



Kraków, 23.06.2018

Prof. dr hab. inż. Andrzej Leśniak

Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra Kamila Waśkiewicza

wykonanej w Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie pod kierunkiem Prof. dra hab. Wojciecha Dębskiego

pt. „Zastosowanie techniki skal czasowych do modelowania i inwersji akustycznego pola falowego”

Zawartość dysertacji

Przedstawiona do recenzji dysertacja jest zwięzłym opracowaniem dość wąskiego tematycznego zagadnienia. Dysertacja zawiera 132 strony tekstu ujętego w pięć rozdziałów, dwa dodatki matematyczne i 55 pozycji literaturowych oraz dodatkowo spis oznaczeń użytych w rozprawie. Brak w doktoracie spisu ilustracji, co w wypadku prowadzenia w dużej mierze wizualnej oceny rezultatów prezentowanych modelowań jest pewnym minusem tego opracowania. Doktorant w dysertacji nie formułuje w sposób jasny tez pracy. We wstępie stwierdza jedynie, że motywacją i celem do podjęcia opisywanych badań było sprawdzenie czy w ślad za siatkami nieregularnymi, które umożliwiają zwiększenie efektywności metody różnic skończonych również siatki niestrukturalne (nieortogonalne) poprawiają efektywność tej metody w jeszcze większym stopniu.

Konstrukcja dysertacji jest w zasadzie poprawna i logiczna. We **wstępie** autor opisuje cel pracy oraz ideę udoskonalenia klasycznej metody różnic skończonych poprzez zastosowanie siatek nieortogonalnych i użyciem tzw. skal czasowych. Precyzuje oczekiwania jakie są stawiane przed takim uogólnieniem to znaczy efektywniejsze obliczenia w przypadku modeli ze skomplikowanymi warunkami brzegowymi. Niestety nie definiuje co rozumie pod pojęciem efektywności – czy chodzi o czas obliczeń czy raczej dokładność rezultatów modelowań dla podobnej ilości węzłów.

Wprowadzenie do teorii skal czasowych autor zaprezentował w rozdziale **pierwszym** pracy. Przedstawił tam podstawowe definicje i wzory wykorzystywane w dysertacji. Następnie wprowadził klasyczne pochodne Hilgera, ich własności i przykłady obliczeń konkretnych pochodnych. W ostatniej części tego rozdziału autor zawarł formuły do obliczania operatora Laplace'a na 1D dyskretnych skalach czasowych.

W **drugim** rozdziale doktorant koncentruje się na wprowadzenie wielopunktowych pochodnych na skalach czasowych oraz ich analizie dla wybranych wariantów aproksymacji pochodnej. Wprowadzone przez niego pochodne mogą być traktowane jako rozszerzenie klasycznych pochodnych Hilgera. Doktorant wykorzystuje te pochodne do zdefiniowania operatora Laplace'a dla różnych skal czasowych i różnych wariantów aproksymacji. W rozdziale znajduje się również porównanie wprowadzonych pochodnych z algorytmem Fornberga powszechnie stosowanym w metodzie FD.

W **trzecim** rozdziale doktorant przedstawia elastyczne równanie falowe przechodząc od układu równań fali sprężystej do akustycznego równania falowego. Następnie przedstawia symulacje 1D akustycznego pola falowego na wybranych skalach czasowych. Celem tych symulacji była analiza efektywności obliczeń pod kątem doboru skali czasowej do parametrów symulacji. Ostatnia część tego rozdziału zawiera symulację 2D akustycznego pola falowego techniką skal czasowych. Autor bazuje tutaj na najprostszych skalach czasowych będących iloczynem prostym jednowymiarowych, dyskretnych skal czasowych. Uzyskane w ten sposób wyniki są równoważne klasycznemu podejściu metody różnic skończonych i stanowią punkt odniesienia do głównej części pracy zaprezentowanej w rozdziale czwartym.

Czwarty rozdział dysertacji jest rozdziałem centralnym, zawierającym główne rezultaty uzyskane przez autora w ramach przeprowadzonych badań. Autor prezentuje w nim rozszerzenie metody FD na siatki dwuwymiarowe, niestrukturalne dla dwuwymiarowego równania akustycznego. Za jedno z istotnych osiągnięć doktorant uznaje przedstawiony tam algorytm aproksymacji pochodnych na siatkach niestrukturalnych. Algorytm ten zawiera m.in. procedurę znajdowania dla każdego punktu nieregularnej siatki k-najbliższych sąsiadów. Następnie autor dysertacji przedstawia w skrótowy sposób opis techniki Time Reversed Acoustics (TRA), która służy do lokalizacji wstrząsów sejsmicznych na podstawie pełnego zapisu pola falowego. Podkreśla również, że pozwala ona nie tylko na lokalizację, ale również na wyznaczenie parametrów źródła fali, co w wypadku równania akustycznego sprowadza się do odtworzenia funkcji generującej falę w źródle. Autorski algorytm aproksymacji pochodnych został przetestowany w symulacjach 2D akustycznego pola falowego i inwersji akustycznego pola falowego techniką TRA dla wybranych modeli prędkości.

