

Maciej DWORNIK, Anna PIĘTA

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska

## **Analiza wybranych metod przyspieszenia obliczeń komputerowych na przykładzie stochastycznej inwersji sejsmicznej**

### **Słowa kluczowe**

Tomografia sejsmiczna, inwersja stochastyczna, obliczenia równoległe, CUDA, MPI

### **Streszczenie**

Stochastyczna inwersja sejsmiczna jest procesem czasochłonnym obliczeniowo. Długi czas realizacji obliczeń spowodowany jest koniecznością przetestowania dużej ilości losowych modeli rozkładów prędkości w ośrodku geologicznym. Dodatkowym czynnikiem wydłużającym czas obliczeń jest konieczność modelowania propagacji fali sejsmicznej wykonywana dla każdego punktu strzałowego, która jest niezbędna do oceny stopnia dopasowania testowanego modelu. Skrócenie czasu obliczeń można uzyskać między innymi poprzez zastosowanie technik obliczeń rozproszonych.

W niniejszej pracy porównana zostanie efektywność wybranych metod przyspieszenia obliczeń zastosowanych do inwersji danych międzyotworowej tomografii sejsmicznej czasów pierwszych wstąpień. Przyspieszenie obliczeń uzyskano poprzez użycie kart graficznych oraz wykorzystując równoległe środowisko obliczeniowe.

### **1. Wstęp**

Inwersja danych sejsmicznych jest stosowaną powszechnie metodą pozwalającą na odtworzenie rozkładu prędkości propagacji fali sejsmicznej na podstawie obserwacji zarejestrowanej np. w postaci czasów pierwszych wstąpień fali sejsmicznej. Procedura odtworzenia rozkładu prędkości znajduje szerokie zastosowanie, między innymi w poszukiwaniach złóż węglowodorów, dostarczając dodatkowych informacji o zmianach parametrów fizycznych w ośrodku geologicznym. Użycie klasycznych metod inwersji danych, takich jak metody macierzowe czy gradientowe, w wielu przypadkach nie gwarantuje uzyskania poprawnego rozwiązania, szczególnie jeżeli obliczenia przeprowadzane są dla ośrodka o cechach anizotropowych.

Metodami, które pozwalają oszacować rozkład wartości parametrów sprężystych w ośrodku geologicznym, w którym występuje kierunkowa zmiana parametrów fizycznych, są metody inwersji stochastycznej. Zastosowanie tych metod ograniczone jest ich czasochłonnością wynikającą z konieczności wielokrotnego powtarzania, nierzadko skompli-

kowanych i długotrwałych obliczeń. Skrócenie czasu obliczeń inwersji stochastycznej można uzyskać wykorzystując obliczeniowe środowisko równoległe czy procesory kart graficznych.

## 2. Sejsmiczna tomografia międzyotworowa

Tomografia sejsmiczna jest narzędziem, dzięki któremu możliwa jest rekonstrukcja rozkładu wartości parametrów sprężystych w prześwietlanym ośrodku geologicznym. Odróżnia ją od innych metod przede wszystkim znacznie większa gęstość pokrycia promieniami ośrodka oraz schemat akwizycji. Tomografia sejsmiczna realizowana jest najczęściej w jednym z dwóch wariantów: prześwietleń międzyotworowych oraz prześwietleń nadkładu (tomografia refrakcyjna). W pierwszym wariantcie w jednym otworze wzbudzana jest fala sejsmiczna, która jest rejestrowana odbiornikami umieszczonymi w drugim otworze. W przypadku tomografii refrakcyjnej odbiorniki i punkty wzbudzenia znajdują się na powierzchni prześwietlanego terenu.

Tomografia sejsmiczna jest ściśle związana z rozwiązaniem dwóch zagadnień:

- zagadnienia prostego, w którym na podstawie rozkładu wartości parametrów sprężystych i schematu akwizycji estymowane są czasy propagacji fali sejsmicznej pomiędzy źródłem fali a punktem jej rejestracji;
- zagadnienia odwrotnego, gdzie na podstawie pomierzonych czasów i schematu akwizycji, odtwarzany jest rozkład wartości parametrów sprężystych w ośrodku geologicznym.

