

Анализ разрешающей способности метода обращения полного волнового поля применительно к рассеянной компоненте волнового поля

К. Г. Гадильшин^{1}, М. И. Протасов¹*

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука
СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: GadylshinKG@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе исследуется влияние рассеянной компоненты волнового поля на результаты обращения полного волнового поля. Приводится анализ различных сценариев обращения. Используя один шаг квазиньютоновского метода, мы показываем, что рассеянная компонента волнового поля содержит полезную дополнительную информацию в контексте решения обратной динамической задачи сейсмологии.

Ключевые слова: метод обращения полного волнового поля, SVD, рассеяние, псевдообратный Гессиян

Full waveform inversion of the scattered wavefield: resolution analysis

K. G. Gadylshin^{1}, M. I. Protasov¹*

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation
* e-mail: GadylshinKG@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper studies the influence of the scattered component of the wavefield on the full waveform inversion results. For different scenarios, the contribution of scattered waves was investigated. Utilizing the one step of the quasi-Newton FWI method, we demonstrate that scattered wavefields bring helpful information in the context of the solution of the inverse dynamical problem.

Keywords: scattering, FWI, SVD, Hessian pseudo-inversion

Введение

Метод обращения полного волнового поля (FWI, от англ. Full Waveform Inversion) является процедурой построения глубинных скоростных моделей высокого разрешения [1]. Однако вплоть до настоящего времени слабо изучено влияние и вклад рассеянной компоненты волнового поля на результат обращения. Теоретически [2] разрешающая способность метода при использовании рассеянных волн должна быть выше. В недавней работе [3] на простом модельном примере было показано, что привлечение дифрагированных волн повышает разрешающую способность метода.

При стандартной обработке сейсмических данных получаемая глубинно-скоростная модель ориентирована на качественный результат миграции отражённых волн. При этом результат построения изображений по рассеянным волнам в такой модели не всегда достаточно сфокусирован. Поэтому чтобы повысить качество дифракционных изображений необходимо уточнить миграционную модель, для чего и предполагается использовать FWI.

Метод

Метод обращения полного волнового поля заключается в минимизации целевого функционала, равного норме невязки между наблюдаемыми и моделируемыми данными:

$$E(m) = \|F(m) - d^{obs}\|_D^2, \quad (1)$$

где $F: M \rightarrow D$ нелинейный оператор прямой задачи, ассоциированный с решением волнового уравнения и взятием следа полного волнового поля в позициях приемников. В данной работе в качестве управляющих уравнений использовалось 2D уравнение Гельмгольца.

Пусть мы имеем оператор выделения рассеянной компоненты волнового поля $P_{diff}: D \rightarrow D$. Для простоты будем считать, что этот оператор линейный и самосопряженный. Тогда модифицированная постановка FWI, ориентированная на использование рассеянной компоненты будет иметь следующую целевую функцию:

$$\tilde{E}(m) = \|P_{diff}F(m) - P_{diff}d^{obs}\|_D^2. \quad (2)$$

В этих обозначениях градиент $\nabla \tilde{E}(m)$ модифицированного функционала имеет вид:

$$\nabla \tilde{E}(m) = -Re \left(\frac{\delta F}{\delta m} (m)^* (P_{diff}F(m) - P_{diff}d^{obs}) \right). \quad (3)$$

Результаты

Все рассмотрения будут проводиться на примере модели продольных скоростей Marmousi2, представленной на рисунке 1. Для этой модели и двух её модификаций (см рис. 1C, 1D) было выполнено конечно-разностное моделирование волнового поля в области временных частот для системы многократного перекрытия со следующей геометрией расположения источников и приёмников: 320 источников типа точка располагались на линии $z=0$ м начиная с точки с координатой 500 м с равномерным шагом равным 50 м. Для каждого источника использовалась регулярная расстановка приёмников (измерялось давление) с регулярным шагом между ними равным 25 м и максимальным абсолютным выносом 6000 м (на краях система наблюдения была неполная и обрезалась по границе скоростной модели).