W pierwszej kolejności autor przedstawia wyniki tych symulacji na klasycznej siatce FD. Należy zaznaczyć, że nowa metoda zaproponowana przez autora dla tej siatki różni się od metody klasycznej tylko innym sposobem wyszukiwania węzłów sąsiadujących z węzłem dla którego jest odbywa się aproksymacja pochodnych. Symulacje są realizowane dla modelu o prędkości stałej, modelu płasko równoległego prędkości oraz kołowego modelu prędkości. Model pierwszy i drugi są powszechnie używane w praktyce interpretacyjnej zaś model trzeci stosunkowo rzadko a sam autor nie przedstawia powodów jego wyboru. **Recenzent liczy na wyjaśnienie tego wyboru w trakcie obrony.** Uzyskane w ten sposób wyniki lokalizacji źródła

i funkcji źródła autor porównuje z ich odpowiednikami uzyskanymi klasyczną metodą FD. Jak należało się spodziewać wyniki obu podejść są bardzo zbliżone. Najlepsze zdaniem autora są w wypadku zastosowania do wyboru punktów sąsiednich procedury minimalizacyjnej z użyciem wag odwrotnie proporcjonalnych do czwartej potęgi wzajemnej odległości punktów.

W następnej kolejności autor prezentuje analogiczne symulacje na siatkach niestrukturalnych, które każdorazowo są dopasowywane do geometrii i parametrów modelu prędkości. Do obliczeń autor wybiera dwuwarstwowy model prędkości z granicą rozdziału o geometrii sinusoidalnej oraz model prędkości zmieniający się w postępie geometrycznym w kierunku osi X. W pierwszym wypadku symulacje wykonane zostały na siatce sinusoidalnej dopasowanej do modelu prędkości z sinusoidalną powierzchnią rozdziału. Autor konstruuje siatkę w ten sposób, że w sąsiedztwie sinusoidalnej granicy rozdziału dopasowuje się ona do jej przebiegu zaś oddalając się od niej stopniowo przechodzi w siatkę regularną. Niestety autor nie podaje formuły matematycznej tego przejścia, która była niezbędna do aproksymacji pochodnych. **Doktorant powinien w trakcie obrony opisać metody jakie stosował do generacji tej siatki.** Dla kolejnego modelu prędkości autor zdecydował się użyć dość skomplikowanego modelu prędkości. Jest on na brzegu lewym nieciągły i nieróżniczkowalny na prawym zaś w części centralnej zmienia się w postępie geometrycznym. Autor nie podaje przyczyn takiego wyboru modelu. **Recenzent liczy że kwestia ta zostanie wyjaśniona w trakcie obrony.** Siatka obliczeniowa jest podobnie jak poprzednio dostosowana do modelu prędkości tak, by spełnione były warunki stabilności schematu różnicowego. Rezultaty otrzymane dla obu modeli z wykorzystaniem algorytmu aproksymacji operatora Laplace'a metodą skal czasowych doktorant porównał z klasyczną metodą FD. Zarówno porównując sygnały w wybranych węzłach siatki (tj w odbiornikach) jak i ogniskowanie fali w metodzie TRA uzyskał bardzo zbliżone wyniki.

W następnej kolejności doktorant przedstawia symulację akustycznego pola falowego i inwersję akustycznego pola falowego dla stałego modelu prędkości ograniczonego sinusoidalnymi brzegami. I podobnie jak poprzednio pomija uzasadnienie takiego wyboru modelu (**recenzent prosi o uzasadnienie wyboru takiego modelu**). Dopasowanie klasycznej siatki do modelu przy tak zadanych granicach jest zdaniem doktoranta kłopotliwe, dlatego uzyskane wyniki lokalizacji i odtworzenia funkcji źródła uzyskane techniką TRA porównuje jedynie z oryginalną, zadaną na początku symulacji funkcją źródła.