W celu rozwiązania obu zagadnień założono, że prześwietlany jest ośrodek wykazujący anizotropię typu VTI (ang. *Vertical Transverse Isotropy*). W takim ośrodku propagacja podłużnej fali sejsmicznej dana jest wzorem (Thomsen 1986):

$$v_p(\theta) \approx v_{p0}(1 + \delta \sin^2(\theta) \cos^2(\theta) + \varepsilon \sin^4(\theta)) \quad (2.1)$$

gdzie:

$\theta$  - kąt pomiędzy kierunkiem propagacji fali, a kierunkiem pionowym;

$v_{p0}$  - prędkości propagacji fali podłużnej w kierunku pionowym;

$\varepsilon, \delta$  - parametry Thomsena.

### 2.1. Rozwiązanie zagadnienia prostego

Zagadnienie proste zostało rozwiązane przy użyciu dwóch metod. W obu przypadkach ośrodek geologiczny został podzielony na jednorodne komórki, wewnątrz których założono niezmienną wartość parametrów sprężystych.

Pierwsza metoda zakładała prostoliniowość promienia sejsmicznego pomiędzy punktem wzbudzenia i punktem rejestracji. W metodzie tej czas propagacji obliczany był według następującego wzoru:

$$t_i = G_{ij} / (v_j (1 + \delta_j (1 - s_i) s_i + \varepsilon_j s_i^2)) \quad (2.2)$$

gdzie:

$t_i$  - czas propagacji  $i$ -tego promienia;

$G_{ij}$  - długość  $i$ -tego promienia w  $j$ -tej komórce;

$s_i = \sin^2(\theta_i)$ , gdzie  $\theta_i$  - kąt propagacji  $i$ -tego promienia;

$v_j, \delta_j, \varepsilon_j$  - wartości parametrów Thomsena w  $j$ -tej komórce.

Główną wadą tej metody jest brak odzwierciedlenia rzeczywistej trajektorii promienia sejsmicznego w rozważanym ośrodku. Jej główną zaletą jest krótki oraz niezależny od rozkładu wartości parametrów sprężystych ośrodku geologicznego, czas obliczeniowy. Metoda ta, skuteczna w ośrodkach o niewielkiej zmienności prędkości, znalazła zastosowanie zarówno w inwersji danych dla ośrodków izotropowych (np. Dwornik, Leśniak 2007), jak i uproszczonych modeli anizotropowych (np. Stewart 1988).

W celu określenia rzeczywistych trajektorii promienia zastosowano metodę najkrótszej ścieżki (SPM - *The Shortest Path Method*). Metoda ta została po raz pierwszy opisana w pracy T.J. Mosera (1991), a następnie stopniowo rozwijana (m.in. Fisher, Lees 1993, Dwornik, Pięta, 2009). Założeniem tej metody jest przedstawienie promienia sejsmicznego jako ścieżki w grafie, gdzie wagą krawędzi pomiędzy dwoma węzłami jest czas propagacji pomiędzy tymi węzłami. Węzły są rozmieszczone równomiernie na krawędziach każdej komórki, na jakie podzielono ośrodek geologiczny. Ilość punktów pomocniczych umieszczonych na każdej krawędzi komórki definiuje wartość parametru NPE (*Node Per Edge*). Wraz ze wzrostem wartości tego parametru maleje błąd pomiędzy rzeczywistym czasem propagacji a czasem estymowanym, rośnie natomiast czas obliczeniowy całej procedury trasowania promienia sejsmicznego. Szczegółową dyskusję na temat wpływu wartości parametru NPE można znaleźć np. w pracy Dwornik i Pięta (2012).

Podstawową zaletą metody SPM jest możliwość odtworzenia rzeczywistych trajektorii promieni sejsmicznych w ośrodku geologicznym wraz z analizą pokrycia danej komórki promieniami. Do istotnych wad należy zaliczyć długi czas obliczeniowy, który dodatkowo zależy od rozkładu wartości parametrów sprężystych w ośrodku oraz lokalizacji punktu wzbudzenia. Powoduje to zmniejszenie efektywności metod zrównoleglenia (problem synchronizacji wątków).

## 2.2. Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego

Inwersja sejsmiczna, na podstawie pomierzonych danych, najczęściej odbywa się na jeden z trzech sposobów (Kasina 2001):

- rzutowania wstecz;
- iteracyjnie;
- inwersji macierzowej.

