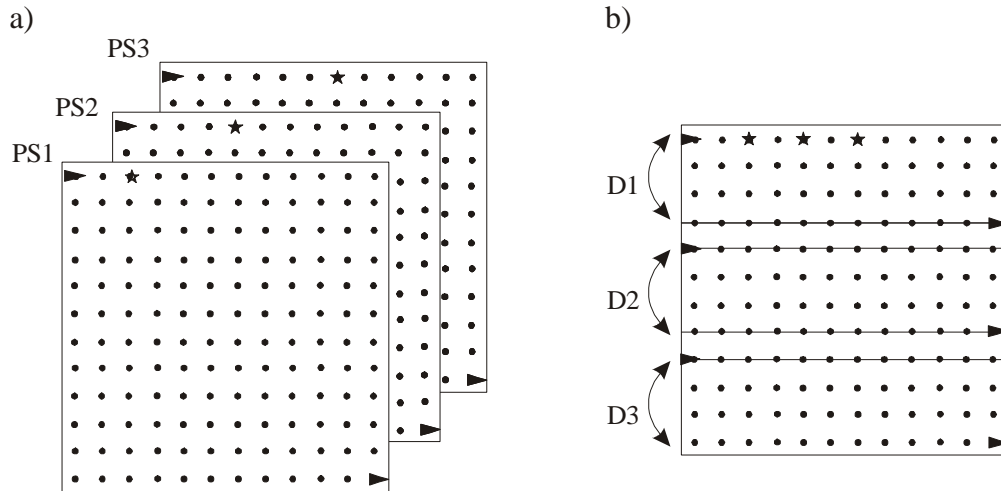


Rys. 3.1. Schemat podziału i komunikacji przy dekompozycji trywialnej (a) i dekompozycji domenowej (b). (Pięta, 2007)

Fig. 3.1. Communication and decomposition schemes. (a) – trivial decomposition, (b) – domain decomposition. (Pięta, 2007)

W dekompozycji trywialnej współrzędne punktów wzbudzenia fali sejsmicznej są podzielone pomiędzy wszystkie biorące udział w obliczeniach procesory. Każdy węzeł obliczeniowy modeluje odpowiedź całego rozważanego ośrodka na falę wzbudzaną w różnych jego punktach (rys. 3.2). Ten sposób podziału można obrazowo nazwać podziałem typu: jeden punkt strzałowy – jeden procesor (1PS-1PC).

W dekompozycji domenowej modelowany obszar dzielony jest na mniejsze poddomeny, których rozmiar i ilość zależy od rozmiarów środowiska obliczeniowego. Każdy z procesorów modeluje rozchodzenie się fali sejsmicznej wzbudzonej w różnych punktach strzałowych tylko we własnej poddomenie (rys. 3.2b). W odróżnieniu od dekompozycji homogenicznej, w podziale heterogenicznym rozmiar poddomen jest sobie równy tylko dla szczególnych rozmiarów ośrodka obliczeniowego.



Rys. 3.2. Dekompozycja 1PS-1PC (a) oraz dekompozycja domenowa (b). PS1, PS2, PS3 – dekompozycja za pomocą kolejnych punktów strzałowych; D1, D2, D3 – kolejne domeny obliczeniowe. (Danek, 2004)

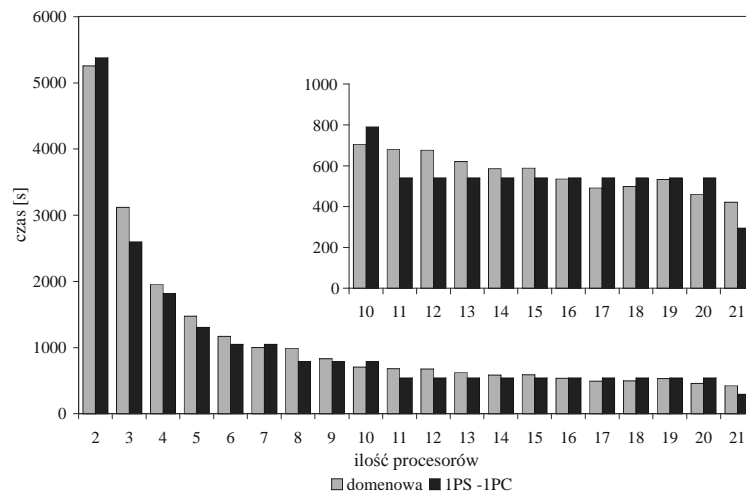
Fig. 3.2. 1PS-1PC (*One shoot point – one PC*) decomposition (a) and domain decomposition (b). PS1, PS2, PS3 – shoot point based decomposition; D1, D2, D3 – consecutive computational domains. (Danek, 2004)