Rozdział kończy się krótką dyskusją ilościowych wyników symulacji (przedstawionych jak **we wstępie** pisze autor w podrozdziale 5.3 i 5.4 - niestety takich rozdziałów w pracy nie ma). Wspominana analiza została przeprowadzona przez doktoranta pod kątem zbadania dokładności i efektywności uzyskiwanych wyników symulacji opracowanym przez niego algorytmem w odniesieniu do analogicznych rezultatów uzyskanych w sposób klasyczny metodą FD. Porównywane zostały wartości sygnałów w wybranych węzłach przy użyciu klasycznej metody FD oraz metody skal czasowych oraz zadana i odtworzona funkcja źródła.

Rozprawę kończy raptem niewiele ponad jednostronicowy rozdział, w którym autor de facto streszcza zawartość pracy (ponownie powołując się na nieistniejące rozdziały 5.3 , 5.4 i 5.5)

Uwagi ogólne

Dysertacja podejmuje ważny temat możliwości udoskonalenia metody różnic skończonych. Jedną z dróg jest użycie siatek niestrukturalnych. Mają one pomóc w konstruowaniu lepszej jakości algorytmów do modelowań numerycznych zarówno jeśli chodzi o dokładność uzyskiwanych rezultatów jak i efektywność obliczeniową wyrażającą się czasem obliczeń. Autor nie formułuje niestety w sposób wyraźny tez pracy. Trudno zorientować się czy jest ona po prostu próbą spopularyzowania teorii skal czasowych do praktycznych zastosowań w modelowaniach pola falowego, czy stawia sobie za cel stworzenie bardziej wydajnych obliczeniowo algorytmów w stosunku do klasycznej metody FD lub jej odmiany wykorzystującej zmienny rozmiar oczka siatki czy w końcu chce wskazać wady i zalety modelowań z użyciem skal czasowych. Mimo to, zdaniem recenzenta, w zarówno dobór przykładów modelowań numerycznych a szczególnie analiza ich rezultatów nie pozwalają jednoznacznie stwierdzić, by którekolwiek z powyżej sformułowanych zadań zostało całkowicie zrealizowane. **Recenzent prosi o wyraźne sformułowanie tez pracy i podanie ich w trakcie obrony.**

W opinii recenzenta autorowi udało się tylko częściowo zrealizować każde z powyżej wymienionych zamierzeń. Praca zawiera w rozdziałach pierwszym i drugim oraz w obu dodatkach bardzo dużą dawkę rezultatów teoretycznych. Doktorant w sposób zwarty i ścisły formułuje matematyczne podstawy teorii skal czasowych, formułuje i testuje dokładność wielopunktowych pochodnych na dyskretnych skalach czasowych oraz podaje ich związki z pochodnymi Hilgera oraz wynikami prac Fornberga. Ilość przedstawionych w pracy wyników teoretycznych i wzorów jest przytłaczająca. **Recenzent prosi, by doktorant sprecyzował jaką część zaprezentowanych formuł i wzorów została uzyskana przez niego a które z nich występują we wcześniejszych publikacjach.** Nie wiadomo jednak jaki jest cel tak wielkiej ilości tabelarycznych zestawień wyników teoretycznych przez co dysertacja przypomina trochę tablice matematyczne. Część z tych wyników nie została wykorzystana w części pracy opisującej wyniki modelowań a przynajmniej autor pomija milczeniem które z nich były potem wykorzystywane do obliczeń numerycznych. Przykładem mogą tu być pochodne pięciopunktowe realizowanie w różnych wariantach jak to opisano w rozdziale 2.2 i dodatku A oraz operatory Laplace'a opisane w rozdziale 2.3 i dodatku B.

Doktorant przedstawia szereg przykładów numerycznych symulacji propagacji fal sprężystych (korzystając z dwuwymiarowego przybliżenia akustycznego dla równania falowego). Dobór modeli numerycznych nie został w prezentowanej pracy dostatecznie umotywowany. **Recenzent prosi o wyjaśnienie czym doktorant kierował się w doborze konkretnych modeli i siatek obliczeniowych.** Największa ilość modelowań wykorzystywała klasyczną siatkę regularną. Jedyne dwa przykłady obliczeń dla innych siatek to modelowania dla wspomnianej wyżej siatki geometrycznej i siatki sinusoidalne. W tym drugim przypadku