W niniejszej pracy inwersję danych sejsmicznych przeprowadzono w oparciu o algorytmy genetyczne (np. Michalewicz 2003). Jest to metoda stochastyczna, która naśladuje procesy ewolucyjne zachodzące w naturalnym środowisku. Główna pętla algorytmu ma następujący przebieg:

```
generuj (Populacja);  
while iter < max_iter  
    mutacja (Populacja);  
    krzyżowanie (Populacja);
```

```
filtracja_medianowa (Populacja);  
estymacja_czasów (Populacja);  
ocena (t_estymowane, t_rzeczywiste);  
ranking (Populacja);  
ewolucja (Populacja);  
iter=iter+1;  
end
```

W powyższym schemacie populacja złożona jest z kilkudziesięciu osobników, z których każdy przechowuje rozkład wartości parametrów sprężystych w ośrodku oraz ocenę dopasowania, wyestymowanych na ich podstawie przechowanych rozkładów wartości parametrów sprężystych, czasów pierwszego wstąpienia fali podłużnej do czasów rzeczywistych. Ocena dopasowania odbywa się na podstawie normy L1:

$$ocena(t^{est}, t^{rzecz.}) = \frac{1}{ilosc\ promieni} \sum_{i=1}^{ilosc\ promieni} |t_i^{est} - t_i^{rzecz.}| \quad (2.3)$$

Mutacja jest procesem losowej zmiany wartości parametrów sprężystych z założonym prawdopodobieństwem zmiany danej wartości  $P_{mut}$ . Dla każdej wartości generowana jest liczba pseudolosowa z rozkładu równomiernego  $R(0,1)$  i jeżeli wygenerowana wartość jest mniejsza niż  $P_{mut}$ , następuje zmiana wartości zgodnie z rozkładem normalnym. Krzyżowanie polega na policzeniu średniej ważonej losowo wybranych dwóch osobników z populacji. Osobniki, które są krzyżowane, wybierane są z prawdopodobieństwem  $P_{cross}$ . Filtracja medianowa nie jest typowym operatorem genetycznym i związana jest ze specyfiką danych tomograficznych. W przeciwieństwie do filtrów uśredniających, nie powoduje ona rozmycia krawędzi, a tylko eliminację pojedynczych wartości ekstremalnych. Wadą jej jest znacznie dłuższy czas obliczeniowy niż wspomnianej filtracji uśredniającej. Filtracji poddane są losowe osobniki, dla których wygenerowana wartość jest mniejsza od założonej wartości  $P_{median}$ .

Funkcja Ranking ma na celu zapamiętywanie kilku najlepszych osobników, którzy pojawiły się w trakcie obliczeń. Jest to związane z faktem, że pomimo tego, że najlepsze osobniki mają największą szansę przetrwania, nie zawsze udaje się im przejść do kolejnej populacji. Nowa populacja tworzona jest w procedurze Ewolucja na podstawie poprzedniej. Ewolucja odbywa się w formie turnieju: każdy osobnik w nowej populacji powstaje jako zwycięzca (osobnik o najmniejszej wartości funkcji oceny) z losowo wybranych osobników starej populacji. "Turniej" trwa dopóki nie zostaną wybrane wszystkie osobniki w nowej populacji.

### 3. Metody akceleracji obliczeń

Inwersja stochastyczna jest procesem długotrwałym obliczeniowo. Jest to związane z faktem, że wymagane jest przetestowanie dużej liczby rozwiązań. Jedną z metod skrócenia czasu obliczeniowego jest wykorzystanie obliczeń równoległych. W niniejszej pracy przedstawione zostaną dwie alternatywne metody zrównoleglenia obliczeń. Pierwsza metoda wykorzystuje wielordzeniowe procesory i protokół przesyłu MPI (*Message Passing Interface*). Druga metoda wykorzystuje potencjał obliczeniowy karty graficznej. W obu technikach

zrównolegleniu poddano tylko procedurę rozwiązania zagadnienia prostego. Zrównoleglenie może zostać przeprowadzone na kilka sposobów w zależności od faktu, która część procedury jest rozsyłana do poszczególnych rdzeni. Najbardziej intuicyjnym jest podział obliczeń według osobników (każdy rdzeń estymuje czasy dla pojedynczego modelu). Innymi możliwościami jest podział według punktu wzbudzenia (każdy rdzeń estymuje czasy pojedynczego wzbudzenia) lub podział samej procedury trasowania promienia sejsmicznego dla pojedynczego punktu wzbudzenia fali sejsmicznej (np. Pięta, Dwornik 2012, Szostek, Leśniak 2012).

