



РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОДАВЛЕНИЯ КРАТНЫХ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ РАЗЛОЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО ВОЛНОВЫМ ПАКЕТАМ

А.М. Камашев¹, А.А. Дучков^{1,2}, Г.С. Чернышов¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: KamashevAM@ipgg.sbras.ru

В данной работе представлен алгоритм подавления кратных волн на основе разложения сейсмических данных по волновым пакетам. В основу алгоритма входят высокоразрешающее преобразование Радона и преобразование по Гауссовым волновым пакетам. Высокорастворительное преобразование Радона позволяет разделить однократно и многократно отраженные волны за счет повышенной разрешенности преобразования в сравнении со стандартным подходом. После выделения кратных волн в области Радона ставится задача их корректного вычитания из исходной сейсмической записи. Разложение по Гауссовым волновым пакетам позволяет адаптивно вычитать кратные отраженные волны из сейсмической записи, в том числе и в зонах интерференции без потери целевого сигнала. Тестирование алгоритма проводилось на синтетических и реальных данных. Тестирование показывает эффективное подавление кратных волн, сравнимое с методами, использующимися в ПО для обработки сейсморазведочных данных.

Высокорастворительное преобразование Радона; Гауссовы волновые пакеты; кратные волны

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR THE SUPPRESSION OF MULTIPLE BASED ON THE DECOMPOSITION OF SEISMIC DATA INTO WAVE PACKETS

A.M. Kamashev¹, A.A. Duchkov^{1,2}, G.S. Chernishov¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: KamashevAM@ipgg.sbras.ru

This paper presents a multiple suppression algorithm based on the decomposition of seismic data into wave packets. The algorithm is based on high-resolution Radon transform and Gaussian wave packets transform. High-resolution Radon transform allows you to separate single and multiple reflected waves due to the increased resolution of the transformation in comparison with the standard approach. Having selected multiples in the Radon region, the task is set to correctly subtract them from the original seismic record. Decomposition into Gaussian wave packets allows adaptive subtraction of multiple reflected waves from a seismic record, including those in interference zones, without losing the target signal. The algorithm was tested on synthetic and real data. Testing shows effective multiple attenuation comparable to those used in seismic data processing software.

High-resolution Radon transform; Gaussian wave packets; multiple

ВВЕДЕНИЕ

Сейсморазведка методом отраженных волн позволяет строить геологические структуры по данным однократно отраженных волн. Однако сейсмическая запись, получаемая в ходе полевых работ, помимо полезного сигнала также содержит в себе помехи, затрудняющие интерпретацию сейсмограмм. Перед интерпретацией сейсмические данные отправляются на предварительную обработку для подавления волн помех и случайного шума. Одним из типов волн-помех являются многократно отраженные волны – волны, совершившие два или более отражений от границ раздела геологических сред, включая поверхность Земли. Затрудняющим фактором при обработке является трудная различимость между кратными и однократными волнами по динамическим и кинематическим показателям [Боганик, Гурвич, 2006].

Подавление кратных волн является традиционной и актуальной задачей сейсморазведки на протяжении длительного времени. Высокая активность при решении рассматриваемой задачи была в 70–80 гг. XX в. На первых этапах ее решение строилось с применением аналоговых фильтров, которые подавляли реверберацию и волны-спутники [Гольдин, 1974]. Также развивались методы пространственного подавления однократных и двукратных волн-помех с применением многоканальной фильтрации [Гольдин, 1974]. Многоканальная фильтрация заключается в использовании математической модели, учитывающей отраженные волны вплоть до двукратных от наиболее резкой верхней границы. Подобная модель позволяет выделить полезный сигнал, совокупность однократных волн и наиболее интенсивных кратных от других границ и случайные помехи.

На данный момент можно выделить пять основных методов подавления кратных волн:

- 1) метод суммирования [Воскресенский, 2006];
- 2) фильтрация в области Радона, где хорошо различимы однократные и кратные волны [Verschuur, 2013];
- 3) метод предсказывающей деконволюции [Yilmaz, 2001];
- 4) метод WEMR (wave equation multiple rejection) [Dondurur, 2018];
- 5) метод SRME [Verschuur, 2013].

В данной работе представлен алгоритм, основанный на фильтрации в области Радона, однако вместо адаптивного вычитания кратных с помощью сверточных фильтров [Verschuur, 2013], подавление волн-помех производится с помощью применения преобразования по Гауссовым волновым пакетам [Никитин и др., 2013]. Основным требованием к данным для удаления кратных волн этим методом является различие кинематических характеристик у кратных и однократных волн, достаточное для их разделения на скоростных спектрах.

МЕТОД

Предлагаемый метод подавления кратных волн основан на двух преобразованиях сейсмической записи: 1) высокоразрешающее преобразование Радона для получения модели кратных волн; 2) преобразование по волновым пакетам для подавления кратных волн в области пакетов.

