

Обработка данных

Моделирование кратных волн с помощью волнового уравнения: трехмерное поверхностно-связанное удаление кратных волн, независимое от системы наблюдений (Wave equation multiple modelling: acquisition independent 3D SRME)

Terje Weisser,¹ Antonio Pica,² Philippe Herrmann,² и Roger Taylor¹ из CGG обсуждают пример применения альтернативного подхода к трехмерному поверхностно-связанному удалению кратных волн без наличия плотной сети наблюдений. У представленного подхода есть много сфер применения включая, повышение качества старых данных и использование их в 4D сейсмическом мониторинге.

Данные морской сейсморазведки, полученные при структурно сложном или неровном дне океана, содержат сложные волновые поля кратных волн, и при большой глубине воды, эта энергия кратных волн может загрязнить наш целевой пояс, или напрямую, интерферируя с ним или, косвенно, поскольку процесс миграции размазывает энергию поперек более мелких осей синфазности.

Новые усовершенствования в технологии удаления кратных волн, используемые в промышленности, заключаются в полном трехмерном поверхностно-связанном удалении кратных волн (3D SRME), которое применяется в случаях осложнения записи сложными полями кратных волн. Однако

технология 3D SRME выполняется лучше при наличии данных с плотной сети наблюдений и требует серьезной предварительной интерполяционной обработки. Мы представляем результаты тестирования компанией CGG альтернативного подхода к 3D SRME, чтобы определить, является ли высокая плотность наблюдательной сети необходимостью эффективного 3D SRME, или ненужным расходом.

3D SRME

Большое различие между текущими вариантами метода 3D SRME заключается в шаге прогноза кратных волн. Широко используется управляемый данными сверточный подход. Как было показано авторами Vershuur и Berkhout (1997), и Biersteker (2001) можно использовать следующую зависимость между кратными волнами (M), однократными волнами (P) и зарегистрированными данными (D):

$$M = s^{-1} * D * P$$

Где символ * представляет собой многомерный поверхностно-связанный оператор свертки, а s^{-1} обращенный волновой пакет (ы).

Преимущество этого сверточного подхода состоит в том, что он просто управляется данными и не требует априорной информации. Для расчета поверхностно-связанной свертки должно иметь место совмещение источников и приемников в сеть наблюдений достаточно высокой плотности, чтобы должным образом произвести дискретизацию однократных и

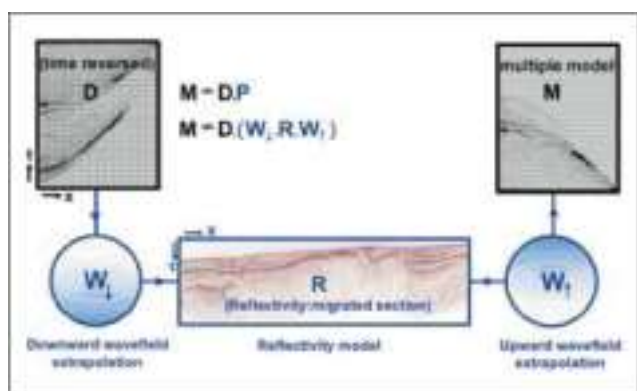


Рис. 1. Основы волнового моделирования в трехмерном методе SRME. Данные в форме обращенных по времени сейсмограмм ОПВ экстраполируются вниз с использованием модели отражательной способности и однонаправленного волнового уравнения. Этот этап моделирования волнового поля аналогичен свертке данных из ОПВ с волновым полем однократного отражения в сверточном методе SRME для создания модели кратных волн.