### **3.1 Message Passing Interface**

*Message Passing Interface* (MPI) jest standardem przesyłania komunikatów w rzeczywistych i wirtualnych maszynach równoległych z pamięcią lokalną (Gropp i in., 1994). Standard MPI implementowany jest w postaci bibliotek procedur i funkcji, wywoływanych bezpośrednio w kodzie programu. Do zrównoleglenia algorytmów optymalizacyjnych użyto implementacji MPICH2, umożliwiającej wysyłanie i odbieranie komunikatów oraz synchronizację zadań wykonujących ten sam kod. Obliczenia realizowane były na maszynie wieloprocesorowej IBM Blade, udostępniającej osiem niezależnych procesorów na jednym nodzie obliczeniowej.

### **3.2 Obliczenia z użyciem procesorów kart graficznych**

Współczesne karty graficzne (GPU) są wielordzeniowymi jednostkami posiadającymi własną pamięć operacyjną. Zaprojektowana przez Nvidia architektura CUDA (ang. *Compute Unified Device Architecture* – Nvidia 2011) pozwala na łatwe przystosowanie kodu napisanego w języku ANSI C (Kernighan, Ritchie, 2007) do obliczeń na wyprodukowanych przez nią kartach graficznych. Zadania obliczeniowe są rozdzielane na bloki, wewnątrz których uruchamiane są wątki (każdy blok jest przynajmniej jednowątkowy). Maksymalna ilość wątków w bloku oraz ilość bloków zależy od modelu tzw. pojemności obliczeniowej karty graficznej (CC - *compute capability*).

W czasie wykonywania obliczeń równoległych dane przesyłane są do pamięci GPU. Istnieje kilka rodzajów dostępnej pamięci GPU, których zastosowanie pozwala przyspieszyć wykonywanie programów. Należą do nich m.in. pamięć dzielona (pamięć wewnątrz każdego bloku dostępna tylko dla wątków danego bloku) oraz pamięć stała (tylko do odczytu). Wadą tych rozwiązań jest mała ilość dostępnej pamięci, wynosząca dla pamięci dzielonej 16 kB (dla CC  $\leq$  1,3) i 64 kb (CC  $\geq$  2,0) oraz 64 kb dla pamięci stałej (Nvidia 2011).

## **4. Modele i wyniki**

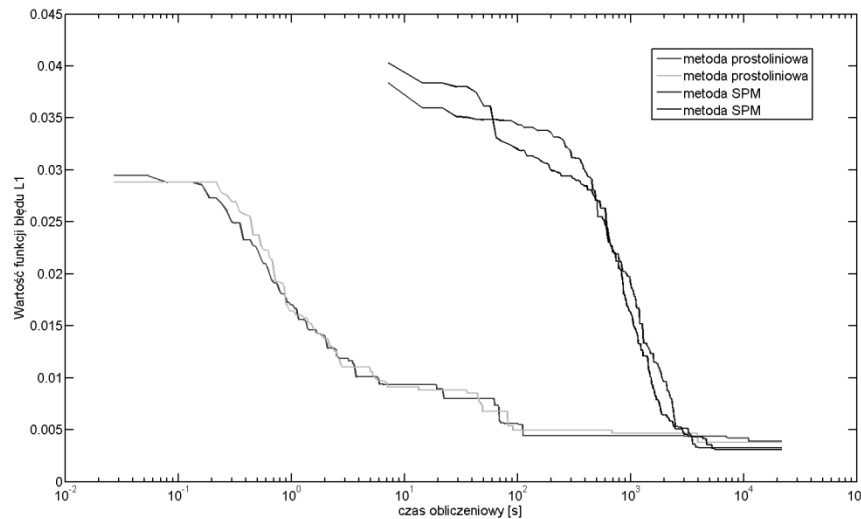
Algorytmy zostały przetestowane przy użyciu dwóch jednostek obliczeniowych. Pierwszą był dedykowany do obliczeń IBM Blade wyposażony w 8-rdzeniowy procesor o taktowaniu 2,0 GHz, 16 GB pamięci RAM oraz kartą nvidia Quadro FX 1600M dostępny w Katedrze Geoinformatyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Drugą jednostką był średniej klasy netbook wyposażony w dwurdzeniowy procesor Intel Atom 330 o taktowaniu 1,66 GHz, 3 GB RAM i kartę graficzną nvidia ION.