Высокоразрешающее преобразование Радона. Различие волн однократно и многократно отраженных от геологических границ по кинематическим параметрам позволяет разделить их в области гиперболического Радона. Для лучшего разделения волн вместо обычного преобразования Радона может

использоваться его модифицированный аналог – высокоразрешающее преобразование Радона [Verschuur, 2013]. Суть данного преобразования состоит в минимизации функционала:

$$J(m) = \|d - L^H m\|_2^2 + \lambda^2 \|m\|_1, \quad (1)$$

где L^H – оператор сопряженного преобразования Радона, d – сейсмические данные, m – результат применения прямого преобразования Радона к d , λ – стабилизирующий коэффициент. Второе слагаемое отвечает за корректировку амплитуд в области Радона. Высокорастворяющее преобразование Радона минимизирует разницу между исходными данными и данными после сопряженного преобразования Радона. Иными словами, оно позволяет намного лучше восстанавливать исходную сейсмическую картину (рис. 1). Тем не менее, полностью исходную картину восстановить не удастся. В данном случае погрешность составила 6.53 %.

Несмотря на то что изучаемые годографы отраженных волн больше напоминают гиперболические траектории, на практике зачастую используют параболическое преобразование из-за значительного сокращения времени вычислений

$$m(p, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, t = \tau + p^2 x^2) dx. \quad (2)$$

В матричном виде эту формулу можно представить как

$$m = Lg, \quad (3)$$

где L – оператор прямого преобразования Радона. Использование параболического преобразования обусловлено линейной зависимостью между временем t и временем пересечения τ оператора параболического преобразования, что позволяет эффективно вычислять параболическое преобразование Радона через частотную область:

$$M(p, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(x, f) e^{-j2\pi f p x^2} dx, \quad (4)$$

где M – образ m в Фурье-области. Преобразование Радона может быть вычислено для каждой частотной составляющей, а применяя обратное преобразование Фурье, можно вернуться к временному параметру [Verschuur, 2013]. Как уже говорилось выше, недостатком параболического преобразования является тот факт, что сейсмические отражения обычно имеют гиперболическую форму. Однако решается данная проблема путем введения кинематических поправок с константной скоростью перед применением параболического преобразования Радона [Verschuur, 2013].

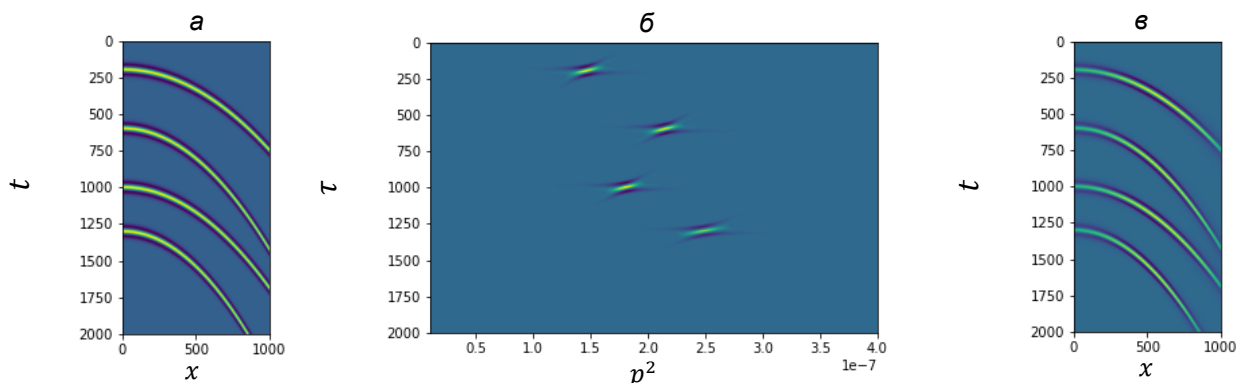


Рис. 1. Прямое и сопряженное образование Радона: а – исходные данные; б – высокоразрешающий спектр Радона; в – восстановленные данные

Разложение сейсмических данных по волновым пакетам. Несмотря на то что высокоразрешающее преобразование Радона позволяет более точно разделять однократные и кратные волны в области Радона, полученная модель кратных волн не является идеальной. Этот факт приводит к невозможности прямого вычитания кратных волн. Поэтому для подавления кратных волн используют процедуру адаптивного вычитания [Verschuur, 2013]. Помимо адаптивного вычитания также используют процедуры разложения сейсмической записи по базисным функциям с последующим вычитанием кратных волн.

Будем рассматривать сейсмические данные, полученные в результате полевых работ, как пространственно-временную функцию, которая может быть представлена в виде набора базисных функций [Никитин и др., 2013]. Зачастую используют в виде базисных функций кервлеты. Так, например, в [Neelamani et al., 2010] описывается адаптивное вычитание в области кервлетов. В данной работе используются Гауссовы волновые пакеты, обладающие рядом преимуществ по сравнению с распространенными аналогами, используемыми в большинстве ПО для обработки сейсмических данных (см. обсуждение в [Duchkov et al., 2012]).

Ключевой особенностью преобразования для нашей задачи является тот факт, что с его помощью мы можем разделять целевые и кратные отражения, в том числе и в области интерференции [Duchkov et al., 2012].