Мы провели два численных эксперимента. В каждом эксперименте мы полагали, что правильная скоростная модель, есть модель, полученная добавлением конечного числа точечных дифракторов (рис. 1C, 1D) к модели, изображенной на рисунке 1A. Таким образом, рассеянная компонента полного волнового поля есть разница решений волнового уравнения, рассчитанного в модели с дифракторами и в модели без них (см. рис. 2). В терминах решения обратной задачи мы можем полагать, что на первом шаге обращения невязка $P_{diff}F(m) -$

$P_{diff}d^{obs}$ строится без какого-либо явного задания оператора P_{diff} . Здесь стоит отметить, что после первого шага обращения выделение рассеянной компоненты уже будет невозможно без явного построения оператора P_{diff} . Поэтому мы сконцентрируемся на получении максимума информации за один шаг нелинейного метода наименьших квадратов. Для это мы прибегнем к методу Ньютона, который гласит, что выбор направления обновления модели должен быть такой, чтобы градиент, рассчитанный в обновленной модели, был равен нулю (мы достигли экстремальное значение): $\nabla \tilde{E}(m + dm) = 0$. Что приводит нас к следующему выражению:

$$H(m)dm = -\nabla \tilde{E}(m), \quad (4)$$

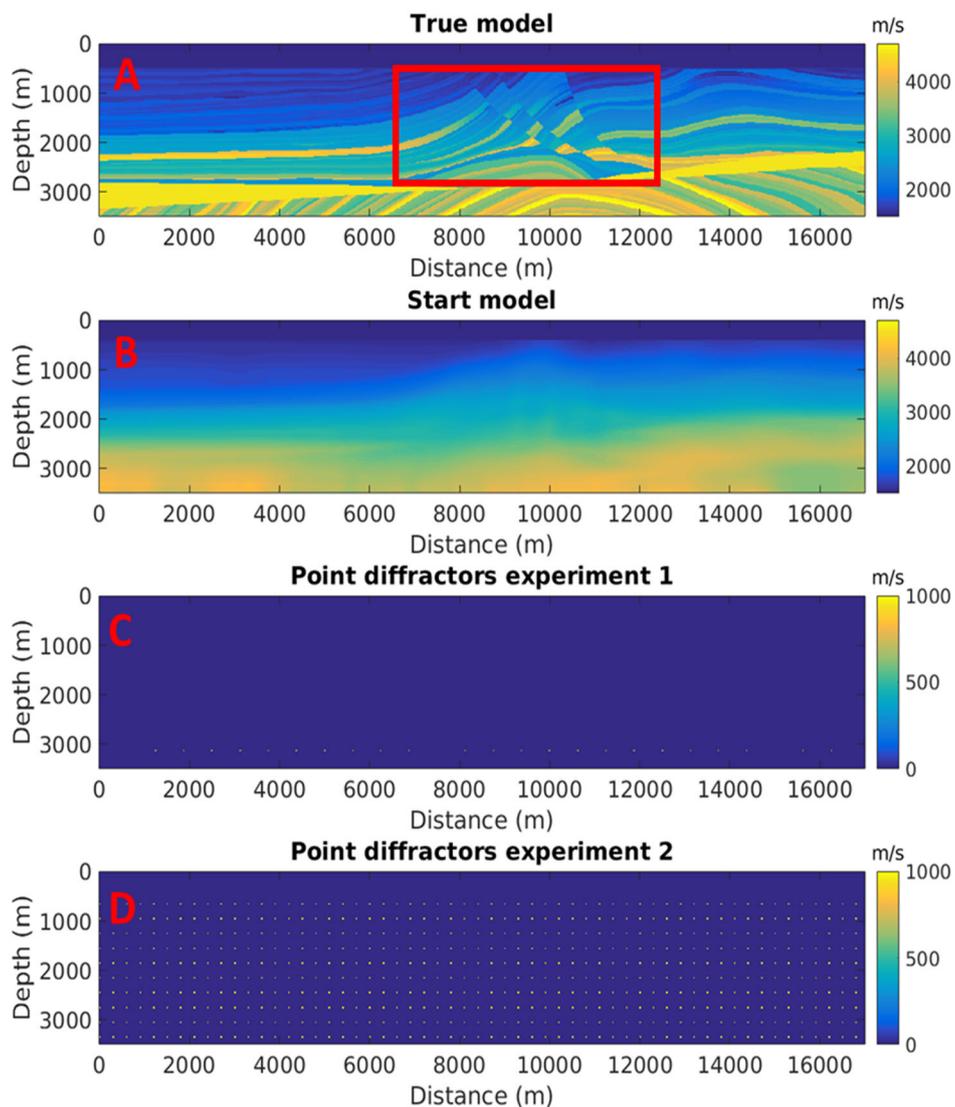


Рис. 1. Модель продольных скоростей Marmousi2 (A), стартовая модель нелинейного метода сопряженных градиентов при решении обратной динамической задачи (B) и два сценария расположения точечных дифракторов: на глубине 3100 м (C) и равномерно по всей скоростной модели (D). Целевая область для обращения изображена красным прямоугольником

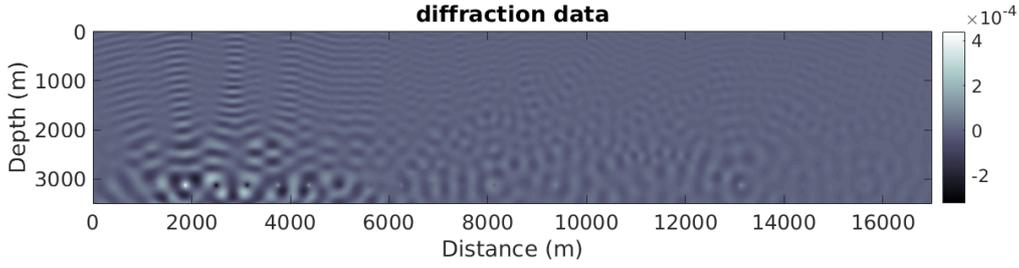


Рис. 2. Рассеянная компонента полного волнового поля для частоты 10 Гц в модифицированной модели Marmousi2, связанная с наличием точечных дифракторов, расположенных на глубине 3100м (см. рис. 1С). Источник расположен в точке $x=2800$ м

