

Влияние предобработки на сейсмический снос во временной области: исследования Северного моря. Effects of pre-processing on reverse time migration: a North Sea study

Ian F. Jones*

Резюме

Почти вся традиционная предобработка задумана, имея в виду распространение волны в одном направлении. Если мы учтем существование волн, возникающих при двустороннем распространении, то необходимо пересмотреть многие предположения, лежащие в основе поведения приращения времени, которые подразумеваются в некоторых методиках предобработки. Используя 2D синтетические данные, мы продемонстрируем, что поведением приращения времени для прихода отражений внутри толщи от вертикальной неоднородности и границы слоя, т.е. *double bounce* (далее DB) (класса волн, распространяющихся туда и обратно) можно пренебречь с помощью предобработки, направленной на подавление волн, проявляющих аномальное поведение приращения времени. Эти наблюдения представляют интерес, поскольку теперь мы начинаем применять схемы двусторонней миграции для отображения сложных структур. Однако если мы продолжаем использовать традиционные методики предобработки, мы рискуем убрать те волны, которые хотим отобразить. Наблюдения, сделанные на основе синтетических модельных данных, в данной работе распространяются на реальные примеры с Северного моря, где в центральном грабене имеются соляные диапировые крутопадающие купола протыкания, которые являются хорошими кандидатами на образование DB отражений и изображение которых можно получать, используя сейсмический снос во временной области.

Введение

Скорость и рентабельность современных компьютерных систем теперь позволяют внедрять все больше общих алгоритмических решений волнового уравнения (Whitmore, 1983; Baysal et al., 1983; McMechan, 1984; Bednar et al., 2003; Yoon et al., 2003; Shan & Biondi, 2004; Zhou et al., 2006; Zhang et al., 2006). Ограничение на распространение в одном направлении может быть снято, а данные могут быть мигрированы с учетом преимущества более сложных путей распространения, таких как лучи рефрагированных волн, вступления волн, которые претерпевают отражение внутри толщи от вертикальной неоднородности и границы слоя и, потенциально, кратных (Mittet, 2006). Однако, для того, чтобы воспользоваться преимуществами этих улучшенных алгоритмов, мы должны убедиться в том, что мы, никоим образом, не жертвуем качеством входных данных в алгоритм миграции. А именно, в данной работе мы обращаемся к поведению приращения времени волн DB (Hawkins et al., 1995; Bermtsas et al., 1997; Cavalca & Lailly, 2005), и отмечаем, сколько традиционных алгоритмов предобработки могут повредить этим вступлениям, что сделает любую последующую высококачественную миграцию поверхностной.

Начнем наш анализ с обзора выводов предыдущих работ с синтетическими данными (Jones, 2008, готовится в печать), где обсуждалось поведение приращения времени рефрагированных волн (Hale et al., 1992) и простых DB (которые также некоторые авторы называют 'призматическими волнами'). Для более удобной демонстрации, прежде всего мы будем использовать пакет трассирования лучей, с помощью которого мы сможем моделировать отдельные выбранные вступления, а позже создадим более сложные синтетические данные с использованием пакета конечных разностей в теории упругости (FD). Приводятся некоторые краткие детали этих пакетов.

После изучения поведения приращения времени для простых моделей, мы перейдем к модели, представляющей собой сложную структуру соляного купола в Северном море (Davison et al., 2000; Thomson, 2004; Farmer et al., 2006). Мы продемонстрируем эффект различных

традиционных этапов предобработки на вступления DB, и пронесем эти данные через миграцию с использованием алгоритма 2D сейсмического сноса (RTM), который способен отобразить DB. Затем мы распространим этот анализ и демонстрацию синтетических данных 2D на реальные данные, на которых мы видим схожие классы осей синфазности и такое же ослабление DB, как показано на синтетических тестах.

Программа работы

Используя систему моделирования 2D на основе рабочей станции, мы генерируем данные синтетические OCT для контроля при идентификации различных типов вступлений. Начальное построение данных и анализ были выполнены для простой геометрии, а затем было произведено повторное моделирование для сложной модели соляного диапира в Северном море (шаг дискретизации 2 мс, пиковая частота-35 Гц, интервал между ПВ 50 м, интервал между OCT 6.25 м, 6 км максимальное удаление).

Затем мы построили более 'реалистичную' сейсмограмму ОПВ на основе упругого метода FD для сложной модели соляного диапира в Северном море. Эти смоделированные данные включали условие затухания на поглощающей границе, использовалась та же модель вертикальной интервальной скорости, как и в модели трассирования лучей для данных 1 мс (передискретизированных на 4 мс для обработки), и пиковая частота -17 Гц. В данной работе мы использовали поглощающую поверхность; таким образом, данные FD не содержат кратных волн от свободной границы (тогда как данные трассирования лучей содержат). В явной форме код 2D/3D распространения упругой волны имеет 4-ый порядок точности в пространстве и 2-ой порядок точности во времени, и основан на упруго-динамической формулировке волнового уравнения на смещенной сетке (Madariaga, 1976; Vineux, 1986; Levander, 1988; Larsen & Gneger, 1998).

Мы выполнили предобработку данных FD с помощью потоков 'традиционной' обработки, которые, скорее всего, повредят волнам DB, включая этапы:

* ION GX Technology EAME, 180 High Street, Egham, Surrey TW20 9DY, UK.

- тау-пи мьютинг шума обратного рассеяния
- Подавление кратных с помощью преобразования Радона
- Подавление кратных со смещенной вершиной в области OCT (ASMA)

После каждого потока предобработки, мы применили 2D RTM и проверили сохранение вступлений DB (призматических волн) в получаемых изображениях. Во всех случаях, прямые вступления были подавлены в данных, которые были введены в процедуру RTM.