Идея разложения по волновым пакетам состоит в том, что мы можем представить нашу дискретную функцию $f(x)$ в виде набора коэффициентов $\{c_\gamma\}$, параметризованных мультииндексом γ :

$$C: f(x) \rightarrow \{c_\gamma\}, \text{ таких, что } f(x) = \sum_\gamma c_\gamma \varphi_\gamma(x), \quad (5)$$

где x – координаты в пространстве, φ_γ – базисные функции волновых пакетов, определяемые в пространстве следующим образом:

$$\varphi_\gamma(x) = e^{2\pi i k(x-y)} e^{-(x-y)^T R_\theta^T L(\alpha, \beta, k) R_\theta (x-y)}, \quad (6)$$

$$L(\alpha, \beta, k) = \ln(16) \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2^2} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{L_1^2} = \|k\|^2 \alpha^{-2}; \quad \frac{1}{L_2^2} = \|k\|^2 (\alpha\beta)^{-2}, \quad (8)$$

где y – положение центра; k – вектор волновых чисел/масштаб; R_θ – матрица поворота на угол θ ; θ – ориентация/поворот; α – количество осцилляций в пределах полуширины; β – отношение длины пакета к его ширине [Никитин и др., 2017].

Основное предположение разложения сейсмических данных по Гауссовым волновым пакетам заключается в том, что форма волновых пакетов довольно хорошо позволяет описывать сейсмические события [Никитин и др., 2013]. Так, например, на рис. 2 схематически изображено разбиение отраженной волны по волновым пакетам с различными положениями и ориентациями.

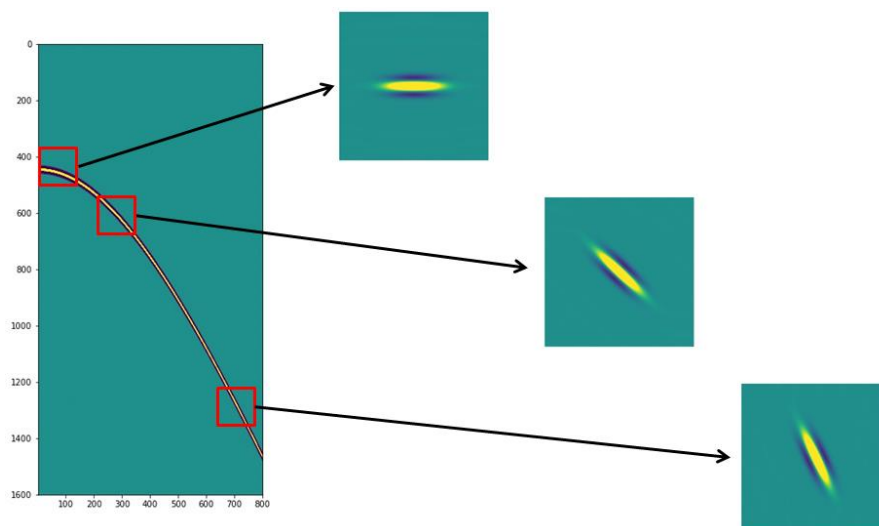


Рис. 2. Отраженная волна и наиболее подходящие волновые пакеты для разных участков

В предоставленной библиотеке разложения сейсмических данных по волновым пакетам было реализовано только сопряженное преобразование. Для корректного перехода во временную область будем использовать корректирующий фильтр, предложенный в [Никитин и др., 2017]. Схема построения корректирующего фильтра состоит из нескольких этапов:

1. Необходимо задать единичный импульс $g(x)$, такой, чтобы размеры $g(x)$ совпадали с размером $f(x)$.
2. Применить к $g(x)$ операторы прямого и сопряженного преобразования по волновым пакетам, получив $h(x)$.
3. Получить корректирующий фильтр по формуле: $H^{-1} = \frac{1}{H + \varepsilon}$, где H – Фурье-образ $h(x)$, а ε – стабилизирующий коэффициент.

Действие корректирующего фильтра представлено на рис. 3.

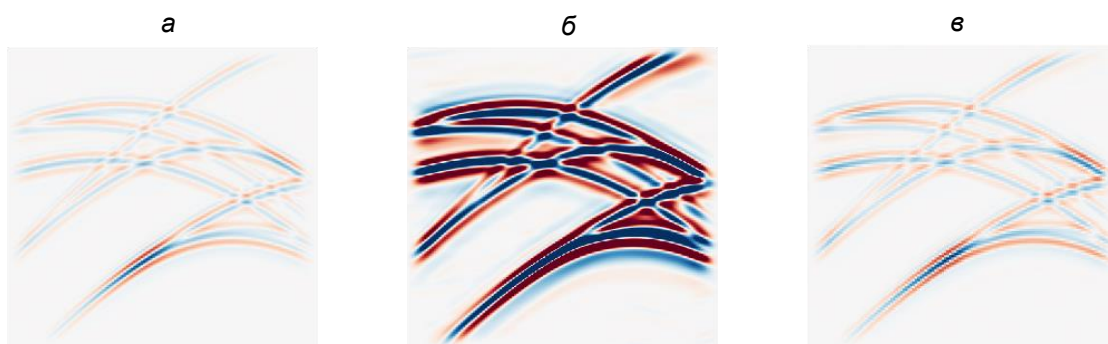


Рис. 3. Корректирующая фильтрация: а – исходные данные; б – сопряженное преобразование; в – результат применения корректирующего фильтра

Несмотря на то что мы применяем корректирующий фильтр, преобразование все еще не является полностью обратным, восстановление данных происходит с некоторой погрешностью. Разница среднеквадратичных амплитуд на рис. 3а и 3в составила 1.6 %.