Obliczenia przeprowadzono dla modeli o wymiarach 150 x 100 m zbudowanego ze 150 komórek o wymiarach 10x10m, z których każda przechowywała wartości trzech z pięciu parametrów Thomsena ( $v_{p0}$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ). Schemat akwizycji składał się z 31 równomiernie rozmieszczonych wzdłuż lewej krawędzi obszaru punktów wzbudzenia i 76 punktów rejestracji umieszczonych wzdłuż prawej krawędzi prześwietlanego obszaru. Dzięki takiemu schematowi akwizycji danych uzyskano 2356 zapisów czasów pierwszego wstąpienia, koniecznych do odtworzenia wartości 450 parametrów sprężystych prześwietlanego ośrodka.

Testowany był model zbudowany z trzech poziomo zalegających warstw, każda o miąższości 50 m i wartościach  $v_{p0}$  przyjmujących kolejno wartości (od góry modelu): 500, 1500 i 2500 m/s. Założono, że środkowa warstwa wykazywała właściwości anizotropowe ( $\delta = 1,75$  oraz  $\epsilon = 1,95$ ). Teoretyczne czasy pierwszych wstąpień zostały obliczone przy użyciu metody SPM dla wartości parametru NPE = 50.

W celu dokonania inwersji z użyciem algorytmów genetycznych wygenerowano losowo populację liczącą 32 osobniki. Założono następujące wartości parametrów genetycznych:  $P_{mut} = 0,1$ ,  $P_{cross} = 0,7$  i  $P_{median} = 0,15$ . Liczebność grupy turniejowej liczyła 4 osobniki. Do estymacji czasów w przypadku inwersji z użyciem metody SPM użyto wartości parametru NPE = 4. Ilość iteracji zależała od wybranej metody rozwiązania zagadnienia prostego i dla metody prostoliniowej liczyła 800 tysięcy, a dla metody SPM 3 tysiące. Ilość iteracji została tak dobrana, aby czas obliczeniowy procesu inwersji nie przekraczał 6 godzin.

Na rys. 4.1 przedstawiono wykresy błęd najlepszych znalezionych osobników w funkcji czasu obliczeniowego dla dwóch najlepszych wyników uzyskanych dla każdej metody. Metoda prostoliniowa pozwoliła w krótkim czasie uzyskać niski błąd estymacji. Dopiero po ok. jednej godzinie obliczeń metodą SPM uzyskano rozwiązania o niższej wartości błędu.



**Rys. 4.1.** Spadek wartości funkcji błęd dla uzyskanych dwóch najlepszych rozwiązań dla każdej z metod trasowania promienia sejsmicznego

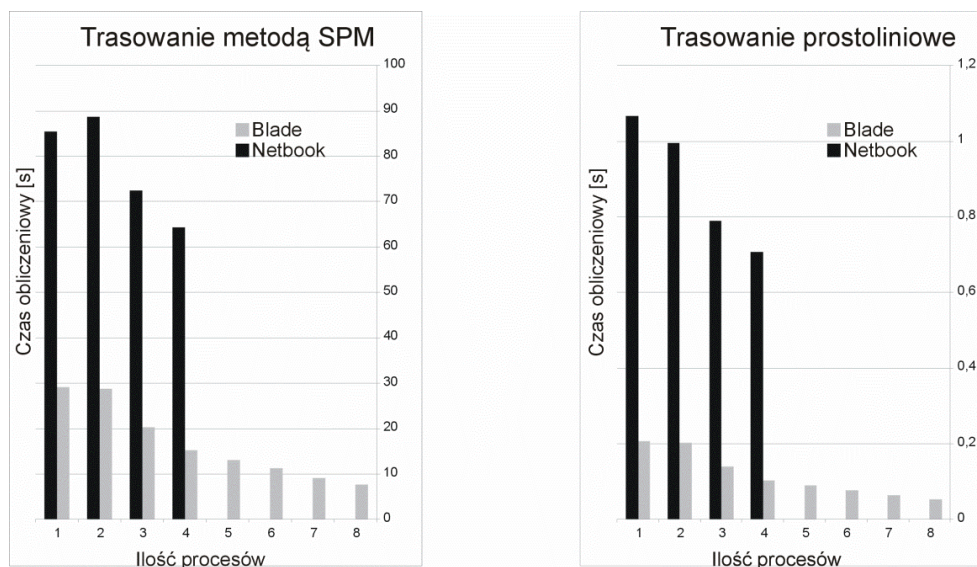
**Fig 4.1.** Decreasing error function with calculation time for two of the best solutions for each ray tracing method

#### 4.1. Analiza efektywności technik przyspieszenia obliczeń

Analizę efektywności metod przyspieszenia obliczeń algorytmu inwersji danych sejsmicznych przeprowadzono w oparciu o czasy pomierzone dla zmiennej ilości bloków i procesów biorących udział w obliczeniach.