Przy określaniu wydajności równoległych algorytmów modelowania pola sejsmicznego wykorzystuje się skalowalność klastra obliczeniowego. Zakłada się stały rozmiar problemu obliczeniowego realizowanego w klastrze o zmieniającej się liczbie procesorów. Dla przykładu, gdy oba sposoby dekompozycji realizowane są dla identycznych dwuwarstwowych modeli geologicznych i dla takiego samego zestawu parametrów modelowania (Tabela 3.1), możliwe jest przedstawienie różnic pomiędzy obiema sposobami dekompozycji.

Tabela 3.1. Zestawienie parametrów modelu.
Table 3.1. Modeling parameters.

Parametry	Wartości
Wymiary ośrodka [m]	500x500
Krok obliczeń (odległość między kolejnymi węzłami obliczeniowymi) [m]	1
Głębokość granicy odbijającej [m]	250
Prędkość fali w nadkładzie v1 [m/s]	1000
Prędkość fali w warstwie dolnej v2 [m/s]	2000
Współrzędne pierwszego punktu strzałowego[m]	x=200, z=20
Odległości między punktami strzałowymi [m]	$\Delta x=10, \Delta z=0$
Ilość punktów strzałowych	20
Czas końcowy [s]	0,5
Krok próbkowania [s]	0,002

Wykres czasu obliczeń akustycznego równania falowego dla podziału 1PS-1PC i dekompozycji domenowej w zależności od ilości procesorów wchodzących w skład klastra komputerowego przedstawiono na rys. 3.3



Rys. 3.3. Zmiana czasu obliczeń dekompozycji domenowej i dekompozycji 1PS-1PC w zależności od ilości procesorów (Franczyk, 2004)

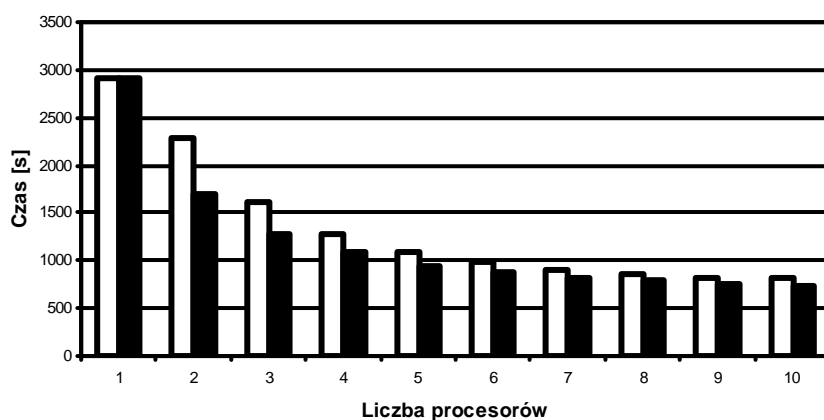
Fig. 3.3. Computational times of 1PS-1PC and domain decompositions for different number of processors (Franczyk, 2004)

Dla uwypuklenia różnic w całkowitym czasie obliczeń, powiększono część wykresu odpowiadającą zmianie czasu dla klastrów o największych rozmiarach, które brały udział w eksperymencie numerycznym. Dla obu dekompozycji, obserwuje się ciągły spadek czasu

obliczeń. W dekompozycji domenowej spadek czasu obliczeń ma ciągły, równomierny charakter, w dekompozycji 1PS-1PC krzywa czasu maleje w sposób schodkowy, a szybkość jej spadku jest obserwowalnie większa (Danek, Franczyk 2004; Franczyk, 2004).

Kolejnym składnikiem testowanym pod kontem zwiększenia efektywności obliczeń było zastosowanie różnych technik programowania równoległego: bibliotek PVM (Parallel Virtual Machine) oraz MPI (Message Passing Interface).