Моделирование

Мы начинаем работу с просмотра трех простых сценариев:

- Простой прямоугольный рефлектор
- Косоугольный рефлектор (непересекающиеся лучи)
- Косоугольный рефлектор (пересекающиеся лучи)

С использованием этой схемы, для геометрии с тупыми углами не наблюдается вступлений DB: нам бы потребовалось крайне большие удаления и большие времена прихода.

Эти три сценария показаны на Рисунке 1. Ясно, что поведение приращения времени не удовлетворяет тому, что мы

ожидаем увидеть для траектории нормального луча, что можно отмигрировать с использованием алгоритма с пробегом в одну сторону, но более близко к тем осиам синфазности, которые получаются в результате энергии рассеяния или дифрагированных кратных. Мы знаем, что для простых цилиндрических моделей квази-ID все соосно зарегистрированные оси в сейсмограмме OCT будут проявляться с вершиной на нулевом удалении. Именно этим наблюдением руководствуются при построении различных методов подавления кратных и оно оправдывает мьютинг в тау-пи области в целях подавления энергии обратного рассеяния.

Теперь посмотрим на полный набор синтетических данных генерированный вдоль 2D плоскости гребня складки 3D модели, которая соответствует примеру с Северного моря, и продемонстрируем эффекты различных методик предобработки на примере этих данных. Для геометрии на Рисунке 2, у нас имеется:

- Однократное DB отражение от плоско-залегающего участка отражающей границы
- Однократное DB отражение от наклонной части этой отражающей границы
- Непересекающиеся лучи DB, которые включает траектории распространения по плоскому и наклонному участкам отражающей границы
- Пересекающиеся лучи DB, которые включает траектории распространения по плоскому и наклонному участкам отражающей границы (которые не показаны, чтобы избежать хаоса)

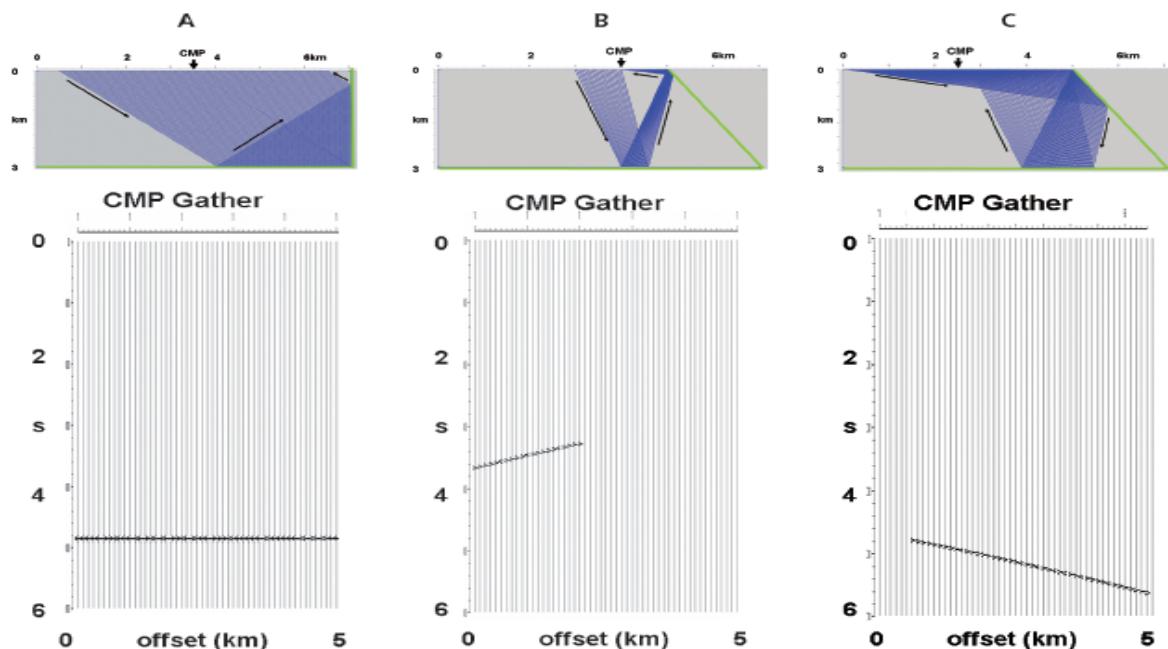


Рисунок 1 В каждом примере, горизонты модели показаны зеленым, а стрелки указывают направление распространения примерных траекторий лучей. Получаемая сейсмограмма OCT показана под каждой рамкой. (а) Время пробега до отражающей границы справа постоянно с удалением: т.е. нет кинематического сдвига. (б) острый угол, нет пересекающихся лучей. Вступления имеются только на ближних удалениях, и времена прихода уменьшаются с удалением. (с) острый угол, пересечение лучей. Вступления присутствуют на большинстве удалений и времена прихода увеличиваются с удалениями.