Как уже говорилось выше, с помощью разложения по волновым пакетам можно разделять волны в области интерференции. Для тестирования этого свойства был проведен следующий синтетический

эксперимент: исходные данные содержат две плоские волны, пересекающиеся под углом 90° (рис. 4). За полезный сигнал принимается вертикальная волновая форма, а волной-помехой будет горизонтальная волновая форма.

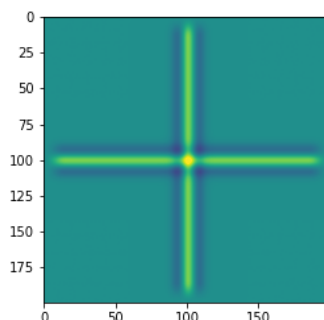


Рис. 4. Интерференция прямых волн

Как говорилось выше, каждую базисную функцию волновых пакетов описывает ряд параметров, одним из которых является наклон волнового пакета в пространстве. Поэтому применим разложение по волновым пакетам и построим график зависимости абсолютных значений коэффициентов от угла наклона пакетов (рис. 5). Для наглядности будем брать коэффициенты самого первого масштаба, т. к. они лучше всего описывают основную структуру картины (высокочастотный сигнал).

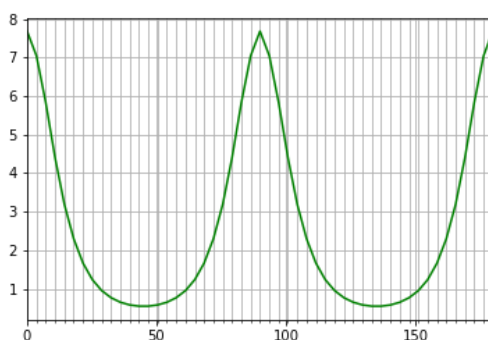


Рис. 5. График зависимости коэффициентов от угла наклона пакета

Как мы видим, наибольшие значения коэффициентов соответствуют углам $0, 90, 180^\circ$. Так как волна-помеха имеет горизонтальную волновую форму, то ей будут соответствовать большие значения коэффициентов для углов вблизи 0 и 180° . Поэтому удалим (присвоим значение ноль) всем коэффициентам, отвечающим за волну-помеху. Как видно на рис. 6, нам удалось подавить волну-помеху, в том числе в зоне интерференции.

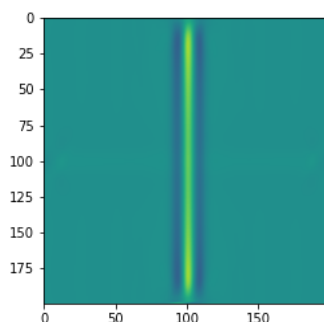


Рис. 6. Подавление плоской волны

Несмотря на полученный результат данное разложение имеет свой недостаток. На рисунке 5 видно, что после пикового значения коэффициенты начинают плавно уменьшаться с изменением угла, что может привести к проблемам при разделении волн с близкими значениями углов наклона. Экспериментальным путем было выявлено, что минимальный угол пересечения волн, при котором остается возможность подавлять волну-помеху без потери полезного сигнала, – 5° (рис. 7). Стоит отметить, что для более качественного удаления необходимо варьировать параметры пакета α (количество осцилляций) и β (отношение длины пакета к его ширине).



Рис. 7. Разделение плоских волн, пересекающихся под углом в 5° : а – исходная модель; б – результат подавления наклонной плоской волны

Подавление кратных волн. Ключевыми особенностями разрабатываемого подхода являются два преобразования, реализованные в виде библиотек с интерфейсом на Python: 1) высокоразрешающее преобразование Радона [Матвеев и др., 2016]; 2) разложение сейсмической записи на волновые пакеты [Никитин и др., 2017]. Выбор преобразований для задачи подавления кратных волн был сделан на основе двух предположений. Во-первых, высокоразрешающее преобразование Радона позволяет разделять кратные и однократные волны, годографы которых различимы по параметрам (t , p). Во-вторых, разложение по волновым пакетам позволяет с высокой точностью представить сейсмическую запись как суперпозицию элементарных волновых пакетов, что в свою очередь позволит разделить волны с различными кинематическими характеристиками, в том числе в зонах их интерференции. Сформулируем основные идеи алгоритма и разобьем их на несколько этапов.

Первый этап алгоритма состоит в получении модели кратных волн и производится в несколько шагов:

1. Применение высокоразрешающего преобразования Радона к исходной сейсмической записи.
2. Обнуление участков, соответствующих однократным волнам.
3. Сглаживание резких границ обнуления.
4. Использование сопряженного преобразования Радона.