Ze względu na specyfikę obliczeń na karcie graficznej zastosowano dwie różne metody zrównoleglenia. Dla metody SPM każdy blok karty obliczał czasy propagacji od pojedynczego wzbudzenia. Dla metody prostoliniowej zrównoleglano według numeru promienia sejsmicznego. Dla metody liniowej testowane były takie kombinacje ilości wątków i bloków, by ich iloczyn równy był najmniejszej potędze liczby 2, która zawiera ilość zrównolegnień (odpowiednio 32 wobec 31 punktów wzbudzenia dla SPM oraz 4096 wobec 2356 promieni dla metody prostoliniowej). Maksymalna ilość wątków w bloku zależy od karty graficznej i wynosi 512, gdy pojemność obliczeniowa CC  $\leq$  1.3 i 1024 dla kart o pojemności obliczeniowej CC  $\geq$  2.0.

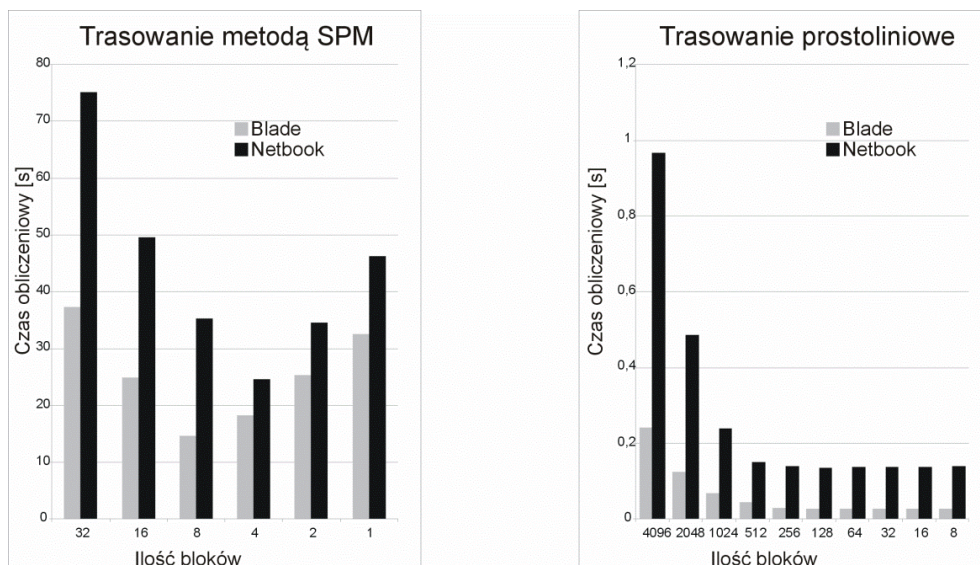
Na rys. 4.2 przedstawiono średni czas obliczeniowy jednego pokolenia (iteracji) uzyskany z wykorzystaniem standardu MPI dla prostoliniowej i krzywoliniowej propagacji promienia. Czas obliczeń algorytmu inwersji implementowanego przez maszynę wieloprocesorową maleje monotonicznie dla obu metod trasowania wraz ze zwiększeniem ilości wykorzystywanych procesów obliczeniowych. Trasowanie metodą SPM realizowane w drugim z porównywanych środowisk obliczeniowych nie wykazuje takiej tendencji dla dwóch procesów obliczeniowych.



**Rys. 4.2.** Zależność pomiędzy czasem obliczeniowym, a liczbą użytych procesów dla pojedynczej iteracji algorytmu inwersji przy użyciu standardu MPI dla trasowania metodą SPM i prostoliniowej propagacji promienia sejsmicznego.

**Fig 4.2.** Relationship between mean calculation time and number of processes for single loop of the inversion using MPI for short time method and straight line ray tracing.