Na rysunku 3.4 przedstawiono porównanie czasów obliczeń realizacji równoległej przy wykorzystaniu obu bibliotek. Modelowania przeprowadzono dla przypadku akustycznego i dekompozycji domenowej dla ośrodka geologicznego, którego parametry zestawiono w tabeli 3.1.



Rys. 3.4. Relacja pomiędzy liczbą procesorów a czasem obliczeń w przypadku akustycznym i dekompozycji domenowej przy zastosowaniu PVM (białe słupki) i MPI (czarne słupki) (Danek, Franczyk 2004)

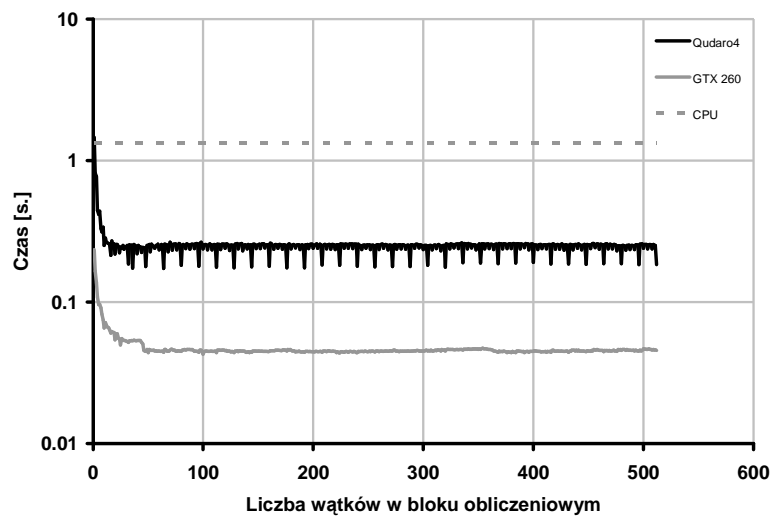
Fig. 3.4. Relation between number of processors and computational times in case of acoustic modeling using PVM (white bars) and MPI (black bars) (Danek, Franczyk 2004)

Analiza czasów obliczeń przedstawiona na powyższym wykresie pozwala wysnuć wniosek, że dla modelowania pola falowego, realizowanego w klastrach komputerów osobistych bardziej efektywne jest wykorzystanie biblioteki MPI (Danek, Franczyk 2004).

Dotychczas najczęściej stosowanym sposobem ograniczenia czasochłonności obliczeń było stosowanie obliczeń równoległych i rozproszonych. Ostatnio pojawiła się jednak atrakcyjna alternatywa w postaci obliczeń z wykorzystaniem kart graficznych (GPU) (Danek 2009). Obliczenia takie początkowo bazowały na wykorzystaniu technologii grafiki komputerowej takich jak OpenGL i DirectX. Z czasem pojawiły się jednak dedykowane obliczeniom wysokiej wydajności technologie takie jak Nvidia CUDA. Uczyniło to oprogramowywanie tego rodzaju zagadnień znacznie prostszym i efektywniejszym. Jednocześnie ogromny wzrost wymagań sprzętowych dla gier i innych aplikacji multimedialnych spowodował dynamiczny przyrost wydajności hardware'u kart graficznych. Średniej klasy karta graficzna kosztująca około 100 \$ wyposażona jest obecnie w 200 i więcej rdzeni, co w porównaniu z 6 rdzeniami najnowocześniejszych i niezwykle drogich CPU jest prawdziwą przepaścią technologiczną.

Oczywiście technologia ta ma też swoje ograniczenia. W przypadku modelowań pola falowego jest nim przede wszystkim ilość pamięci (maksymalnie kilka GB). Na rysunku 3.5 przedstawiono porównanie czasów obliczeń pojedynczego rdzenia nowoczesnego procesora Intel Core2 oraz karty graficznej Quadro4 1600M (wersja mobilna) i wydajnej karty Nvidia GTX 260. Periodyczny charakter przyspieszeń dla karty Quadro4 jest typowy dla starszych kart graficznych wyposażonych w mniejszą liczbę multiprocessorów.

W chwili obecnej wydaje się, że obliczenia z wykorzystaniem wielu kart graficznych (multiGPU) i heterogenicznych platform złożonych z wielu CPU i GPU stanowią przyszłość wydajnego modelowania pełnego pola falowego w złożonych ośrodkach geologicznych.