Обработка данных

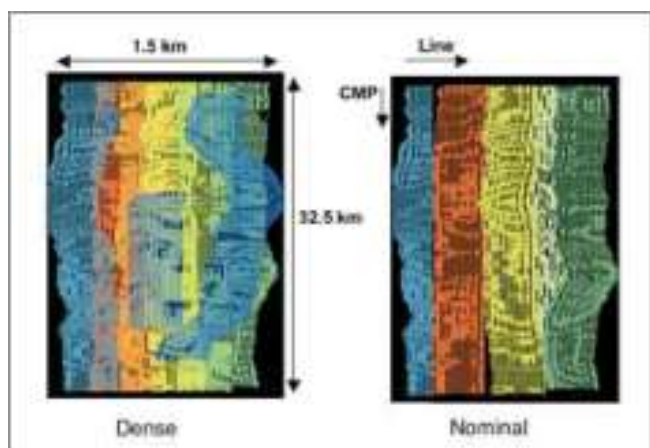


Рис. 2. Карты покрытия на ближних выносах для наборов данных (не в масштабе). Площадь съемки - приблизительно 1.5 x 32.5 км с шестью основными плавучими линиями (ОСТ показаны цветом). Съемка была сделана на сети с высокой плотностью наблюдений с 50% перекрытием плавучих профилей, с промежуточными профилями и с размерами бина съемки 6.25 x 12.5 м (слева). Номинальный набор данных (справа) был создан путем удаления данных перекрытия, промежуточных профилей и прореживания данных до размеров бина 6.25 x 25 м.

многократных волновых полей в 3D пространстве. В общем случае, комбинация сети наблюдения высокой плотности и интерполяции дополнительной плавучей линии (линии пунктов взрыва) применяется, чтобы увеличить плотность пунктов возбуждения. Интерполяция пунктов приема вперед и поперек кабелей также выполняется для регуляризации положений приемников и получения заданной плотности пунктов приема.

Моделирование кратных волн с помощью волнового уравнения

Компания CGG подошла к задаче прогноза кратных волн для метода SRME применяя методику моделирования с помощью волнового уравнения (WEM) (Pica и др., 2005). Этот подход немедленно устраняет ограничения поверхностно-связанной свертки и требуемого совмещения источников и приемников. Это делает возможным его приложение к любой конфигурации сети наблюдений, что делает его независимым от сети наблюдений. Схематичное изображение методики моделирования показано на рис. 1. Экстраполяция данных (в форме сейсмограмм общего пункта взрыва) с использованием

модели отражательной способности, использование однонаправленного волнового уравнения дает нам тот дополнительный 'отклик' от глубинного разреза, который преобразовывает наши зарегистрированные данные в модель кратных волн. Этот этап моделирования волнового поля аналогичен свертке данных с полем однократных отражений в традиционном методе SRME.

По сравнению с традиционным трехмерным методом SRME, при котором обычно требуется воссоздание плавучей линии для интерполяции пунктов возбуждения, в методе, предложенном авторами, предварительная обработка относительно проста. Сейсмограммы общего пункта взрыва регуляризуются посредством интерполяции пунктов возбуждения поперек и вдоль морских сейсмических кос. Кроме этого, модель отражательной способности может быть быстро создана для окна данных в окрестности дна моря (и главных образующих для кратных волн) посредством временной миграции до суммирования на ближних выносах. Хотя процесс моделирования кратных волн с помощью волнового уравнения в вычислительном плане более труден, он хорошо подходит для архитектуры Кластеров из персональных компьютеров с моделированием отдельных сейсмограмм общего пункта взрыва (ОПВ) на единичных узлах вычислительной сети, что минимизирует время на передачу данных.

Сравнение номинальной и плотной сети наблюдения: практический пример

Данные для этого практического примера были получены в результате трехмерной сейсмической съемки на площади приблизительно 40 км², которая была сделана на глубоководной части шельфа Норвегии. Область исследования имеет неровную и структурированную топографию морского дна, которая образует сложную картину кратных отражений от морского дна. Система наблюдения включала шесть основных профилей и два дополнительных профиля между основными профилями, причем основные профили были сделаны с 50% перекрытием, то есть с 'высокой плотностью' наблюдений как показано на рис. 2. При

Обработка данных

наличии 8 морских сейсмических кос с длиной 6 км, и с расстоянием до плавучей линии 200 м., набор данных высокой плотности имеет размер бина 6.25 x 12.5 м. Данные были прорежены для создания набора данных с номинальной сетью наблюдений для проведения данного эксперимента, путем удаления перекрытия и дополнительных профилей, и путем использования размеров бина 6.25 x 25 м. Помимо различий в плотности сети наблюдений, номинальные данные идентичны данным высокой плотности и имеют те же самые размеры съемки, что является важным при ограничении апертуры по кросслайнам (лишь 1.5 км). Отклонение буксируемой косы от курса судна - также существенный фактор в этом наборе данных. На рис. 3 показано, что ОГТ центральной плавучей линии смещаются почти на половину сети наблюдений в направлении

кросслайнов.