Второй этап состоит в адаптивном вычитании модели кратных волн из сейсмической записи в области волновых пакетов. Подавление кратных волн проводится в несколько шагов:

1. Разложение модели кратных по волновым пакетам.
2. Формирование фильтр-маски путем подбора порогового значения обнуления коэффициентов. Фильтр-маска содержит в себе информацию о расположении кратных волн. Состоит из нулей и единиц. Ноль соответствует кратной волне, единица – однократной.

3. Разложение сейсмической записи по волновым пакетам.
4. Применение фильтр-маски к коэффициентам сейсмической записи.
5. Обратное преобразование по волновым пакетам.

Для наглядности изобразим каждый шаг алгоритма адаптивного вычитания. Будем рассматривать случай множественного отражения от первой границы. С помощью метода наложения одинаковой формы сигнала на годографы отраженных волн, полученных с помощью лучевого трассирования, получим сейсмограмму, однако для простоты примем амплитуды всех волн равными 1 (рис. 8). На сейсмограмме одна однократная волна (голубая стрелка) и три полнократных волны (красная стрелка).

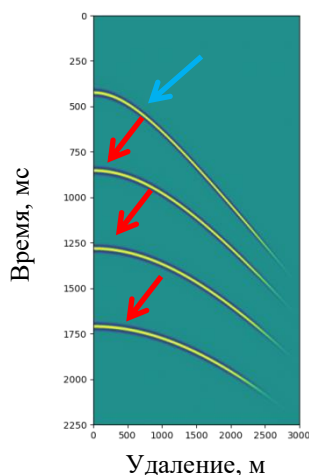


Рис. 8. Исходная сейсмограмма

Теперь нам необходимо из сейсмической записи получить модель кратных. Для этого применим высокоразрешающее преобразование Радона (рис. 9а), обнулим область, содержащую однократную волну (рис. 9б, область выше оранжевой линии), и применим сопряженное преобразование Радона (рис. 9в). Как видно на рис. 9в модель кратных отраженных волн даже визуально отличается от кратных волн на сейсмограмме.

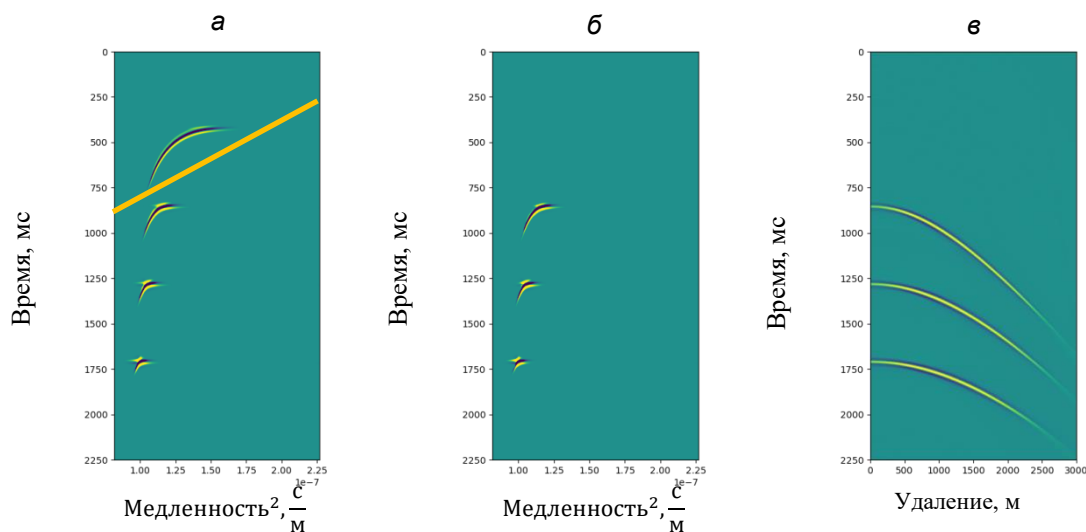


Рис. 9. Построение модели кратных волн в области высокоразрешающего Радона: а – спектр высокоразрешающего Радона; б – удаление волновых коэффициентов однократных волн; в – модель кратных волн

Теперь применим разложение по волновым пакетам для модели кратных волн (рис. 10а), определим пороговое значение коэффициентов и построим фильтр-маску (рис. 10б). Далее необходимо применить разложение по волновым пакетам, но уже для исходной сейсмической записи, применить фильтр-маску. После этого переходим в пространственно-временную область с помощью обратного преобразования. На рисунке 11 изображено сравнение сейсмической записи до удаления кратных волн и после.