Rys. 3.5. Czas obliczeń pojedynczego modelu z wykorzystaniem różnych platform obliczeniowych
Fig. 3.5. Single model computational times for different hardware platforms.

4. Zakończenie

Przedstawione powyżej przykłady prowadzą w sposób oczywisty do kilku wniosków istotnych z punktu widzenia zastosowań praktycznych.

- Dalszy rozwój masowych obliczeń w sejsmice i sejsmologii górniczej i inżynierskiej nie jest możliwy, gdy obliczenia te będą prowadzone na komputerach pracujących w sposób sekwencyjny – jedynym wyjściem jest użycie na szerszą skalę obliczeń równoległych.

- Z uwagi na koszty jedyną realną realizacją praktyczną tego typu obliczeń jest wykorzystanie obliczeń rozproszonych w heterogenicznej sieci wieloprocessorowych komputerów połączonych siecią o wysokiej przepustowości.

- W wypadku szczególnie intensywnych modelowań (np. na potrzeby inwersji pełnego pola falowego) obliczenia należy prowadzić z wykorzystaniem technologii GPGPU (obliczenia wykonywane z użyciem procesorów kart graficznych).

Warto jeszcze raz podkreślić, że nowoczesne rozwiązania hardwareowe z upływem czasu stają się bardzo atrakcyjne z uwagi na szybko malejące koszty zakupu odpowiedniego sprzętu i jedynym problemem, jaki należy rozwiązać jest odpowiednie oprogramowanie, pozwalające realizować omawiane powyżej zadania.

Obliczenia równoległe realizowane zarówno na pojedynczym, wieloprocessorowym (wielordzeniowym) komputerze jak i na klastrze komputerów jeszcze niedawno były w sferze zainteresowania specjalistów z wybranych dziedzin, głównie o profilu akademickim lub naukowym. W chwili obecnej lawinowy wzrost zapotrzebowania na prowadzenie obliczeń w czasie rzeczywistym w wielu gałęziach gospodarki i przemysłu, w tym przemysłu surowcowego i wydobywczego, wymusza szersze zainteresowanie technologią obliczeń równoległych prowadzonych w środowiskach heterogenicznych i wdrażaniem tych rozwiązań do codziennej praktyki przemysłowej.

Literatura

- [1] Danek T., 2004: Numeryczne modelowanie sejsmicznego pola falowego z wykorzystaniem obliczeń równoległych, mat. konf. Konferencja Naukowo – Techniczna GEOPETROL, Zakopane, 215-220.
- [2] Danek T., 2005: Modelowania sejsmicznego pola falowego w ośrodkach anizotropowych z wykorzystaniem obliczeń równoległych, KK KOWBAN, Wydawnictwo WTN, 87-92.
- [3] Danek T., 2009: Seismic wave field modeling with graphics processing units, Lecture Notes in Computer Science., 5545.
- [4] Danek T., Franczyk A., 2004: Modelowania numeryczne sejsmicznego pola falowego z wykorzystaniem klastrów PC, XI KK KOWBAN, Wydawnictwo WTN, 199–204.
- [5] Danek T., Franczyk A., 2004: Parallel and distributed seismic wave field modelling, Task Quarterly 8, 4, 573-581.
- [6] Franczyk A., 2004: Analiza wydajności klastrów PVM w modelowaniu pola falowego., mat. konf. Konferencja Naukowo – Techniczna GEOPETROL Zakopane, 299-303.
- [7] Levander A, 1988: Fourth-order finite-difference P-SV seismograms, Geophysics, 53-11, 1425-1436
- [8] Pięta, A. 2007: Zastosowanie obliczeń w środowisku rozproszonym w wybranych zagadnieniach Nauk o Ziemi, AGH, Kraków (praca doktorska)
- [9] Virieux J. 1986: P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method. Geophysics, 51–4, 889-901.

Progress of seismic wave field numerical modeling.

Key words

Numerical modeling of wave field, parallel computing, 3D modeling, anisotropy.

Abstract

In this paper recent progress in full wave form seismic modeling was presented. The main stress was put on using this technique in exploration seismic, mine seismic and seismology. The most important reasons of this progress were dynamic development of numerical algorithm and computer methods. Possibility of using parallel, distributed and heterogeneous computational environment was critical. Increased computational power and development of computer hardware were additional factors. All of this allowed modeling for real anisotropic 3D media in acceptable times.