

Rozprawa doktorska p.t. „Advanced migration and filtration techniques for microseismic data”

Autor: mgr Jacek Trojanowski

Jednostka: Instytut Geofizyki PAN

STRESZCZENIE

Badania opisane w niniejszej rozprawie są poświęcone optymalizacji procesu detekcji i lokalizacji wstrząsów mikrosejsmicznych rejestrowanych przez gęste sieci czujników na powierzchni Ziemi. Monitoring mikrosejsmiczny jest wykorzystywany do badania naturalnej aktywności sejsmicznej, np. uskoków czy wulkanów, ale również jest wykorzystywany w przemyśle do optymalizacji procesów produkcyjnych oraz do identyfikowania różnych zagrożeń. Jest szczególnie istotny w przypadku monitorowania rozwoju szczelin w procesie szczelinowania hydraulicznego wykonywanego w łupkach gazonośnych.

Skuteczna i wiarygodna detekcja wstrząsów mikrosejsmicznych przy użyciu sieci powierzchniowych jest szczególnie trudnym wyzwaniem z powodu niskiego współczynnika sygnał/szum (S/N). Bardzo często amplitudy sygnału od wstrząsów są znacznie mniejsze od amplitud szumu. Identyfikacja tak słabych wstrząsów jest możliwa dzięki metodom migracyjnym, które wykorzystują składanie (ang. *stacking*) tras. Jeśli sygnał od wstrząsu jest koherentnie złożony, to uzyskuje się wzrost wartości współczynnika S/N . Jego maksymalna wartość przypada dla składania zakładającego rzeczywistą lokalizację źródła. Pozwala to określić lokalizację wstrząsów mikrosejsmicznych poprzez znalezienie lokalizacji maksymalizującej S/N po złożeniu. Takie metoda pozwala wykryć nawet takie wstrząsy, które są zupełnie niewidoczne na sekcji sejsmicznej. Efektywność metod migracyjnych zależy od efektywności zastosowanej metody składania oraz od poziomu szumu.

Głównym problemem przy składaniu sygnału rzeczywistych wstrząsów jest jego zmienna amplituda i polaryzacja spowodowana sposobem emisji fali przez źródło. Sygnał jest emitowany przez źródło sejsmiczne z różnymi polaryzacjami w różnych kierunkach. Proste złożenie, polegające na sumowaniu amplitud, powoduje, że różnie spolaryzowany sygnał kasuje się. Stąd większość badań była poświęcona opracowaniu metod, które w jakiś sposób radzą sobie z różnie spolaryzowanym sygnałem źródła. Niestety, trudno jest porównać metody, które zostały zaprezentowane przez różnych autorów używających różnych zestawów danych. Co gorsze, brak podstaw teoretycznych wspólnych dla różnych metod migracyjnych spowodował, że kryteria detekcji wstrząsów są subiektywne i nieporównywalne.

W związku z powyższym moja rozprawa rozpoczyna się od opracowania podstaw teoretycznych dla metod migracyjnych używanych do detekcji i lokalizacji wstrząsów mikrosejsmicznych. W rozprawie analizuję metody migracyjne, które wykorzystują tzw. funkcję detekcji, która jest szeregiem czasowym maksimum funkcji obrazu, będącą zbiorem złożonych tras dla różnych założonych lokalizacji źródeł. Teoria ta opisuje statystyczne właściwości funkcji detekcji i pozwala zdefiniować obiektywne probabilistyczne kryterium detekcji. Wykorzystując tę teorię można też efektywnie porównywać różne metody składania.

W kolejnym rozdziale porównuję różne metody migracyjne do detekcji i lokalizacji wstrząsów mikrosejsmicznych, które pojawiły się w ostatnich latach w literaturze fachowej. Pokazuję, że kluczowym aspektem dla efektywności detekcji jest uwzględnienie poprawki na różną polaryzację sygnału emitowanego przez źródło. Dla danych z uwzględnioną poprawką na polaryzację najlepsze wyniki daje proste złożenie (suma amplitud) lub użycie funkcji *semblance*. Oznacza to, że jednoczesna inwersja

mechanizmu źródła i detekcja wstrząsu jest optymalnym podejściem maksymalizującym wykrywalność słabych wstrząsów.

Tym, co najbardziej ogranicza możliwość wykrycia wstrząsów mikrosejsmicznych, jest poziom szumu. Często, szczególnie w aplikacjach przemysłowych, jest to szum skorelowany, który przeważnie jest związany z aktywnością ludzką. Aby go usunąć opracowałem dwa filtry, które zostały przetestowane na danych syntetycznych oraz rzeczywistych. Pierwszy z nich, filtr splotowy (MCCF), jest szczególnie użyteczny do danych z sieci powierzchniowych. Operując w domenie spektralnej rozpoznaje on skorelowany szum na sąsiadujących trasach i usuwa go. Filtr ten sam adaptuje się do danych oraz nie wymaga strojenia ani wiedzy na temat źródeł szumu.

Druga metoda filtracji jest realizowana dla sekcji sejsmicznej traktowanej jako obraz w domenie curveletów. Dekompozycja obrazu w domenie curveletów zwykle pozwala łatwiej rozdzielić parametry sygnału i szumu niż np. w domenie czas—położenie. Opracowany filtr efektywnie usuwa koherentny szum z obrazu, ale potencjalnie może usunąć również koherentny sygnał od wstrząsu, więc niezbędne jest zdefiniowanie parametrów opisujących potencjalne wstrząsy oraz zagwarantowanie, że nie zostaną one poddane tłumieniu.