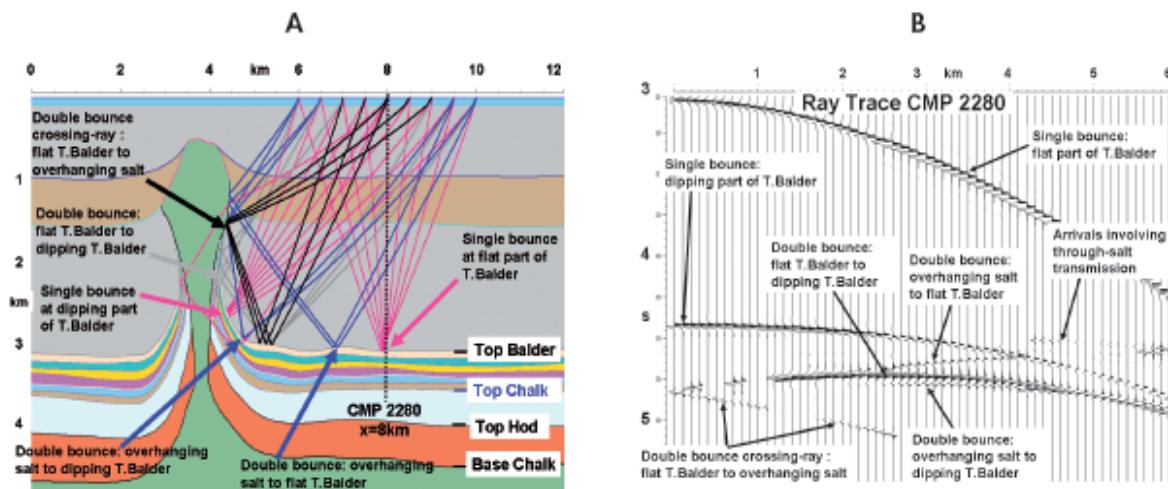


Рисунок 2 (а) Изображение нескольких неустойчивых систем лучей показано совместно с моделью интервальных скоростей. Скорость в осадках меняется в диапазоне от 1900 м с⁻¹ до 2200 м с⁻¹, присутствуют некоторые волны, возникающие в результате импеданс-контраста на малоглубинном участке. Отсутствие большого градиента в осадках препятствует образованию рефракционных волн, хотя большой градиент скорости уплотнения под верхней частью Balder и кровлей мела дают рефракцию. Скорость в соли (зеленым) равна 4500 м с⁻¹ и скорость в меле варьирует между 5500 м с⁻¹ и 6000 м с⁻¹. **(б)** Единичная сейсмограмма OCT для положения поверхности на 8 км.

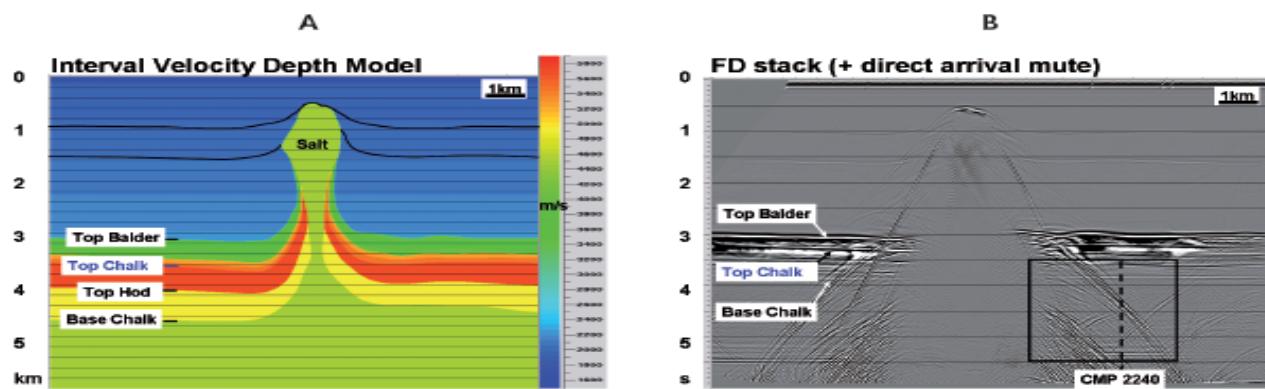


Рисунок 3 (а) Глубинная скоростная модель, указаны основные горизонты. **(б)** Предварительный разрез данных FD. Прямые волны были подвергнуты мьютингу.

■ Траектории лучей, которые проходят в соли с внутренним отражением на крутой стенке соли и вторичное DB вне соли от плоской или крутопадающей границы (которые здесь не рассматриваются, поскольку имеют крайне низкую амплитуду из-за коэффициентов прохождения в стенке соли)

Скоростная модель основана на 2D профиле в своде, который получен из реального примера 3D в Северном море (Farmer et al., 2006). Рабочий проект в данном случае характеризовался анизотропией, и использовал код VTI 3D RTM, но для простоты здесь мы используем 2D изотропное моделирование и 2D изотропное RTM.

На основе опытов по трассированию лучей, мы можем ясно видеть, какие из осей являются односторонними, а какие DB из освещивающих бортов соляного купола. Мы можем также идентифицировать класс волн, проходящих через само тело соли и освещивающих борт соляного тела, но они слабы ввиду импеданс контраста на границе с солью и не будут обсуждаться в работе. На рисунке 3

показана модель интервальной скорости и соответствующий суммарный разрез FD. Никакой скоростной анализ не выполнялся. Суммарный разрез был получен с использованием функции скорости RMS, соответствующей модели интервальной скорости, а прямые вступления были устранены мьютингом.

На рисунке 4 показано увеличение хвостов дифракции по правому борту купола с Рисунка 3b. Мы наблюдаем моделирование на основе трассирования лучей с и без волн DB, что позволяет нам идентифицировать участки, где они встречаются в разрезе. Также показан результат упругого FD. Эти различия можно видеть более четко на отдельной выборке OCT. На рисунке 5 показана сейсмограмма в точке OCT номер 2240, для трассирования лучей включая DB, и полное упругое моделирование FD. Теперь видно, почему необходимо выполнять моделирование трассирования лучей для отдельных наборов волн: без моделирования трассирования лучей слишком сложно понять, что мы видим на данных FD.

