

01 ВОССТАНОВЛЕНИЕ СКОРОСТНЫХ АНОМАЛИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МЕЖСКВАЖИННОГО МОНИТОРИНГА

И.В. Абакумов*, **Д.А. Киященко****, **Б.М. Каштан***

(*СПбГУ, Санкт-Петербург, **Shell International E&P, Houston, USA)

abakumov_ivan@mail.ru

VELOCITY ANOMALIES RECONSTRUCTION USING TIME-LAPSE CROSS-WELL DATA

I.V. Abakumov*, **D.A. Kiyashchenko****, **B.M. Kashtan***

(*SPbSU, St. Petersburg, **Shell International E&P, Houston, USA)

Аннотация. Стандартная томография на основе данных межскважинного мониторинга использует времена прихода первых вступлений для восстановления скоростных аномалий в межскважинном пространстве, возникающих в результате добычи нефти и газа, нагнетания водяного пара или CO₂ [2, 5] и т.д. Эти времена пикируются на опорных и повторных наборах данных, а затем разница обращается в изменение скоростной модели среды. Результат томографии в значительной степени зависит от качества первых вступлений и надежности пикирования. Временная задержка также может быть вычислена с помощью корреляционного подхода. Он основан на факте, что кросс-корреляция соответствующих трасс на опорных и повторных данных достигает максимума, при относительном временном сдвиге равном нулю. Однако это верно только когда частотные спектры опорного и повторного сигналов идентичны [1]. Применение томографии без учета спектральной разности сигналов может привести к возникновению артефактов [2]. Альтернативой корреляционному подходу может служить функционал, построенный на взвешенной норме кросс-корреляции [7]. Такой функционал оказывается менее чувствительным к разнице в частотном спектре опорного и повторного сигналов.

Другой проблемой томографии на основе межскважинных данных является ограниченное латеральное разрешение вследствие специфической геометрии наблюдений [6]. Использование информации, содержащейся в отраженных волнах, позволяет разрешить перечисленные затруднения. Таким образом, линейная комбинация функционалов, построенных на основе взвешенной нормы кросс-корреляции прямых волн и сейсмических изображений, на опорных и повторных данных, оказывается не чувствительной к спектральной разнице сигналов и может быть использована для определения скоростной аномалии среды.

Abstract. Conventional time-lapse cross-well tomography utilizes direct arrivals to recover velocity changes in the subsurface due to oil and gas production, steam or CO₂ injection [2, 5], etc. First-arrival traveltimes are picked in baseline and monitor data, and then the resulting time-lapse time delay is inverted into velocity change. The result of tomography significantly depends on

the first-arrival signal quality and picks reliability. The first-arrival time delays may be also estimated by a cross-correlation approach. The cross-correlation of baseline and monitor data waveforms is maximal when their relative time shift is zero. However, this is only valid if the source spectra of the baseline and monitor data are identical [1]. This is not always the case and it may impact tomography results [2]. In order to tackle this problem, we measure the traveltime difference via a weighted norm of the cross-correlation of baseline and monitor waveforms (see Leeuwen and Mulder [7]).

Cross-well traveltime tomography usually has limited lateral resolution due to specific acquisition geometry [6]. The use of reflections in the cross-well data improve the resolution and provide additional information to constrain velocity model. We propose to optimize the functional based on the weighted norm of correlation of first arrivals and reflection images. This functional is not sensitive to waveform differences and may handle uncertainties of determination of lateral extent and magnitude of an anomaly.

Метод. В результате межскважинного мониторинга оказываются доступны два набора данных: опорные и повторные. Индексы s и r соответствуют определенной паре источник-приемник. Целью межскважинного мониторинга является восстановление скоростной аномалии в межскважинном пространстве. Одним из способов решения этой задачи является независимое восстановление опорной и повторной скоростных моделей и определение скоростной аномалии как их разницы [5]. Однако такой подход требует значительного числа итераций и может приводить к множеству артефактов в восстановленном изменении скорости. Альтернативным способом является минимизация целевой функции, включающей одновременно опорные и повторные данные, и их связь с s .

Пусть задана опорная скоростная модель и априорная оценка скоростной аномалии. Тогда можно построить скоростную модель и рассчитать времена прихода первых вступлений и t_r . Временная задержка содержит информацию о возмущении скоростной модели вдоль соответствующего луча и позволяет построить сдвинутые (по времени) повторные трассы:

Если формы импульсов первых вступлений на опорных и повторных данных идентичны, кросс-корреляция трасс и достигает максимума, когда временная задержка совпадает с фактическим сдвигом между временами прихода первых вступлений на s и r . Если спектр сигналов различен, корреляционный подход оказывается неприменим [1], поэтому мы предлагаем использовать целевую функцию, основанную на взвешенной норме кросс-корреляции:

с весовой функцией аннигилирующего типа. Для исключения влияния последующих вступлений кросс-корреляция трасс вычисляется в небольшом окне, симметричном относительно времени прихода первых вступлений на опорных данных. Минимуму целевой функции соответствует истинная скоростная аномалия.