Суммированный разрез по ближним выносам по центральному инлайну показан на рис. 3 вместе с представительной сейсмограммой общей срединной точки (ОСТ). Сложное поле кратных волн, которое включает в себя энергию кратных волн дифракции и дифрагированные кратные волны от морского дна, отчетливо видно на обоих рисунках.

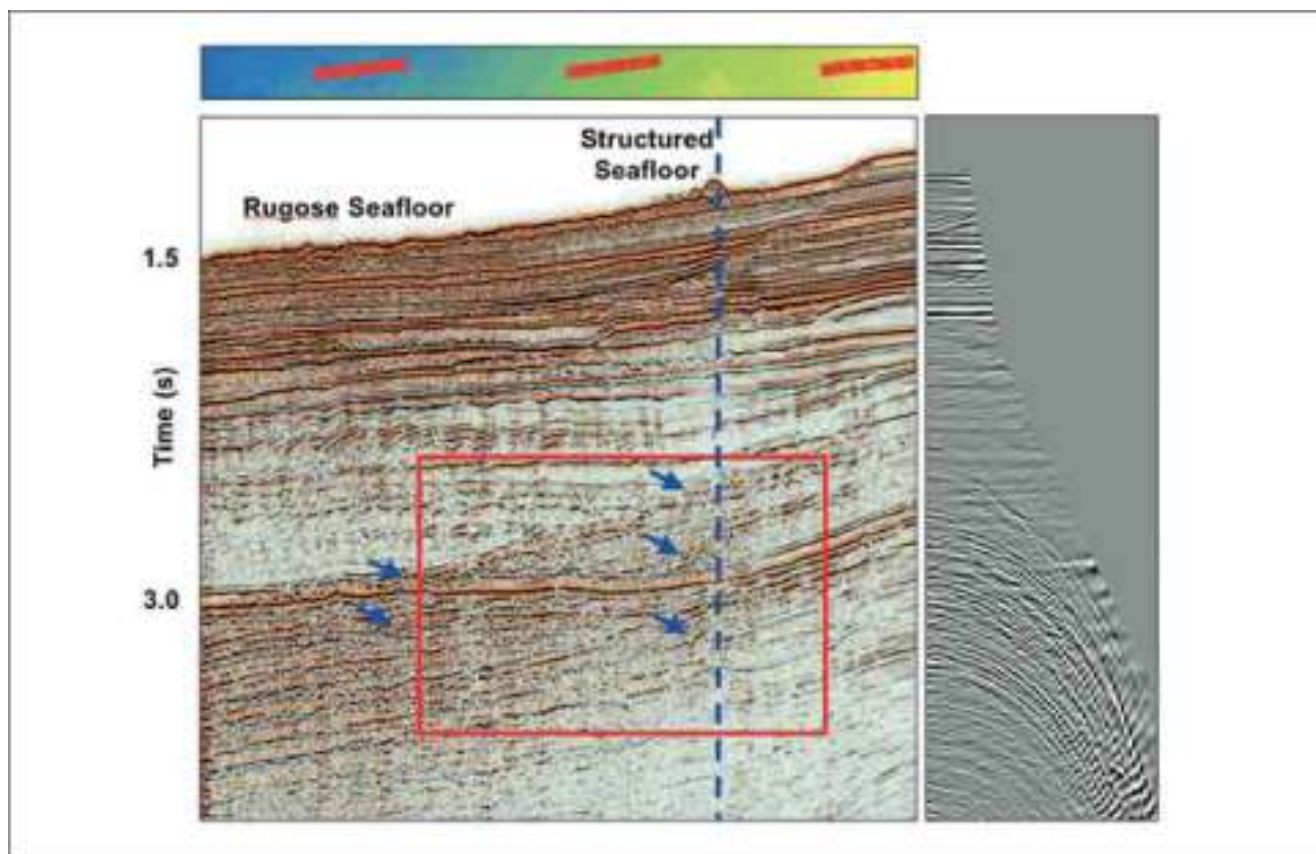


Рис. 3. Суммированный разрез по ближним выносам от центрального инлайна перед удалением кратных волн, на котором видны дифрагированные кратные волны от морского дна (прямые и со сдвинутыми вершинами). Сейсмограмма ОСТ показана справа, а сама ОСТ обозначена синей линией. Выше разреза изображена карта временного положения морского дна. Карта изображена в масштабе с положениями ОСТ от 3 ПВ центральной плавучей линии. Красное поле обозначает окно, используемое для сравнения на рис. 4.