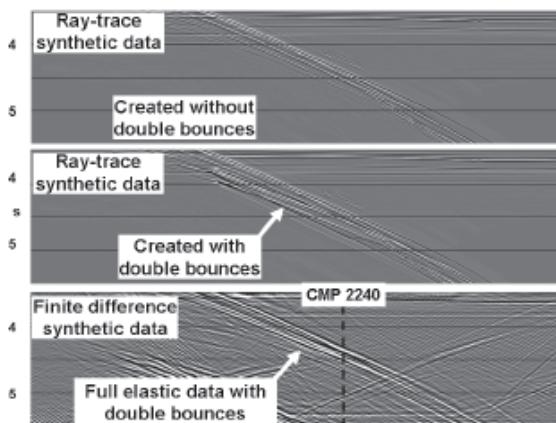


Рисунок 4 Деталь суммарных разрезов ОСТ для синтетических данных после трассирования лучей, а также данные FD для ячейки, указанной на Рисунке 3b, показано положение волн, отраженных дважды на хвостах дифракции. Также отмечено положение ОСТ 2240.

Предобработка

Прежде всего, мы смотрим на процедуры, которые подавляют волны, проявляющие аномальное поведение приращения времени в области ОСТ. Для традиционной геометрии 2D, при парадигме распространения волн в одном направлении, такие волны представляют собой кратные дифрагированные волны и волны рассеяния. Иными словами, это те волны, у которых имеется вторичный источник с точки зрения перспективы одностороннего распространения. В реальности, эти волны являются примерами распространения волн в двух направлениях, в том смысле, что траектория лучей меняет направление до или после его 'главного' отражения от интересующей границы.

Мы начали с проверки работы метода подавления кратных Радона. Если бы нам потребовалось применить фильтр Радона для того, чтобы напрямую вывести однократные волны, свободные от кратных, тогда бы у нас была проблема, поскольку все оси синфазности со смещенной вершиной были бы испорчены, и появлялись в виде размазанных артефактов на выходе. Однако эту проблему можно обойти, если мы используем преобразование Радона для моделирования кратных, а затем аддитивного вычитания их из

Рисунок 5 (а) ОСТ (положение точки 2240) для данных после акустического трассирования лучей с DB, включая кратные от свободной границы. (б) Упругие данные FD, без кратных от свободной

входных данных. Работая таким образом, мы бы могли сохранить вступления со смещенным максимумом в сейсмограммах ОСТ. Здесь мы не показываем результатов преобразования Радона.

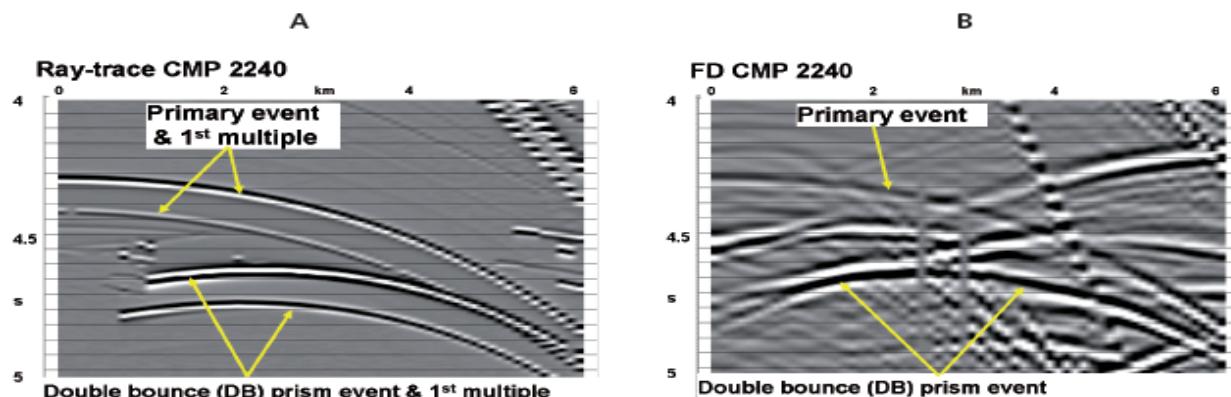
Затем мы попробовали методику подавления кратных для смещенных максимумов (ASMA), разработанную для подавления осей синфазности, чьи максимумы смещены относительно нулевого удаления в сейсмограммах ОСТ, как аппроксимация первого порядка для 3D SRME. Этот метод предназначен для эффективного уничтожения волн DB.

И далее, мы проверили мьютинг Тау-Пи (для шума обратного рассеяния). Обычно он выполняется совместно с деконволюцией. Здесь мы не применяли этап деконволюции с целью выделения и подчеркивания эффекта мьютинга Тау-Пи. Также, из-за того, что мы использовали условие поглощения на границе в моделировании FD, короткопериодные кратные в водном слое не присутствуют в данных упругого моделирования 3D.

Мы демонстрируем эффекты этих этапов обработки для набора сейсмограмм ОСТ, охватывающих соляной купол. На рисунке 6 показаны исходные входные данные FD моделирования и результат ASMA, Тау-Пи мьютинга, и обеих этих процедур. Оси синфазности со смещенными максимумами были подавлены. Это было бы хорошим результатом для традиционной обработки, но это вредоносно для построения полных изображений.

Влияние на миграцию RTM

На рисунке 7а показано RTM для данных FD на основе использования слегка сглаженной модели, и постобработка для улучшения изображения. Однако, при работе в условиях производства, когда мы стараемся определить модель, мы бы использовали определение соляного борта с помощью миграции с использованием модели без соли. В RTM, условие построения изображения все еще будет давать изображение соляного борта от DB до тех пор, пока плоско-лежащие слои с большим контрастом скорости будут присутствовать в модели. Таким образом, чтобы оценить влияние нашей предобработки на построение изображения вступлений DB, мы сравним результаты с использованием RTM при отсутствии в модели соляной толщи. На рисунке 7б показано изображение исходных данных для границы.