Ostateczne testy różnych kroków przetwarzania zostały wykonane na rzeczywistym zbiorze danych dostarczonym przez firmę MicroSeismic Inc. Dane zostały zarejestrowane w czasie zabiegu szczelinowania hydraulicznego w łupkach przez sieć powierzchniową w kształcie gwiazdy. Okazało się, że sekwencja kroków przetwarzania ma duże znaczenie dla efektywności detekcji. Kluczową sprawą okazało się kondycjonowanie danych poprzez np. *balancing* lub wybór tras o najmniejszym poziomie szumu. Oba opracowane wcześniej filtry znacząco poprawiły możliwości detekcji słabych wstrząsów. Liczba poprawnych detekcji była silnie zależna od sekwencji przetwarzania danych. Najlepszym rezultatem było wykrycie 210 wstrząsów, a najgorszym—niewykrycie żadnego. Pokazuje to jak ważny jest dobór optymalnej sekwencji przetwarzania, która może umożliwić wykrycie znacząco większej liczby wstrząsów niż jest to możliwe dla nieoptymalizowanego przetwarzania. Jest to szczególnie ważne w monitoringu powierzchniowym, który często jest krytykowany w związku z małą liczbą wykrywanych przy jego pomocy wstrząsów.

PhD thesis title: „Advanced migration and filtration techniques for microseismic data”

Author: MSc Jacek Trojanowski

Institution: Institute of Geophysics PAS

SUMMARY

In the present work I focused on optimization of the procedure of detection and localization of microseismic events recorded by dense surface arrays of receivers. Microseismic monitoring is used to study natural activity of faults and volcanoes but also in the energy industry in optimization of exploitation processes and in prevention of different hazards. It is most commonly used to monitor fracture growth during hydraulic fracturing treatments for shale gas production.

Reliable detection of microseismic events by a surface array is usually a challenging task due to the low signal-to-noise ratio, as signal of many microseismic events has often much lower amplitudes than noise. A common approach to identify such weak events is to apply migration-based methods that utilize stacking, which is summing the signals from a number of receivers. If signal amplitudes are coherently stacked, the stack trace has larger signal-to-noise ratio than individual traces. The maximum signal-to-noise ratio is obtained at the true location of the microseismic event. It allows to find an event's location by finding the location that results in the maximum signal-to-noise ratio on the stacked trace. This approach is capable of detecting microseismic events even if their signal is not visible on individual traces. The effectiveness of detection highly depends on stacking performance and noise.

The main practical issue is overcoming signal variation caused by the source radiation pattern. The signal radiated in different directions has varying amplitudes and polarization. Stacking the signal amplitudes of the opposite polarization makes simple summation ineffective. Hence, many different research studies main focused on developing methodologies of overcoming this issue. However, it is hard to compare all the developed methods, as they were applied to different datasets. In addition, the lack of a common theoretical background for all migration-based methods causes detection criteria to be subjective and incomparable.

Thus, I begin the thesis with developing a theory of migration-based detection methods for microseismic events. I consider methods that utilize the detection function, which is a time series of maxima picked from time slices of an image function that in turn is composed of stack values at different potential locations of microseismic events. Exceedance of a defined threshold by detection function values is typically considered to be a detection of an event. The developed theory describes statistical properties of the detection function and allows us to define a detection criterion in an objective probabilistic way. With this theory it is also possible to perform effective tests of different stacking methods.

Further, I compare selected published migration-based location and detection methods for microseismic events. I show that the polarization correction accounting for source mechanism of a microseismic event is crucial for detection of microseismic events. The best performing stacking methods assuming correct polarization correction are linear stacking and semblance. Thus, joint inversion of source mechanism and detection is the preferable approach that maximizes the detectability.

The limiting factor for the performance of any stacking method is the noise level. For industrial applications a common issue is the correlated noise originating from human activity. I propose two new denoising

methods that are developed, tested and successfully applied to real datasets. The first one, a Multi-Channel Convolution Filter (MCCF), is particularly suited to surface microseismic monitoring data. It identifies correlated noise in spectral domain and removes it. The MCCF filter adapts to the data on its own and does not require any knowledge about the nature of noise origins.

The second denoising method that I propose is based on the curvelet transform, which utilizes the fact that signal and noise are usually better separated in the curvelet domain than in the time—space domain. In this case, seismic records are considered as an image in the time—space domain and the image is decomposed into the curvelet domain. Curvelet parameters describing potential shapes of the event's signal are preserved and those related to noise are damped.

The final tests of different processing steps were performed with real microseismic data provided by MicroSeismic Inc. The data were acquired by a surface array during one stage of hydraulic stimulation of shale rocks. I tested different ways of data conditioning, that is the set of all processing steps conducted prior to running the detection procedure. It turned out that it was crucial for the performance of detection to reduce the influence of noisy traces on stacking process by, e.g., balancing or trace selection. Application of the two developed denoising methods further improves the detectability of microseismic events recorded with low signal-to-noise ratio. The number of detected microseismic events highly varied with changes to the processing sequence. The best achieved result was 210 detected events and the worst was 0. It shows that a careful and conscious choice of the processing steps is crucial to achieve a high detectability of microseismic events. It is particularly important for the surface microseismic monitoring which is often criticized for providing a low number of detected microseismic events comparing to the borehole monitoring.