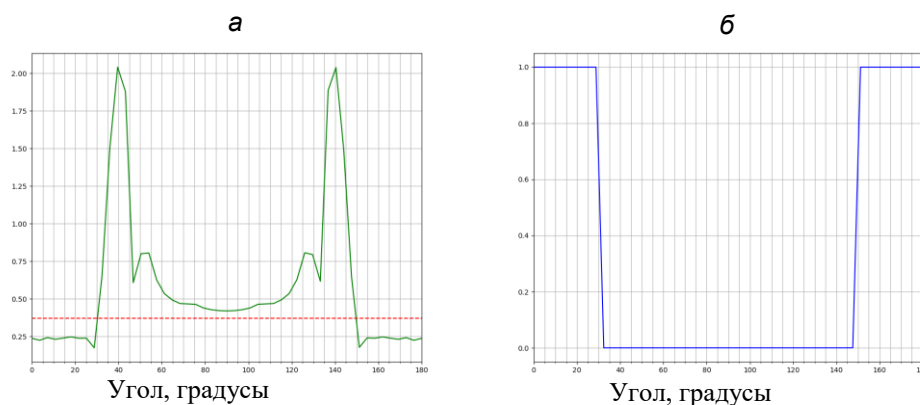


Рис. 10. Формирование фильтр-маски: а – определение порогового значения обнуления кратных волн; б – фильтр-маска, подавляющая кратные волны

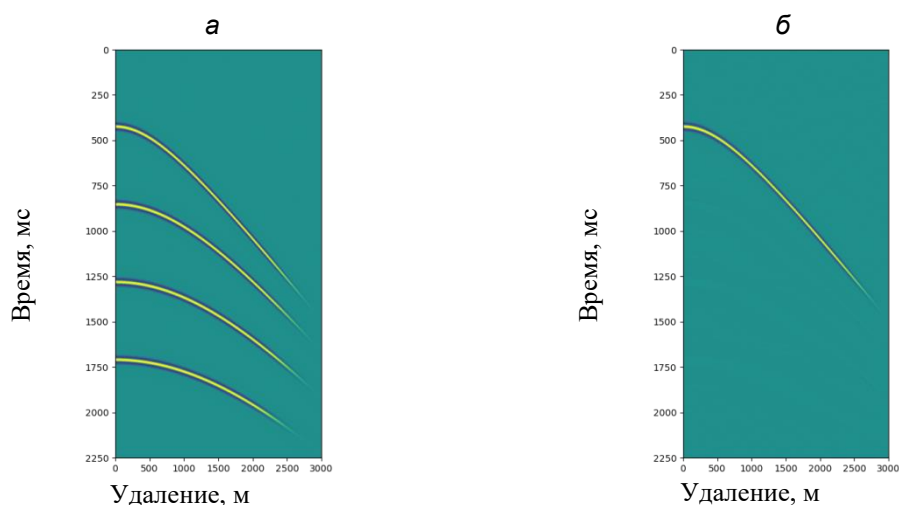


Рис. 11. Результат подавления кратных волн: а – исходная сейсмограмма; б – результат применения предложенного алгоритма

ТЕСТИРОВАНИЕ НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Рассматривается пример тестирования реализованного алгоритма на данных морской сейсморазведки. Исходная сейсмограмма изображена на рис. 12 (для наглядности будем рассматривать часть сейсмической записи на временах от 1600 до 2100 мс). Сейсмическая запись длиной 7000 мс, шаг дискретизации 2 мс, количество трасс 50. Нулевые удаления отсутствуют. Данные уже прошли основные этапы обработки, в том числе были введены кинематические поправки. Так как целевые отраженные волны соответствуют спрямленным осям синфазности, все волны, имеющие значительную кривизну гиперболы, интерпретируются как кратные, и ставится задача по их удалению из записи.

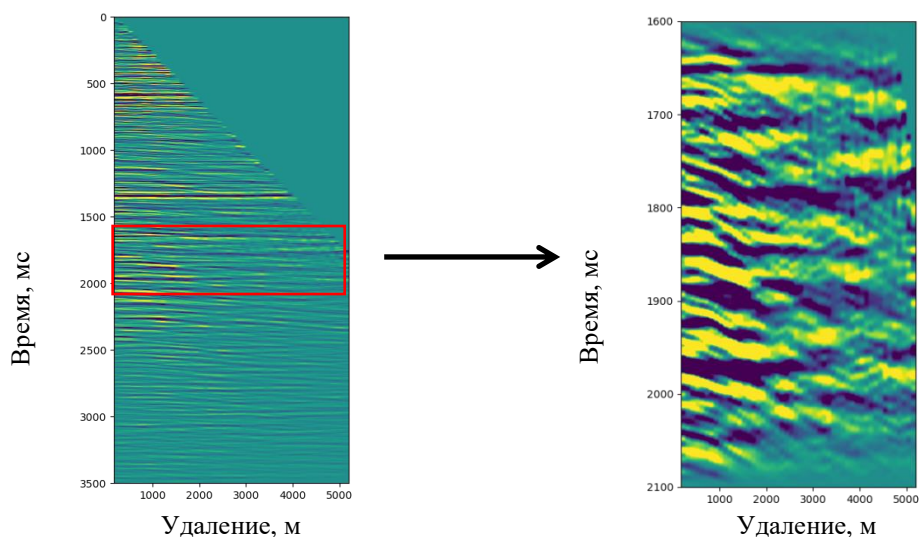


Рис. 12. Сейсмическая запись с предварительно введенной кинематической поправкой

Прямой горизонтальной волне соответствует бесконечная скорость суммирования, поэтому в области Радона спрямленным однократным отражениям будут соответствовать низкие значения медленности. Применив высокоразрешающее преобразование Радона (рис. 13а), получим картину, содержащую большое количество событий. Как видно, для такого количества событий становится трудно визуально разделять однократные и кратные отражения. Однако из сделанных выше предположений, обнуляем интенсивные сейсмические события, для которых характерна низкая медленность (рис. 13б). После применения сопряженного преобразования Радона получим модель кратных волн, изображенную на рис. 13в.