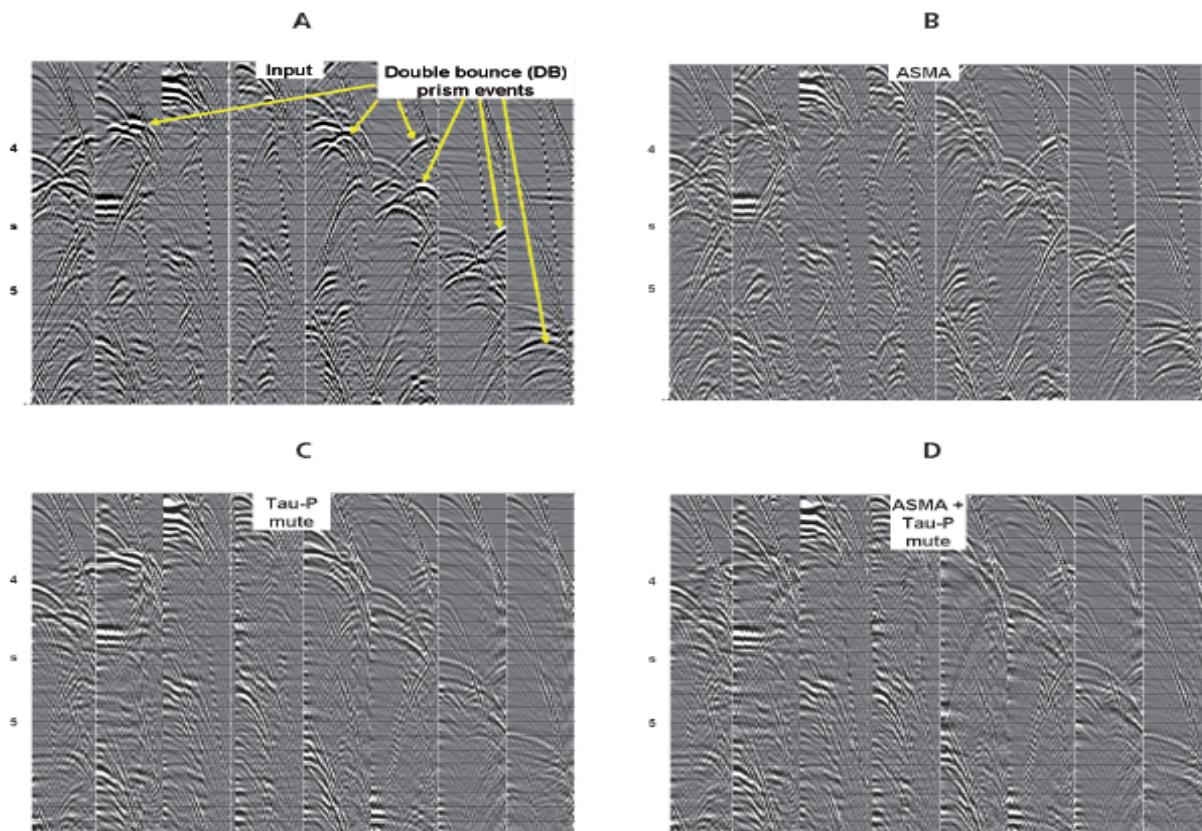


Рисунок 6 (а) Выборка сейсмограммы с максимальным удалением 6 км от данных моделированных FD, показаны исходные данные. Выходные данные из (б) ASMA, выполненной слегка лучше, чем Тау-Пи в левой части разреза, (с) Тау-Пи мьютинг, который был выполнен лучше справа, и (д) обе эти процедуры.

модели без соляной толщи. В обеих частях рисунка 7 наложена модель интервальной скорости, используемая при миграции. На рисунке 8а показано изображение RTM рисунка 7 без наложения цветной модели, а на рисунке 8б показано изображение RTM с использованием модели без соляной толщи для данных, которые были подвергнуты таупи мьютингу и ASMA. Ясно, что волны соответствующие вертикальному борту и опрокинутому соляному борту были сильно подавлены в последнем случае.

Реальные данные

Продемонстрировав разрушительный эффект неправильной предобработки на построение изображений RTM на примере синтетических данных, рассмотрим реальный пример с Северного моря. Фактически именно переменный успех миграции RTM по таким соляным структурам structures заставил нас обратиться к обсуждаемым здесь вопросам. Результаты в одном из проектов (Farmer et al., 2006) были впечатляющие. Однако, в последующем проекте, который включал соседний соляной купол со схожей геологией и системой наблюдения, результаты RTM частично разочаровали, возможно, по причине неточности модели, но возможно также из-за влияния слегка отличного графа предобработки.

Мы вновь рассмотрели успешный проект и переработали этапы предобработки в попытке проверить урон, который был нанесен типичной схемой предобработки. В упомянутом проекте, выполненном в 2005-2006, к счастью разрушительная предобработка не выполнялась. В неудачном проекте, в целях подавления проблематичного шума обратного рассеяния был использован Тау-Пи мьютинг. Итак, мы взяли тот же тау-пи мьютинг и применили его к данным первого (успешного) проекта. Тесты проводились только в 2D, для линии плоскости гребня, но выводы действительны для случая 3D.

На рисунке 9 показаны входные данные вдоль выбранной линии гребня и анизотропное 3D RTM этих данных с промежуточной моделью (без соли), с выделенными DB волнами (Farmer et al., 2006).