Обработка данных

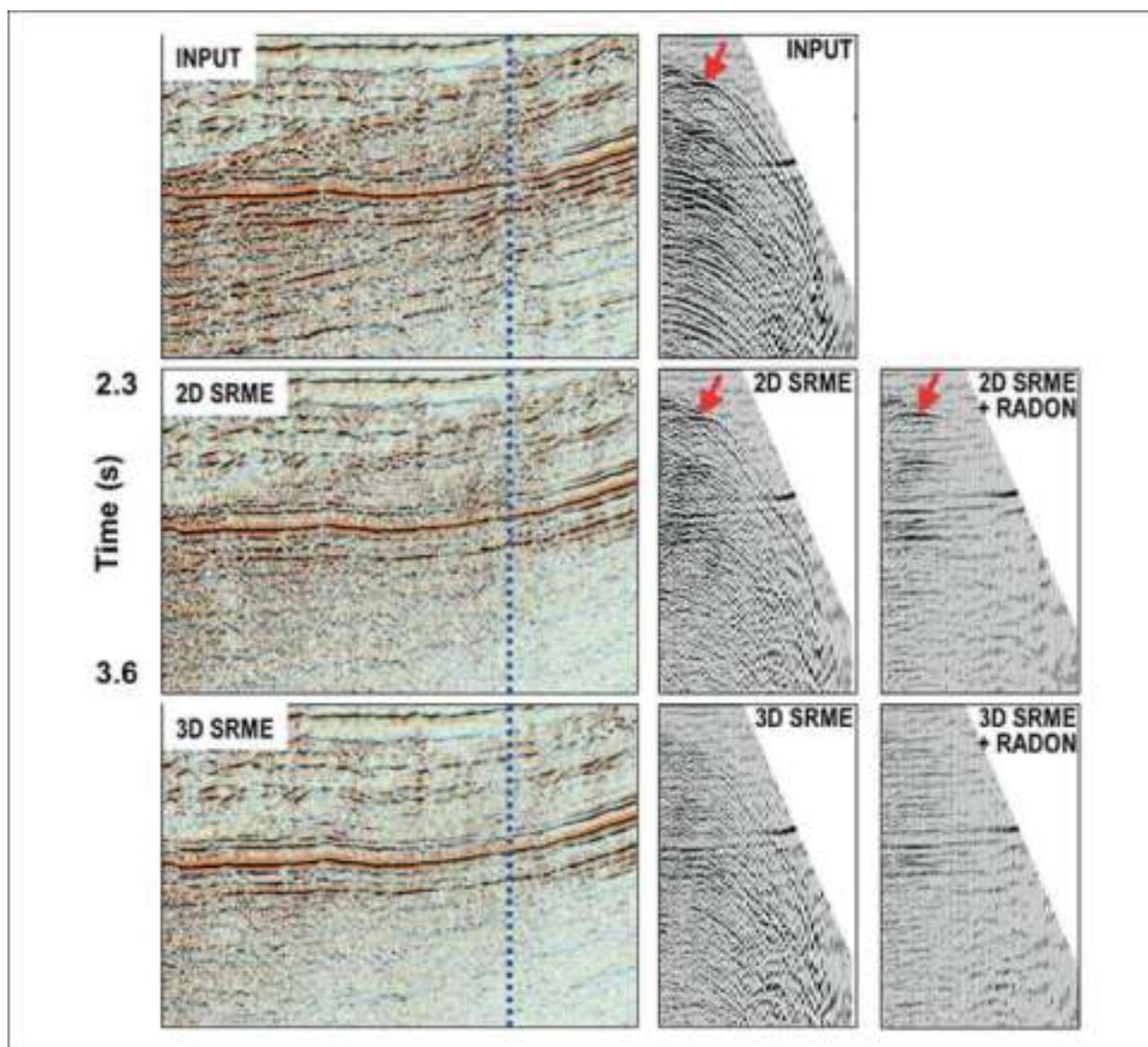


Рис. 4. Суммированный разрез центрального инлайна для ближних выносов без удаления кратных волн (сверху), результаты работы только сверточного двумерного метода SRME (в центре), только трехмерного метода SRME WEM (снизу). На рисунке показаны сейсмограммы OCT, положение которых показано синей линией. Также показаны дополнительные суммированные разрезы с удалением кратных волн с помощью преобразования Радона, примененным к результатам SRME. Годографы дифрагированных кратных волн со сдвинутыми вершинами показаны красной стрелкой.