Характерным недостатком томографии на основе данных межскважинного мониторинга является ограниченное латеральное разрешение вследствие специфической геометрии наблюдений [6]. Траектория отраженного сигнала проходит под значительным углом к горизонту, поэтому содержит информацию, позволяющую улучшить латеральное разрешение и получить дополнительные сведения о скоростной модели среды. Рассмотрим сейсмические изображения, построенные по отраженным волнам на опорных и повторных данных с помощью миграции Кирхгофа с весовыми функциями:

Здесь и есть времена пробега от источника до точки изображения и от точки изображения до приемника соответственно. Весовые функции позволяют учесть априорную информацию о наклонах отражающих границ [4]. Если положения отражающих границ не изменяются в процессе мониторинга, изображения, построенные по опорным и повторным данным, должны совпадать для истинных значений. Таким образом, в качестве целевой функции можно рассматривать взвешенную норму кросс-корреляции сейсмических изображений:

обозначает часть межскважинного пространства, используемую для построения сейсмического изображения. Множитель введен для компенсации зависимости протяженности импульса на изображениях от скорости миграции. Рассмотрим линейную комбинацию целевых функций:

где и положительные балансирующие коэффициенты. Минимуму целевой функции соответствует истинная скоростная аномалия.

Алгоритм восстановления. Искомая скоростная аномалия находится из условия минимума целевой функции, при этом соответствующая оптимизационная задача решается методом Ньютона. Для вычисления градиента функционала используется метод присоединенных состояний, а аппроксимация матрицы Гессе выполнена по методу Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно.

Синтетический пример. Для изучения чувствительности целевых функций к размерам и амплитуде скоростной аномалии рассмотрим следующий численный эксперимент. Опорная модель среды однородна по скорости и имеет несколько горизонтальных слоев различной плотности. Повторная скоростная модель образована добавлением аномалии прямоугольной формы к опорной модели (Рис. 1). Источники и приемники

расположены в вертикальных скважинах. Синтетические сейсмограммы, содержащие прямые и отраженные волны, рассчитаны методом лучевого трассирования в NORSAR. В качестве сигнала используется импульс Риккера с несущей частотой 300 Гц, с возможностью добавления фазового сдвига сигнала на $\pi/3$ для повторных данных.

Изучение зависимости функционалов J_T , J_R и J_S показало, что наиболее точно восстанавливается высота аномалии. Функционал J_T имеет плавный минимум, но значения ширины и величины аномалии связаны (Рис. 1). Функционал J_R имеет резкий минимум соответствующий правильной величине аномалии. Линейная комбинация функционалов J_S имеет плавный минимум и позволяет разделять параметры аномалии. Также функционал J_S не чувствителен к фазовому сдвигу сигнала.

Рис. 1. Модель среды с аномалией (слева); значения целевых функций J_T , J_R и J_S в зависимости от ширины и величины аномалии (справа)

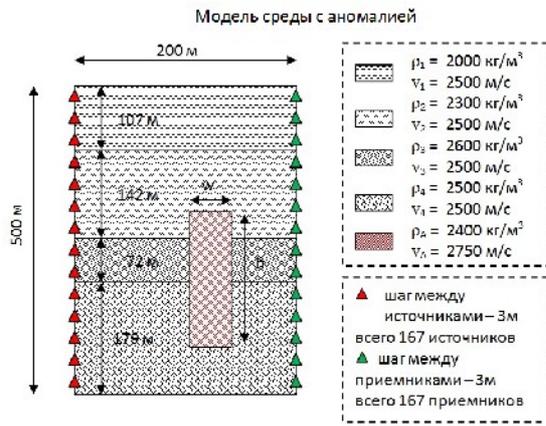
Заключение. В данной работе предложен метод восстановления скоростных аномалий на основе данных межскважинного мониторинга. Оригинальность метода состоит в том, что восстановление скоростных аномалий проводится на основе совместного обращения прямых и отраженных волн на опорных и повторных наборах данных с использованием корреляционного подхода. Такой подход не требует предварительного пикирования волн и потенциально позволяет учесть спектральные изменения импульсов сигналов.

Благодарности. Авторы благодарны Shell International E&P за финансовую поддержку проекта (грант CRDF RUG1-30027-ST-12).

Литература:

1. de Hoop, M. V. and van der Hilst, R. D. [2005] On sensitivity kernels for 'waveequation' transmission tomography, *Geophys. J. Int.*, **160**(3)
2. Kiyashchenko, D., Mehta, K., Lopez, J., Maamari, A., Adawi, R. and Rocco, G. [2011] Time-lapse down-hole seismic surveys for deep EOR target monitoring in South Oman, *SEG Expanded Abstracts*, **30**
3. Nasyrov, D., Kiyashchenko, D., Kiselev, Yu., Kashtan, B. and Troyan, V. [2009] Multiple migration of VSP data for velocity analysis, *SEG Expanded Abstracts*, **28**
4. Nikitchenko, A., Kiyashchenko, D., Kiselev, Yu., Kashtan, B. and Troyan, V. [2009] Scattering objects location with cross-well data, *SEG Expanded Abstracts*, **28**
5. Saito, H., Nobuoka, D., Azuma, H., Xue, Z. and Tanase, D. [2006] Time-lapse crosswell seismic tomography for monitoring injected CO₂ in an onshore aquifer, Nagaoka, Japan, *Exploration Geophysics*, **37**(1)
6. Schuster, G.T. [1996] Resolution limits for crosswell migration and travelttime tomography, *Geophys. J. Int.*, **127**

7. van Leeuwen, T. and Mulder, W. A. [2010] A correlation-based misfit criterion for wave-equation traveltine tomography, *Geophys. J. Int.*, **182**



Модель среды с аномалией: аномалия прямоугольной формы (ширина $w=32 \text{ м}$, высота $h=96 \text{ м}$) в однородной среде, несколько горизонтальных слоев разной плотности.

Параметры аномалий:

| Параметр: | Значение | | | | |
|-----------------|----------|------|------|------|------|
| Ширина (м) | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 |
| Высота (м) | 24 | 48 | 96 | 192 | 384 |
| Скорость (км/с) | 2.45 | 2.60 | 2.75 | 2.90 | 3.05 |