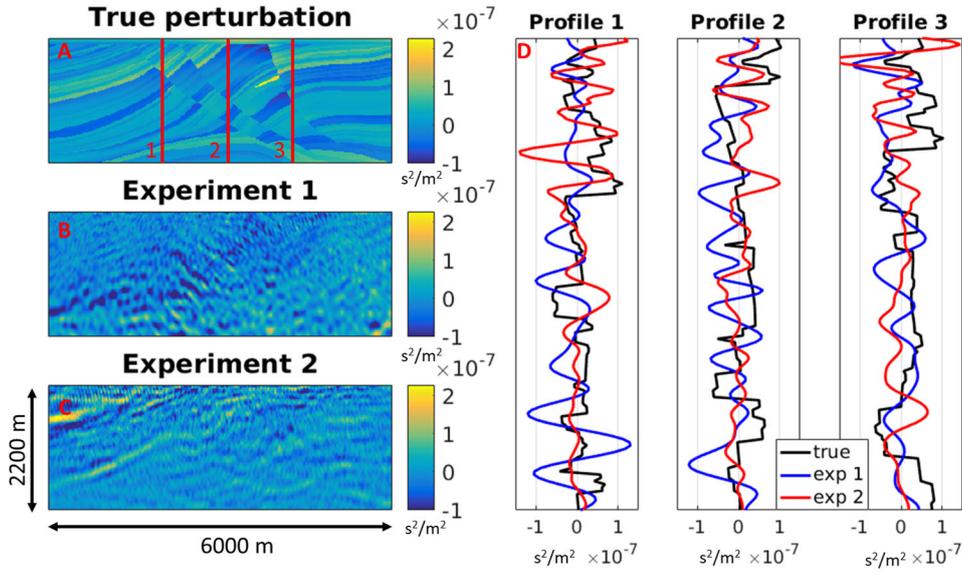


Рис. 3. Искомое возмущение модели (A), результаты обращения для эксперимента 1 (B) и эксперимента 2 (C). Справа (D) изображены вертикальные профили, соответствующие позициям, отмеченным красными линиями на графике слева (A): черным – искомое возмущение, синим и красным – восстановленные возмущения в экспериментах 1 и 2 соответственно

где $H(m)$ это Гессиан целевого функционала (2). Аппроксимация Гессиана путем пренебрежения слагаемыми, включающими вторую производную оператора моделирования, приводит нас к следующему выражению для обновления модели:

$$dm_r = - \left(\frac{\delta F}{\delta m} (m) \frac{\delta F}{\delta m} (m)^* \right)_r^{-1} \nabla \tilde{E}(m), \quad (5)$$

где $\left(\frac{\delta F}{\delta m} (m) \frac{\delta F}{\delta m} (m)^* \right)_r^{-1}$ г-псевдообратный оператор [4], действие которого мы будем вычислять через сингулярное разложение первой производной Фреше $\frac{\delta F}{\delta m} (m)$ [5].

Решение обратной задачи в рамках модифицированного метода Ньютона строилось для группы временных частот [5, 7, 14, 20] Гц. Параметризация скоростной модели – величина равная квадрату медленности. В первом эксперименте исследовалось влияние только глубинных точечных дифракторов (рис. 1С), в то время как во втором эксперименте во всю модель (за исключением верхнего слоя воды толщиной 500м) были добавлены точечные рассеиватели. Восстановленные по формуле (5) модели представлены на рисунке 3. Как можно видеть, даже привлечение только рассеянной компоненты в процесс обращения, несет в себе информацию о строении среды. В случае использования только глубинных дифракторов результат имеет слабую разрешенность, в то время как привлечение большего числа рассеивателей увеличивает качество решения обратной задачи.

Заключение

В работе исследован вклад рассеянной компоненты полного волнового поля на результаты метода FWI. Для двух сценариев обращения был продемонстрирован вклад рассеянных волн в решение обратной динамической задачи. Для случая с глубинными точечными дифракторами разрешающая способность метода низкая. В случае, когда точечные рассеиватели равномерно расположены по всей модели разрешающая способность метода повышается. Стоит отметить, что был исследован лишь один шаг нелинейного метода наименьших квадратов. Дальнейшие исследования направлены на построение оператора выделения дифракционной компоненты в данных, с тем чтобы стало возможным реализовать несколько нелинейных итераций обращения.

Благодарности

Данное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда грант №21 71 20002. Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (scc.spbstu.ru).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // *Geophysics*. – 2009. – Vol.74. – WC11-W26.
2. Khaidukov V., Landa E., Moser T.J. Diffraction imaging by focusing-defocusing: An outlook on seismic superresolution // *Geophysics*. – 2004. – Vol.69. – P.1478-1490.
3. Dell S., Abakumov I., Znak P., Gajewski D., Kasthan B., Ponomarenko A. On the role of diffractions in velocity model building: a full-waveform inversion example // *Studia Geophysica et Geodaetica*. – 2019. – №63. – P.538–553.
4. Cheverda V.A., Kostin V.I. R-pseudoinverses for compact operators in Hilbert spaces: existence and stability // *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*. – 1995. – Vol. 3. – №2. – P. 131-148.
5. Gadylyshin K., Bakulin A., Dmitriev M., Golikov P., Neklyudov D., Tcheverda V. Effect of free-surface related multiples on near surface velocity reconstruction with acoustic frequency domain FWI // 76th EAGE expanded abstracts. – 2014. – P.1-5

© К. Г. Гадильшин, М. И. Протасов, 2022