Na rys. 4.3 przedstawiono średnie czasy obliczeniowe jednego pokolenia dla prostoliniowej i krzywoliniowej trajektorii promienia pomierzone dla obliczeń realizowanych z wykorzystaniem karty graficznej. W przypadku prostoliniowej trajektorii promienia sejsmicznego, czas obliczeń generalnie maleł wraz ze wzrostem ilości wątków w każdym z bloków. W przypadku trasowania metodą SPM z wykorzystaniem karty graficznej dla metody nie istnieje prosta zależność pomiędzy ilością bloków / wątków a czasem obliczeniowym. Najkrótsze czasy



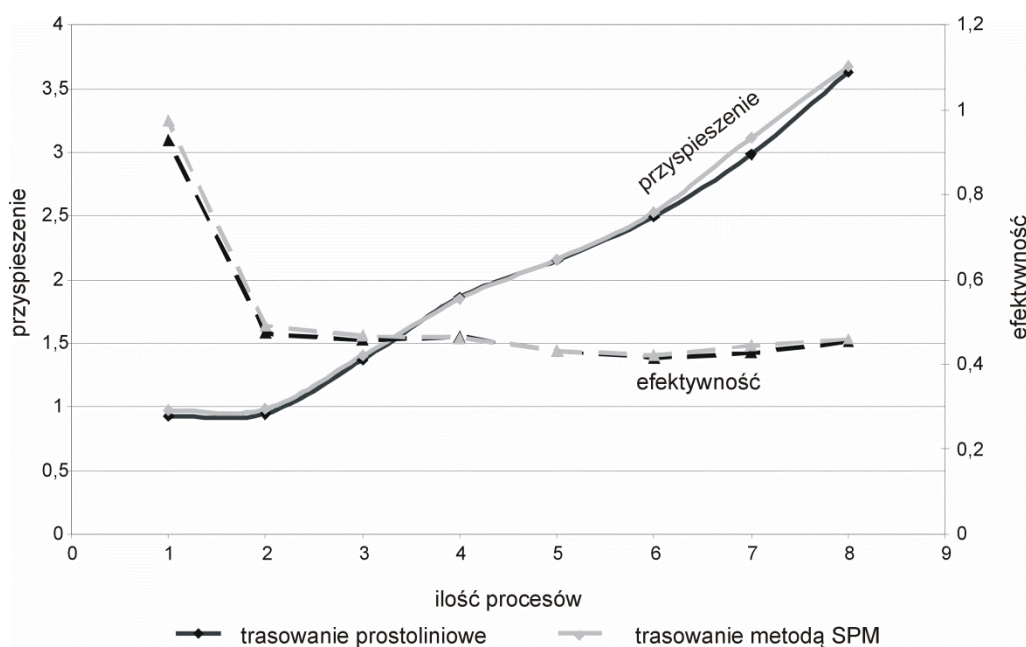
zaobserwowano dla 8 bloków (IBM Blade) i 4 bloków (Netbook).

**Rys.4.3.** Zależność pomiędzy czasem obliczeniowym a liczbą użytych bloków dla pojedynczej iteracji algorytmu inwersji przy użyciu CUDA dla trasowania metodą SPM i prostoliniowej propagacji promienia sejsmicznego.

**Fig 4.3.** Relationship between mean calculation time and number of blocks for single loop of the inversion using CUDA for short time method and straight line ray tracing.

Na rys. 4.4 przedstawiono wykresy przyspieszenia i efektywności obliczeń uzyskanych przy wykorzystaniu standardu MPI, realizowanych na maszynie wieloprocesorowej IBM Blade dla obu testowanych metod trasowania promienia sejsmicznego. Duży spadek przyspieszenia i efektywności obliczeń obserwowany pomiędzy obliczeniami realizowanymi przez jeden i dwa procesy związany jest z wpływem komunikacji i koniecznością synchronizacji obliczeń. Rozbudowa środowiska obliczeniowego do ośmiu procesów, realizowana poprzez zwiększenie ilości procesów, powoduje ciągły wzrost przyspieszenia obliczeń i utrzymanie efektywności na poziomie 50%. Tak niska efektywność użycia obliczeń wieloprocesorowych związana jest z koniecznością wykonywania dużej ilości operacji przez proces (jednostkę) główną oraz koniecznością synchronizacji danych przed wykonaniem kolejnej procedury.





**Rys. 4.4.** Zależność pomiędzy przyspieszeniem i efektywnością obliczeń a liczbą użytych procesów dla pojedynczej iteracji algorytmu inwersji przy użyciu standardu MPI dla trasowania metodą SPM i prostoliniowej propagacji promienia sejsmicznego

**Fig. 4.4.** Relationships between speedup and efficiency versus number of processes for single loop of the inversion using MPI for short time method and straight line ray tracing

## 5. Dyskusja i wnioski

W tabeli tab. 5.1 zestawiono średni czasy obliczeń pojedynczej iteracji algorytmu inwersji danych sejsmicznych pomierzone dla najbardziej optymalnych realizacji kodu: z wykorzystaniem procesora kart graficznych (GPU), standardu MPI oraz bez zastosowania żadnej z powyższych technik przyspieszenia obliczeń (CPU).