Входные сейсмограммы OCT, с максимальным удалением 3100 м, используемые в успешном производственном проекте (и для получения разреза показанного на рисунке 9а), представлены на рисунке 10а. Эффект применения тау-пи мьютинга, разработанного для устранения 'рассеянной' энергии, показан на Рисунке 10б. В данном случае, мы отмечаем, то он вредит

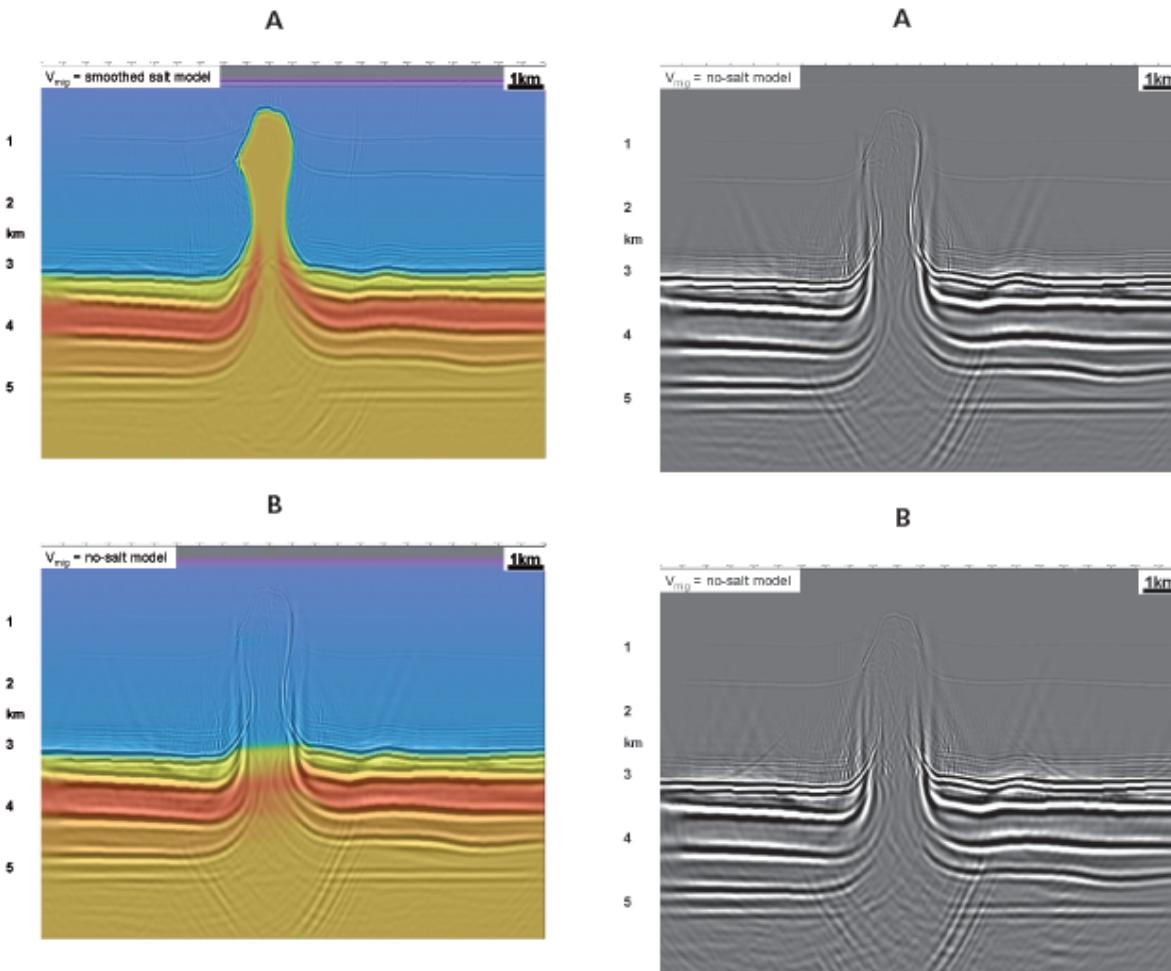


Рисунок 7 (a) RTM с исходными данными и соляной моделью. (b) RTM с исходными данными и с моделью без соли. Изображение соляной стены кажется лучше в модели без соли, поскольку мы избегаем (корректируем) растяжения импульса, обусловленного моделью на границе с солью. Условие построения изображения все еще дает отражение от стены соли, поскольку у нас имеется одна

точка отражения, заданная в модели (плоско залегающая кровля Balder).

Рисунок 8 Изображения RTM (a) исходных данных и (b) данных, обработанных с ASMA и Tau-Пи мьютингом. Отражения от опрокинутой стены соли были существенно повреждены в результате применения этого традиционной потока предобработки.

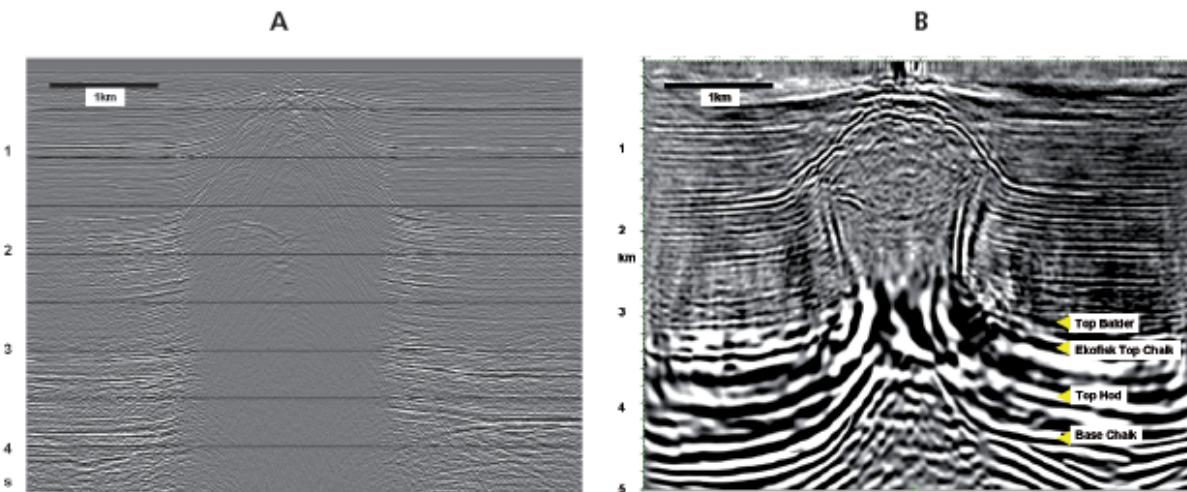


Рисунок 9 (a) Суммарный разрез ОСТ, внедренный в успешный проект. (b) промежуточный результат анизотропного 3D RTM с моделью без соли.