autor nie podaje formuł pozwalających na generację tych siatek, jedynie przedstawia je na odpowiednich rysunkach (z których ten obrazujący siatkę dopasowaną do sinusoidalnych granic obszaru jest kompletnie nieczytelny – Rysunek 4.72). Autor obszernie przedstawia wyniki modelowań w postaci rysunków. Na 85 stron rozdziału czwartego 66 stron zawiera wyłącznie rysunki z podpisami, nawiasem mówiąc bardzo często kopiowanymi z podrozdziału do podrozdziału. Autor skrótowo opisuje wyniki prowadzonych modelowań unikając jak już wspomniałem podawania sensowności użycia takich a nie innych modeli i siatek. Ponadto autor tworzy coś na kształt szablonu komentarza wyników modelowań i powiela go praktycznie bez większych zmian z podrozdziału do podrozdziału. Na przykład prawie cały tekst ze strony 54 przekopiowany na stronę 67 i dalej na stronę 78 oraz częściowo na strony 91 i 104 co generalnie powiększa monotonię wywodów serwowanych przez doktoranta.

Kolejne uwagi dotyczą efektywności obliczeń i wydajności algorytmów opartych na idei skal czasowych. Doktorant nie informuje jakich programów używał do prowadzenia modelowań, podobnie jak nie podaje czy był ich twórcą lub współtwórcą. W dysertacji brak również jakichkolwiek informacji o sprzęcie komputerowym jaki został wykorzystany do obliczeń. **Recenzent liczy, że obie informacje zostaną podane w trakcie obrony.** Jedyńm źródłem informacji jakie może służyć do oceny efektywności obliczeń jest tabela 4.3. Można zauważyć, że poza ostatnim porównaniem z siatką geometryczną ilość węzłów klasycznej siatki FD i siatek używanych w metodzie skal czasowych była bardzo podobna a nawet identyczna. Tabela podaje również czasy obliczeń dla poszczególnych siatek i modeli (w domyśle na tym samym komputerze). Ponadto autor podaje dla metody skal czasowych odpowiednie czasy obliczeń zredukowane o czynnik 5/9. Odpowiadają one stosunkowi ilości węzłów zaangażowanych do obliczeń w klasycznej metodzie FD i w metodzie skal czasowych. Zabieg ten zdaje się sugerować, że autor nie jest zainteresowany porównywaniem czasów modelowań w przybliżeniu dających tak samo dokładne wyniki symulacji ale czasem obliczeń w przeliczeniu na pojedynczy węzeł zaangażowany do obliczeń. **Recenzent prosi o ustosunkowanie się do tej kwestii w trakcie obrony.**

Z porównania łatwo zauważyć, że metoda klasyczna jest bardziej efektywna od metody skal czasowych zarówno w wartościach bezwzględnych czasu, jak i w przeliczeniu na jeden węzeł. Również po redukcji czasów obliczeń o czynnik 5/9 nowy algorytm działa wolniej dla wszystkich przypadków poza ostatnim (geometryczną siatką), gdzie czas obliczeń w przeliczeniu na węzeł jest taki sam. Dziwi tym samym konkluzja, podawana w podsumowaniu, że "... w symulacji z modelem prędkości zmieniającym się w postępie geometrycznym odpowiednie dopasowanie siatki niestrukturalnej pozwoliło na znaczne zredukowanie kosztów obliczeń rzędu 25% względem klasycznej siatki FD ...". Podobnie nieuzasadnioną wydaje się konkluzja, że „...uzyskane wyniki lokalizacji i odtworzenia funkcji źródła techniką TRA stosując w obliczeniach nowy algorytm aproksymacji pochodnych pokrywają się z rezultatami uzyskanymi klasyczną metodą FD, ale są obliczeniowo istotnie efektywniejsze”. Autor niestety nie wyjaśnia tej kwestii. **Recenzent liczy na jej wyjaśnienie w trakcie obrony.**

Ponadto patrząc na wyniki zestawione w tabeli poprzedniej (Tabela 4.2) można zauważyć, że klasyczna metoda FD w każdym wypadku daje dokładniejsze (choć nieznacznie) wyniki symulacji za wyjątkiem siatki geometrycznej. Ta ostatnia wymaga pełnej znajomości modelu prędkości i rzeczywiście pozwala na uzyskanie lepszej dokładności w modelowaniach. Niestety ani w jednej ani w drugiej tabeli autor nie podaje porównania czasów i dokładności obliczeń dla modelu ograniczonego sinusoidalnymi brzegami. Konkluduje natomiast, że metoda skal czasowych sprawdza się dobrze i pozwala na efektywne generowanie sejsmogramów syntetycznych. **Niestety jest to w ocenie recenzenta wyłącznie opinia subiektywna i powinna być szerzej omówiona w trakcie obrony.**

Autor słusznie zauważa, że o efektywności obliczeń decyduje w dużej mierze ilość węzłów siatki. Tam gdzie można ją rozrzedzić bez utraty dokładności wyników obliczeń czasu obliczeń są krótsze. Nie analizuje jednak innych czynników mających wpływ na czas modelowań i ich dokładność. Nie analizuje na przykład wpływu wprowadzonej w dysertacji metody aproksymacji pochodnych na siatkach niestrukturalnych, gdzie znaczącą część czasu obliczeniowego pochłania zagadnienie optymalizacji z wagami. Tym samym satysfakcja recenzenta z wyników porównania klasycznej metody FD a metody skal czasowych w ujęciu doktoranta jest tylko umiarkowana.