**Tabela 5.1.** Najkrótsze czasy obliczeniowej [s] pojedynczej iteracji uzyskane różnymi metodami w ich najbardziej optymalnej konfiguracji (CPU - czas wykonywania procedury niezrównoległej).

**Table 5.1.** The shortest calculation time [s] per single iteration for different parallelize method in the most optimal configuration (CPU – time without parallize)

	SPM		Prostoliniowe	
	Blade	Netbook	Blade	Netbook
CPU	28,3	141,7	0,191	1,003
GPU	14,6	24,6	0,027	0,135
MPI	7,7	64,4	0,053	0,706

Przedstawione metody trasowania promienia sejsmicznego charakteryzowały się różnymi właściwościami oraz czasami wykonywania obliczeń. Średni czas obliczeniowy pojedynczej iteracji dla metody SPM był średnio 140 razy dłuższy niż w metodzie prostoliniowej. Zastosowanie metod zrównoleglenia spowodowało wzrost dysproporcji do wartości 285.

Analiza uzyskanych wyników pozwala sformułować wniosek, że w przypadku słabych jednostek obliczeniowych lub procedur, gdzie wszystkie procesy wykonywane są w tym samym czasie, optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie procesorów karty graficznej. Możliwe to jest tylko w przypadku, gdy problem obliczeniowy możliwy jest do rozbicia na krótkotrwałe procesy obliczeniowe. W przypadku zadań, gdzie przeważają długotrwałe procesy obliczeniowe, zasadnym wydaje się użycie standardu MPI i maszyn wieloprocessorowych.

*Praca ta została sfinansowana z badań statutowych Katedry Geoinformatyki i Informatyki Stosowanej Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska oraz z grantu nr N N525 256040 Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego*

- [1] Dwornik, M., Leśniak, A. 2007: Comparison between Inversion Algorithms of Surface Refraction Tomography for Cavities Detection, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul, P22
- [2] Dwornik, M., Pieta, A. 2009: Efficient Algorithm for 3D Ray Tracing in 3D Anisotropic Medium 71st EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2009, Extended Abstracts
- [3] Fischer R., Lees J. L., 1993: Shortest path ray tracing with sparse graph, Geophysics, 58, 987-996
- [4] Gropp W., Lusk E, Skjellum A. 1994: Using MPI: Portable Parallel Programming with the Message-Passing Interface, MIT Press, Cambridge, MA.
- [5] Kasina, Z., 2001: Tomografia Sejsmiczna, Wydawnictwo Instytutu GSMiE PAN, Kraków
- [6] Kernighan, B.W., Ritchie, D.M., 2007: Język ANSI C, wyd. X, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa
- [7] Michalewicz, Z. 2003: Algorytmy Genetyczne + Struktury Danych = Programy Ewolucyjne, WNT, wydanie 3, Warszawa
- [8] Moser, T.J. 1991: Shortest path calculation of seismic rays. Geophysics. 56, 59-67
- [9] Nvidia, 2011: CUDA C Programming Guide Version 4.0, www.nvidia.com
- [10] Pięta, A., Dwornik, M., 2012: Parallel implementation of ray tracing procedure in anisotropic medium, TASK Quarterly (in press)
- [11] Stewart, R.R., 1988: An Algebraic Reconstruction Technique for Weakly Anisotropic Velocity, Geophysics, 53, 1613-1615
- [12] Szostek, K., Leśniak, A. 2012: Parallelization of the Seismic Ray Trace Algorithm, [W:] Wyrzykowski et al. (Eds.): PPAM 2011, Part II, LNCS 7204, 411-418.
- [13] Thomsen, L., 1986: Weak elastic anisotropy. Geophysics, 51, 1954-1966

### **Selected method of decreasing calculation time of the stochastic inversion of seismic data**

#### Key words

Seismic tomography, stochastic inversion, parallel computing, CUDA, MPI

#### Summary

Stochastic inversion of seismic data is a very time-consuming process. It is caused by huge number of iteration, which is necessary to obtain distribution of elastic parameters in real,

geological medium. The most time consuming part of stochastic inversion is usually process of travel time estimation, which has to be calculated for each assumed shot point. One of the method, which allows to decrease calculation time of stochastic inversion of seismic data is utilization of parallel computational environment or calculation using processors of graphical card unit.

*Przekazano: 5 kwietnia 2012 r.*