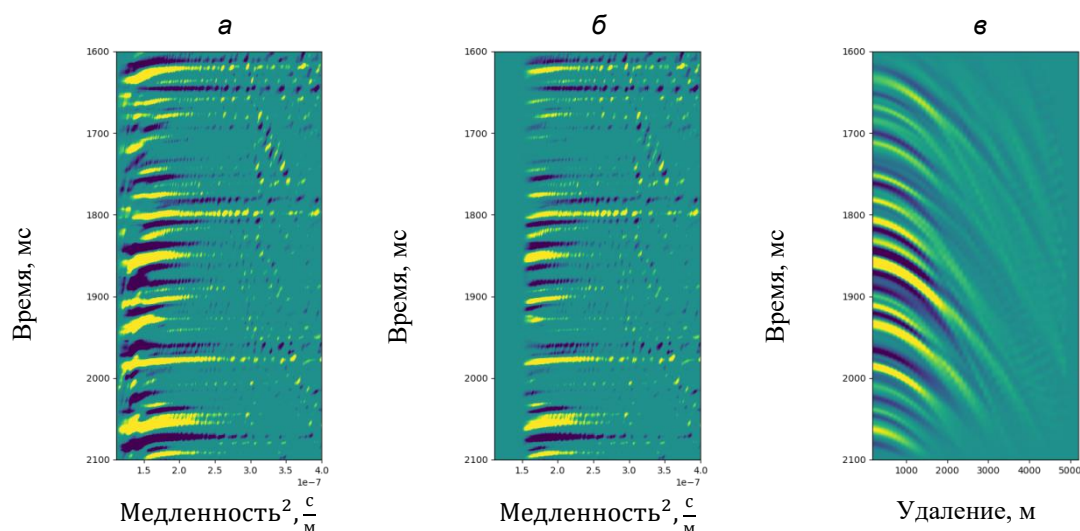


Рис. 13. Этапы построения модели кратных волн: а – результат высокоразрешающего преобразования Радона; б – выделение сигнала кратных отражений; в – сейсмограмма модели кратных волн

Результатом применения алгоритма адаптивного вычитания в области волновых пакетов является сейсмограмма, изображенная на рис. 14а. Вместе с реальными данными был получен результат подавления кратных волн в специализированном обрабатывающем ПО (рис. 14б). Разница среднеквадратичных амплитуд между результатом подавления кратных волн разработанным методом и в специализированном обрабатывающем ПО составляет 3.27 %.

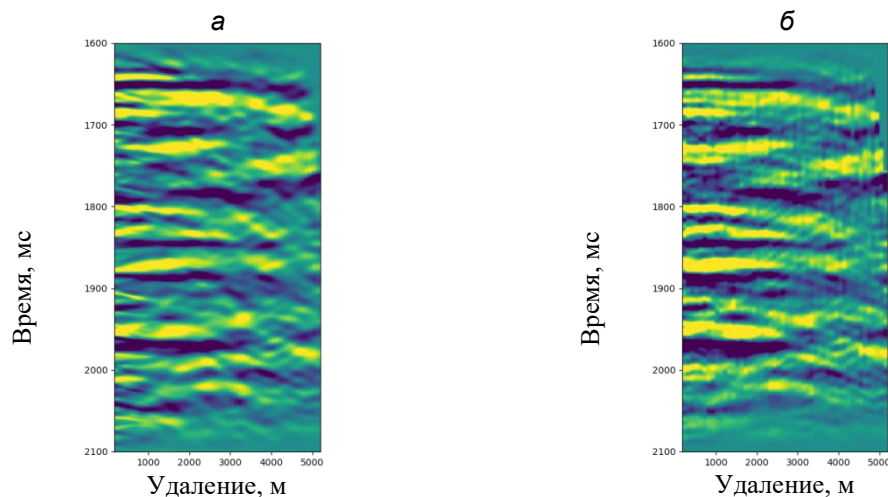


Рис. 14. Подавление кратных волн: а – результат применения алгоритма; б – результат вычитания в ПО обработки

Как можно заметить, в данных не прослеживаются негоризонтальные оси синфазности, что говорит о том, что удалось подавить кратные (не спрямленные) волны. Результат сопоставим по качеству с методами, использующимися в ПО для обработки сейсморазведочных данных.

ВЫВОДЫ

В данной работе приведен новый алгоритм подавления кратных волн, основанный на разложении сейсмических данных по Гауссовым волновым пакетам. Использование высокоразрешающего преобразования Радона позволило повысить разрешенность скоростного спектра, что облегчило выделение кратных волн на фоне однократных. Также переход в область волновых пакетов позволил корректно вычесть волновые формы сигналов, относящиеся к однократным и кратным волнам, в том числе в зонах интерференции. Тестирование на синтетических и реальных данных показало эффективность алгоритма для подавления кратных волн.

