

Д. К. Дмитрачков¹, М. И. Протасов^{1}*

Сейсмическая инверсия после глубинной миграции для восстановления высокочастотной составляющей модели

¹ Институт нефтяной геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Сейсмическая инверсия используется на практике как инструмент для прогнозирования коллекторских свойств. Она позволяет выделить из сейсмических данных модель с высоким уровнем детализации, т.е. высокочастотную составляющую модели. При этом входными данными являются результаты временной обработки. В представленной работе реализован алгоритм сейсмической инверсии полной вариации с ограничениями. Входными данными для инверсии являются глубинные изображения в истинных амплитудах и миграционная скоростная модель. Численно исследуются возможности сейсмической инверсии для уточнения высокочастотной составляющей глубинно-скоростной модели. Эксперименты проводятся с использованием синтетических сейсмических данных, полученных для реалистичной модели Marmousi.

Ключевые слова: сейсмическая инверсия, глубинная миграция, высокочастотная модель

D. K. Dmitrachkov¹, M. I. Protasov^{1}*

Seismic inversion after depth migration for recovery of the high-frequency component of the model

¹ Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Abstract. Seismic inversion is used in practice as a tool for predicting reservoir properties. It allows one to extract a model with a high level of detail from seismic data, i.e. high-frequency component of the model. In this case, the input data are the time processing results. In the presented work, constrained total variation inversion algorithm is implemented. The input data for the inversion are the depth image results in true amplitudes and the depth migration velocity model. The possibilities of seismic inversion are numerically investigated to refine the high-frequency component of the model. Experiments were carried out using synthetic seismic data got for realistic Marmousi model.

Keywords: seismic inversion, depth migration, high-frequency model

Введение

Обычно под сейсмической инверсией понимается алгоритм, который преобразует временной или мигрированный временной сейсмический разрез в разрез акустических импедансов [1, 5]. Т. е. входными данными для инверсии являются результаты временной обработки сейсмических данных, причем как до, так и после суммирования [3, 6]. Однако в областях со сложной геологией требуется глубинная обработка сейсмических данных для построения точного представления о структуре резервуара, а тогда сейсмическую инверсию необходимо применять к результатам глубинной обработки.

Основным результатом стандартного использования сейсмической инверсии является детальная модель упругих свойств геологической среды, позволяющая прогнозировать свойства резервуаров [1]. Т. е. инверсия применяется для восстановления высокочастотной составляющей модели с целью интерпретации, однако для уточнения глубинно-скоростной модели инверсия не используется. Поэтому в рамках данной работы исследуется сейсмическая инверсия с целью определения ее возможностей для восстановления высокочастотной компоненты глубинно-скоростной модели. При этом реализован алгоритм сейсмической инверсии полной вариации с ограничениями, где в качестве начального приближения используется миграционная скоростная модель. Исследование проведено с использованием синтетических данных и модели Marmousi.

Сейсмическая инверсия полной вариации с ограничениями

В основе реализованного алгоритма акустической сейсмической инверсии лежит одномерная свёрточная модель сейсмической трассы. Такая постановка предполагает, что для горизонтально-слоистой модели при нормальном падении плоской продольной волны однократно-отражённое волновое поле во временной области может быть представлено в виде свёртки трассы коэффициентов отражения с зондирующим импульсом. Задача инверсии является некорректной, поскольку одно и то же волновое поле может быть порождено разными моделями, что приводит к необходимости применения регуляризации. Принимая предположение о том, что среда состоит из конечного числа пластов со свойствами, близкими к однородным, более предпочтительными оказываются трассы коэффициентов отражения с наименьшим числом ненулевых компонент. Таким образом, появляется целевой функционал, состоящий из нормы невязки синтетической и наблюдаемой сейсмических трасс, а также из двух стабилизаторов, накладывающих штраф на полную вариацию решения.

В сейсмических трассах отсутствует информация о низкочастотной составляющей модели. Для учёта миграционной скоростной модели в решении в целевой функционал был добавлен ещё один стабилизатор. В рамках слабоконтрастного приближения для коэффициентов отражения [3, 6] интегрируется трасса коэффициентов отражения и осуществляется переход к логарифмам относительных акустических импедансов, что позволяет учесть миграционную скоростную модель.

Так как инверсия формулируется в рамках одномерной модели, важно помнить о пространственной связности модели. Чтобы обеспечить плавное изменение коллекторских свойств внутри слоёв модели, был введён ещё один стабилизатор, связывающий решение для рассматриваемой трассы с решением для соседней трассы с точки зрения слабоконтрастного приближения.

Таким образом, целевой функционал инверсии полной вариации с ограничениями имеет вид

$$f(r; \alpha_i) = \|w * r - s\|_1 + \alpha_1 \|r\|_1 + \alpha_2 \|Tr\|_1 + \alpha_3 \|Cr - \xi\|_1 + \alpha_4 \|C(r - \tilde{r})\|_1,$$

где w — зондирующий импульс, s — наблюдаемая сейсмическая трасса, r — искомая трасса коэффициентов отражения, T — матрица дифференцирования, C — матрица интегрирования, ξ — вектор из логарифмов относительных акустических импедансов, \tilde{r} — соседняя трасса коэффициентов отражения, $\alpha_i > 0$ — параметры регуляризации. Выбор L_1 -нормы обеспечивает в решении наименьшее количество ненулевых компонент.

Чтобы минимизировать представленный функционал, применяется метод наименьших квадратов с итеративным пересчётом весов (iteratively reweighted least squares, IRLS). Когда определены коэффициенты отражения, по ним затем восстанавливаются значения импедансов и соответствующих скоростей, пользуясь рекуррентным соотношением.