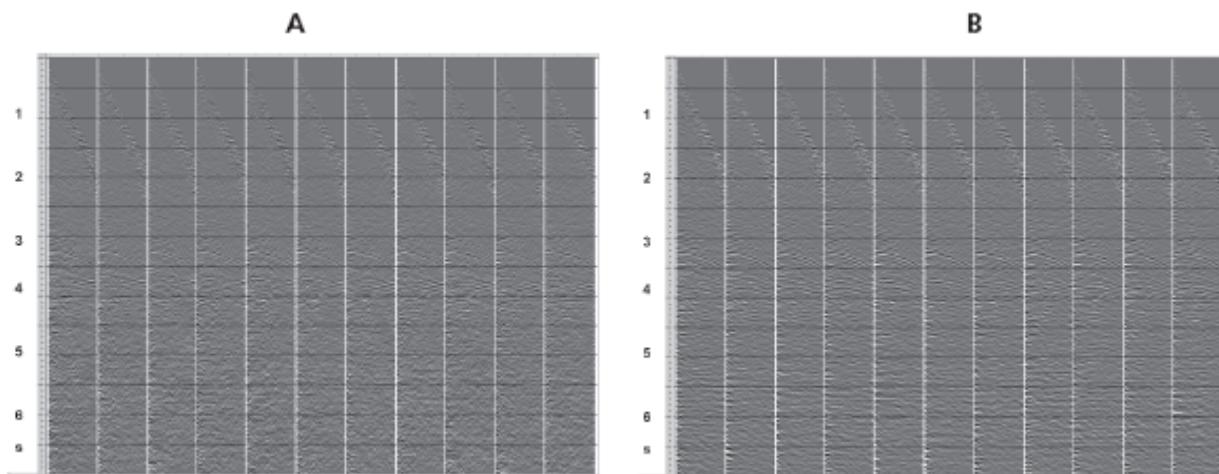


Рисунок 10 (а) Сейсмограммы OCT (с максимальным удалением 3100 м) введенные в успешный проект. (б) Сейсмограммы OCT после применения мьютинга в области Тау-Пи, предназначенного для подавления энергии рассеянных волн (что влияет на оси синфазности OCT со смещенной вершиной). Были подавлены оси с погружением в противоположную сторону. Это, скорее всего, были волны типа DB.

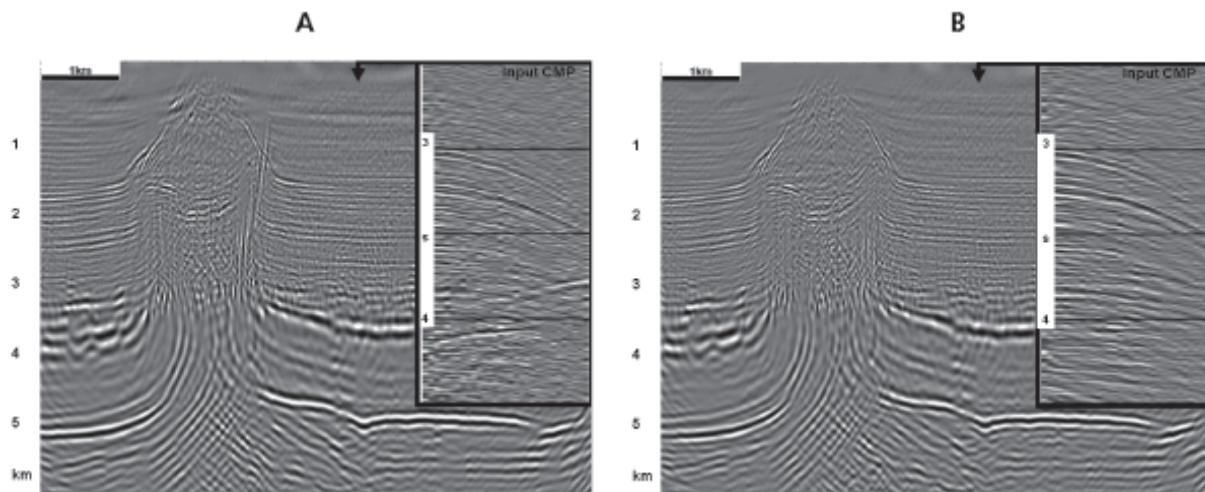


Рисунок 11 (а) Изотропное 2D RTM данных SRME с использованием модели без соли. Мы видим вступления DB, которые появляются в виде почти вертикальных осей синфазности вблизи соляных бортов. (б) RTM с той же моделью, но с использованием входных данных после мьютинга Тау-Пи. Энергия DB была подавлена. Вкладки обозначают отдельные сейсмограммы OCT, на которых показаны оси синфазности DB, подавленные мьютингом Тау-Пи.

осам синфазности со смещеными вершинами. С точки зрения перспектив традиционной обработки, этот результат обычно бы рассматривался как хороший, но мы теперь знаем, что он окажется вредоносным для RTM.