Экспериментальным путем был выявлен минимальный угол пересечения волн, при котором остается возможность подавлять волну-помеху без потери полезного сигнала, – 5° .

ЛИТЕРАТУРА

- Боганик Г.Н., Гурвич И.И.** Сейсморазведка. – Тверь: АИС, 2006. – 743 с.
- Воскресенский Ю.Н.** Построение сейсмических изображений. Учебное пособие для вузов. – М.: РГУ нефти и газа, 2006. – 116 с.
- Гольдин С.В.** Линейные преобразования сейсмических сигналов. – М.: Недра, 1974. – 351 с.
- Матвеев А.С., Никитин В.В., Дучков А.А., Романенко А.А.** Параллельная реализация параболического преобразования Радона на основе быстрого преобразования Фурье на нерегулярных сетках // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2016. – Т. 14, № 4. – С. 58–67.
- Никитин В.В., Дучков А.А., Романенко А.А., Андерссон Ф.** Параллельный алгоритм разложения функций по волновым пакетам для GPU и его применение в геофизике // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2013. – Т. 11, № 1. – С. 93–104.

- Никитин В.В., Дучков А.А., Андерссон Ф.** Применение Nvidia Cuda для ускорения обработки сейсмических данных при помощи разложения по волновым пакетам // Вычислительные методы и программирование. – 2017. – Т. 18, № 3. – С. 293–311, doi: 10.26089/NumMet.v18r326.
- Dondurur D.** Acquisition and processing of marine seismic data. – Elsevier, 2018. – 598 p.
- Duchkov A.A., Andersson F., Ojala R.** Prestack shot-gather depth migration by a rigid flow of Gaussian wave packets // *Studia Geophysica et Geodaetica*. – 2012. – Vol. 56. – P. 83–106, doi: 10.1007/s11200-010-0075-x.
- Neelamani R., Baumstein A., Ross W.S.** Adaptive subtraction using complex-valued curvelet transforms // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75 (4) – P. V51–V60, doi: 10.1190/1.3453425.
- Verschuur D.J.** Seismic multiple removal techniques: past, present and future. – EAGE Publications, Houten, 2013. – 300 p.
- Yilmaz Ö.** Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. – SEG, 2001. – 2065 p., doi: 10.1190/1.9781560801580.

REFERENCES

- Boganik G.N., Gurvich I.I.** Seismic prospecting [in Russian]. – AIS, Tver, 2006. – 743 p.
- Dondurur D.** Acquisition and processing of marine seismic data. – Elsevier, 2018. – 598 p.
- Duchkov A.A., Andersson F., Ojala R.** Prestack shot-gather depth migration by a rigid flow of Gaussian wave packets // *Studia Geophysica et Geodaetica*. – 2012. – Vol. 56. – P. 83–106, doi: 10.1007/s11200-010-0075-x.
- Goldin S.V.** Linear transformations of seismic signals [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1974. – 351 p.
- Matveev A.S., Nikitin V.V., Duchkov A.A., Romanenko A.A.** Parallel implementation of the parabolic Radon transform based on the fast Fourier transform on irregular grids // *NSU Bulletin. Series: Information Technology*. – 2016. – Vol. 14 (4). – P. 58–67.
- Neelamani R., Baumstein A., Ross W.S.** Adaptive subtraction using complex-valued curvelet transforms // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75 (4) – P. V51–V60, doi: 10.1190/1.3453425.
- Nikitin V.V., Duchkov A.A., Romanenko A.A., Andersson F.** Parallel algorithm for the expansion of functions in wave packets for GPU and its application in geophysics // *NSU Bulletin. Series: Information Technology*. – 2013. – Vol. 11 (1) – P. 93–104.
- Nikitin V.V., Duchkov A.A., Andersson F.** Application of Nvidia Cuda to accelerate seismic data processing using wave packet decomposition // *Computational Methods and Programming*. – 2017. – Vol. 18 (3). – P. 293–311, doi: 10.26089/NumMet.v18r326.
- Verschuur D.J.** Seismic multiple removal techniques: past, present and future. – EAGE Publications, Houten, 2013. – 300 p.
- Voskresensky Yu.N.** Seismic Imaging. Textbook for universities. – RSU of Oil and Gas, Moscow, 2006. – 116 p.
- Yilmaz Ö.** Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. – SEG, 2001. – 2065 p., doi: 10.1190/1.9781560801580.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КАМАШЕВ Александр Максимович – сотрудник лаборатории динамических проблем Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разложение сейсмических

изображений по волновым пакетам, методы подавления кратных отраженных волн, методы решения прямой задачи сейсморазведки.

ДУЧКОВ Антон Альбертович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическая миграция; регуляризация сейсмических данных с помощью Гауссовских волновых пакетов, микросейсмический мониторинг гидроразрыва.

ЧЕРНЫШОВ Глеб Станиславович – младший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическая лучевая томография, обработка данных вибрационной сейсморазведки, контроль качества сейсмических данных.

*Статья поступила в редакцию 7 сентября 2021 г.,
принята к публикации 6 ноября 2021 г.*