Uwagi szczegółowe

Autor w prezentowaniu wielu wyników modelowań w sposób zaskakujący dobiera krok czasowy z jakim prezentuje ujęcia migawkowe propagującej fali. Na przykład dla ośrodka warstwowanego (rys. 4.16 -4.19) jest on w miarę jednorodny lecz zupełnie inny niż w wypadku modelowań dla granicy sinusoidalnej, gdzie występuje bardzo duża luka pomiędzy czasami 0.6845s a 1.3745s (rys. 4.46 – 4.48). **Recenzent prosi o wyjaśnienie, czym kierował się doktorant w doborze kroku czasowego prezentacji ujęć migawkowych.**

Doktorant jak wspomniano umieszcza w pracy wiele rysunków. Bardzo często nie komentuje ich treści a jedynie wymienia że zostały zamieszczone. Pomijając rysunki prezentujące migawkowe ujęcia propagującej fali dla różnych modeli numerycznych ośrodka przykładem może tu być prezentacja siatek obliczeniowych. Np. dla rysunków 4.59 i 4.60 prezentujących siatki w pobliżu źródła i odbiornika pada stwierdzenie że są różne. Kończąc w ten sposób autor nie wyjaśnia powodów umieszczenia tych rysunków i ich znaczenia w dysertacji. Podobnie jest w przypadku rysunków 4.44 i 4.45

Dostrzeżone usterki (sztuk 12):

str. 5 Literówki „źródła” i „Wspomiana”

str. 31 niepotrzebny przecinek „wśród, których”

str. 32 minuskuła sigma σ do oznaczenia naprężeń jest używana częściej niż ζ

str 49 zamiast $\mathbf{z} = \mathbf{c}^T \mathbf{B}$ (5 linijka od góry) powinno być $\mathbf{z}^T = \mathbf{c}^T \mathbf{B}$

str 51 zamiast „Weryfikacji” (5 linijka od dołu) ma być „Weryfikacja”

str 53 zamiast „podprzestrzenie” (8 linijka od góry) ma być „podprzestrzeń”

str 54 po słowach kończących pierwszy akapit konieczny jest odniesienie się do literatury skoro autor stwierdza, że opisywany efekt „jest doskonale znany”

str 104 (przedostatnia linijka pierwszego akapitu) „do puki”

str 118 „prędkość” zamiast „prędkości” (8 linijka od góry)

str 129 W tabeli 4.2 w piątej kolumnie wiersz trzeci wynik 0.01150 jest chyba błędny

str 131 (10 linijka od dołu) „dokładności” zamiast „dokładkości”

str 140 pozycja literatury [24] brak nazwy czasopisma – powinno być PAGEOPH

Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że zaprezentowana przez mgra Kamila Waśkiewicza dysertacja mimo licznych niejasności, dużej oszczędności komentarzy i miejscami powierzchownej analizy prezentowanych wyników pozwala zapoznać się z koncepcją idei skal czasowych i możliwościami jej wykorzystania w modelowaniach numerycznych procesów falowych.

Praca doktorska udowadnia moim zdaniem, iż mgr Kamil Waśkiewicz w sposób wystarczający wykonał postawione zadanie i mimo, że nie ustrzegł się pewnych niedociągnięć udowodnił znajomość prezentowanej problematyki naukowej.

Z uwagi na fakt, że w świetle wiedzy recenzenta przedmiotowa dysertacja autorstwa pana mgr Kamila Waśkiewicza pt „Zastosowanie techniki skal czasowych do modelowania i inwersji akustycznego pola falowego” jest samodzielny i oryginalny opracowaniem autora, stwierdzam, spełnia ona wymogi określone w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym, Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14 marca 2003 r. i w Rozporządzeniu Ministra NiSW z dnia 10 listopada 2015 r. wnioskuję o dopuszczenie pana mgr Kamila Waśkiewicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Lerinek.