На рисунке 11а показаны 2D RTM для данных SRME с использованием модели без соли. Мы видим вступления DB, которые проявляются в виде почти вертикальных осей синфазности вблизи соляных бортов. На рисунке 11б показано изображение RTM с той же моделью, но с использованием входных данных после тау-пи мьютинга. Была подавлена DB. А каждой части рисунка имеется вкладка с сейсмограммами OCT, на которых показаны данные, подвергающиеся миграции. Очевидно, что волны DB подавляются мьютингом тау-пи, поскольку они похожи на рассеянную энергию, и проявляются в области OCT в виде осей со смещеными вершинами.

Выводы

Традиционная предобработка предназначена для подавления различных классов шума, такого как шум обратного рассеяния, кратные волны, и

дифрагированные кратные. Процедуры, разработанные с этой целью, большей частью, разработаны, имея в виду одностороннее распространение первичной волны.

Разработчики программ потратили несколько лет на развитие этих схем, которые бы эффективно подавляли кратные дифрагированные волны и шум обратного рассеяния, разрабатывая подход для работы с осями со смещеными вершинами и совсем недавно, 3D SRME. Однако если мы собираемся отмигрировать однократную волну, распространяющуюся в двух направлениях, как теперь стало возможным с помощью новых алгоритмов миграции, таких как RTM, нам потребуется убедиться в том, что поток предобработки учитывает все детали и не повредит бесповоротно тем самым осам синфазности, которые мы хотим отобразить.

Обычно, однократные волны, распространяющиеся в двух направлениях, такие как DB, появляются в области OCT таким образом, что вершина оси смещена относительно нулевого удаления. По этой причине, они похожи на кратные дифрагированные волны или рассеянную энергию. Следовательно, для подавления кратных волн в сложнопостроенных средах должен применяться аппарат типа 3D SRME,

вместо традиционного 2D подхода, во избежание ненужного подавления полезных однократных волн (распространяющихся в двух направлениях).

Благодарности

Система моделирования 2D, на платформе рабочей станции, используемая нами (GXII), была разработана Don Larson в GX Technology. Хочу поблагодарить Mike Goodwin, Stuart Greenwood, и Brent Mecham за помочь в создании синтетических данных, а Dave King, Mick Sugrue, и Ivan Berranger за обсуждения и помочь с RTM. Я также благодарен руководству ION GX Technology за разрешение на публикацию результатов настоящего исследования.

Литература

- Baysal, E., Kosloff, D.D. and Sherwood, J.W.C. [1983] Reverse time migration. *Geophysics*, 48, 1514-1524.
- Bednar, J.B., Yoon, K., Shin, C. and Lines, L.R. [2003] One way vs two way wave equation imaging - is two-way worth it? *65th EAGE Conference and Exhibition*, Extended Abstracts, B011.
- Bernitsas, N., Sun, J. and Sicking, C. [1997] Prism waves - an explanation for curved seismic horizons below the edge of salt bodies. *59th EAGE Conference and Exhibition*, Extended Abstracts, E038.
- Cavalca, M. and Lailly, P. [2005] Prismatic reflections for the delineation of salt bodies. *75th SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts, 2550-2553.
- Davison, I., Alsop, G.I., Evans, N.G. and Safaric, M. [2000] Overburden deformation patterns and mechanisms of salt diapir penetration in the Central Graben, North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 17, 601-618.
- Farmer, P., Jones, I.E., Zhou, H., Bloor, R. and Goodwin, M.C. [2006] Application of reverse time migration to complex imaging problems. *First Break*, 24(9), 65-73.
- Hale, D., Hill, N.R. and J. Stefani [1992] Imaging salt with turning seismic waves. *Geophysics*, 57, 1453-1462.
- Hawkins, K., Cheng, C.-C., Sadek, S.A. and Brzostowski, M.A. [1995] A v(z) DMO developed with the North Sea Central Graben in mind. *65th SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts, 1429-1432.
- Jones, I.E. [2008] A modeling study of pre-processing considerations for reverse time migration, *Geophysics*, (in prep).
- Larsen, S.C. and Grieger, J.C. [1998] Elastic modeling initiative, Part III: 3-D computational modeling. *68th SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts, 1803-1806.
- Levander, A.R. [1988] Fourth-order finite-difference P-SV seismograms. *Geophysics*, 53, 1425-1436.
- Madariaga, R. [1976] Dynamics of an expanding circular fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66, 639-666.
- McMechan, G.A. [1983] Migration by extrapolation of time-dependent boundary values. *Geophysical Prospecting*, 31, 413-420.
- Mittet, R. [2006]. The behaviour of multiples in reverse time migration. *68th EAGE Conference and Exhibition*, Workshop 6.
- Shan, G. and Biondi, B. [2004] Imaging overturned waves by plane wave migration in tilted co-ordinates. *74th SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts, 969-972.
- Thomson, K. [2004] Overburden deformation associated with halokinesis in the Southern North Sea: implications for the origin of the Silverpit Crater. *Visual Geosciences*, 9, 1-9.
- Virieux, J. [1986] P-SV wave propagation in heterogeneous media — velocity-stress finite-difference method. *Geophysics*, 51, 889-901.
- Whitmore, N.D. [1983] Iterative depth migration by backward time propagation. *S3¹⁴ SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts, 382-385.
- Yoon, K., Shin, C., Suh, S., Lines, L.R. and Hong, S. [2003] 3D reverse-time migration using the acoustic wave equation: an experience with the SEG/EAGE data set. *The Leading Edge*, 22(1), 38-41.
- Zhou, H., Zhang, G. and Bloor, R. [2006] An anisotropic acoustic wave equation for VTI Media. *68th EAGE Conference and Exhibition*, Extended Abstracts, H033.
- Zhang, Y., Sheng, X. and Zhang, G. [2006] Imaging complex salt bodies with turning-wave one-way wave equation. *SEG/EAGE Summer Research Workshop, Utah*.

Получено 28 ноября 2007; принято в печать 25 февраля 2008.