Численные эксперименты

Разработанный алгоритм сейсмической инверсии применяется к синтетическим данным, полученным с помощью одномерного свёрточного моделирования по реалистичной модели Marmousi и переведённым в глубинный масштаб. Поскольку и миграционная скоростная модель, и синтетическое изображение заданы в глубинном масштабе, а сейсмическая инверсия работает во временном масштабе, то дополнительно было использовано преобразование «глубина-время» [4]. Для его осуществления использовалась миграционная скоростная модель. Таким образом, посредством этого преобразования, были получены исходная и миграционная модели Marmousi во временном масштабе (Рисунок 1). Далее, инверсия была применена ко всему исследуемому фрагменту модели Marmousi (Рисунок 2). Полученный результат демонстрирует удовлетворительную точность восстановления детальной глубинно-скоростной модели, включая её высокочастотную составляющую.

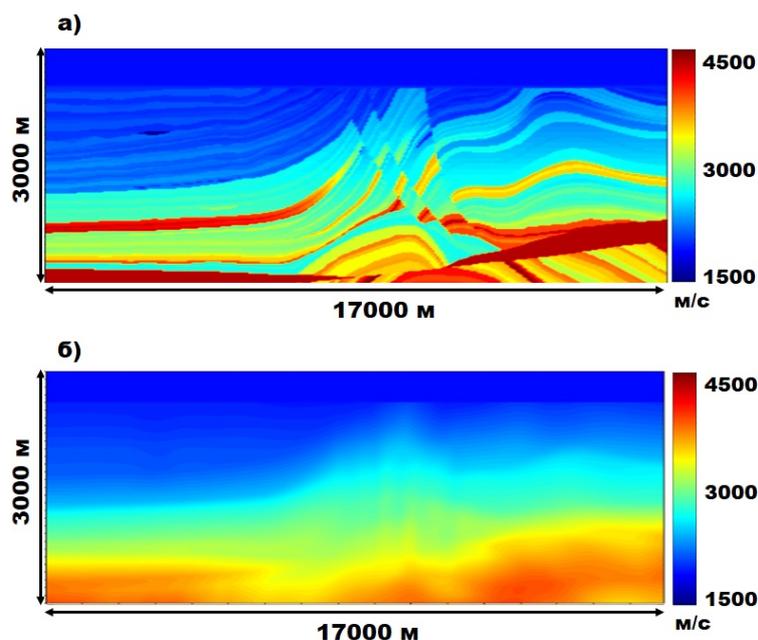


Рис. 1. а) Фрагмент исходной модели Marmousi. б) Соответствующий фрагмент миграционной модели Marmousi в глубинном масштабе.

Заключение

В работе реализован алгоритм инверсии сейсмических трасс после глубинной миграции. Показано, что сейсмическая инверсия полной вариации с ограничениями позволяет восстановить высокочастотную составляющую модели при приемлемом качестве результата глубинной сейсмической миграции, что согласуется со стандартным применением инверсии к результатам временной обработки. Такие обстоятельства создают предпосылки для использования сейсмической инверсии в качестве инструмента для уточнения глубинно-скоростной модели.

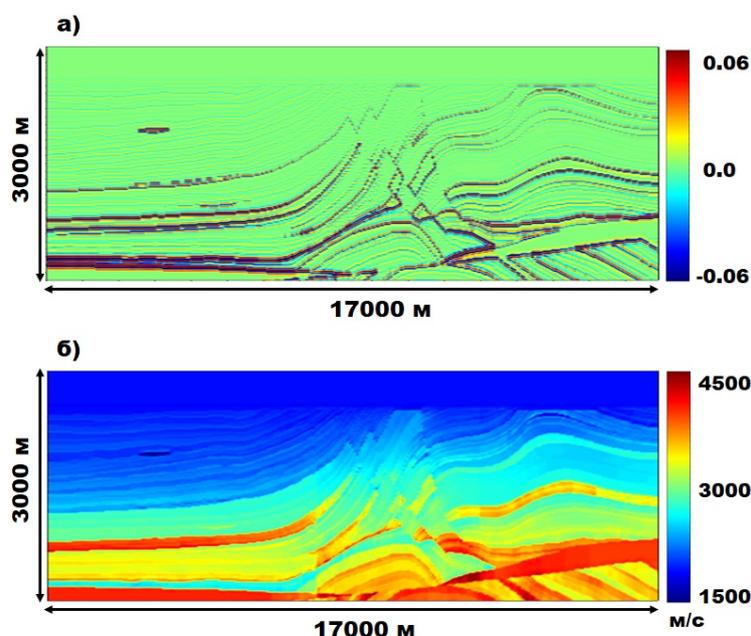


Рис. 2. а) Результат построения идеального сейсмического изображения в миграционной модели Marmousi. б) Соответствующий результат сейсмической инверсии

Благодарности

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ЧНФ в рамках научного проекта №20-55-26003. Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR and GACR, project number 20-55-26003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ампилов Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В., Филиппова К.Е., Приезжев И.И. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 1: Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 4. – С. 3–16.
2. Тихонов А.Н. О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения: ДАН СССР. – 1965. – т. 163(3). – С. 591–594.
3. Hampson D.P., Russell B.H., Bankhead B. Simultaneous inversion of pre-stack seismic data: SEG Expanded Abstracts. – 2005. – 1633–1637.
4. Robein, E. Seismic Imaging: EAGE Publications. – 2010.
5. Russell B. H. Introduction to Seismic Inversion Methods: Course Notes Series, Society of Exploration Geophysicists. – 1988. – 80–101.
6. Russell B.H. and Hampson D.P. Comparison of poststack seismic inversion methods: SEG Expanded Abstracts. –1991. – 876–878.

© Д. К. Дмитрачков, М. И. Протасов, 2023