Приложение метода SRME к энергии кратных волн и кратные волны от номинальному набору данных показано на рис. 4. Сделано сравнение между результатами работы сверточного двумерного метода SRME и результатами работы трехмерного метода SRME WEM с целью иллюстрации сложности поля кратных волн. Двумерный метод SRME работает хорошо на более линейной энергии кратных, присутствующей в суммированном разрезе, которая соответствует гиперболам кратных волн с вершиной на нулевом выносе на сейсмограмме OCT. Однако, двумерный подход неспособен моделировать более сложную внеплоскостную дифрагированную

энергию кратных волн и кратные волны от морского дна, которые можно видеть на сейсмограмме OCT как гиперболы со сдвинутыми от нулевого выноса вершинами. Трехмерный метод SRME WEM в состоянии точно моделировать кинематику этих более сложных кратных волн и эффективно их подавлять. Результат на суммированном разрезе заключается в том, что шум в пределах окна кратной волны от дна моря сильно снижается, позволяя увидеть все подробности однократных отражений.

SRME обычно используется как часть каскадной последовательности процедур для

Обработка данных



Рис. 5. Сравнение особенностей морского дна на разрезах после действия процедуры PSTM на номинальный набор данных (слева) и набор данных высокой плотности (справа). Имеются незначительные различия. Этот куб PSTM, построенный по данным ближних выносов, используется как модель отражательной способности для моделирования кратных волн.

удаления кратных волн, поэтому дополнительный набор сейсмограмм ОСТ показан на рис. 4, на котором применяется высокоразрешающий метод удаления кратных волн с помощью преобразования Радона с фильтрацией зеркальных частот к результатам работы метода SRME. Для этого конкретного набора данных трехмерный метод SRME WEM действительно оставляет некоторую остаточную энергию кратных волн на средних и дальних выносах, но эти гиперболические вступления могут быть легко подавлены с помощью преобразования Радона. Однако, на ближних выносах остатки энергии дифрагированных волн, гиперболический годограф которых имеет сдвинутую вершину, которые не смог ослабить двумерный метод SRME, также проблематичны и для преобразования Радона.

Стандартная предварительная обработка и трехмерная последовательность процедур SRME, используемая для этих двух наборов данных были идентичны кроме процедуры бинирования. Для набора данных высокой плотности, данные были бинированы с размером бина 12.5 x 12.5 м, и этот размер оставался постоянным все время вплоть до временной миграции Кирхгофа до суммирования (PSTM). Номинальный набор данных был бинирован с размером бина 12.5 x 25 м и затем был интерполирован до размера 12.5 x 12.5 м до процедуры PSTM. Такая высокоточная интерполяция FX является стандартной процедурой обработки данных трехмерной морской сейсморазведки.

Шаг плавучих линий	200 м	400 м
Размер бина ОСТ	12.5 x 12.5 м	12.5 x 25 м

Из этих различий в системе наблюдения и последовательности обработки, что является главными факторами, которые прямо влияют на трехмерный метод SRME WEM?

Так как модель отражательной способности, используемая для трехмерного метода SRME, представляет собой окно операции PSTM на ближних выносах, то качество этого изображения будет определяться точностью моделирования кратных волн. Сравнение между результатами отображения по наборам данных высокой плотности и номинального показывает незначительное различие (рис. 5). Поэтому, в случае влияния морского дна, настоящих методик интерполяции и номинальной геометрии наблюдений вполне достаточно для получения результатов, близких по качеству результатам, полученным при обработке данных высокой плотности. Само по себе моделирование кратных волн выполняется на основе сейсмограмм ОПВ, поэтому крайне важна дискретизация полей однократных и многократных волн по данным сейсмограммам с удалением зеркальных частот. Это выполняется путем интерполяции пунктов приема вдоль и поперек кос (на каждый ПВ) по мере необходимости, и таким образом дополнительное перекрытие плавучих линий не дает никакого вклада в процесс удаление кратных волн.

Результаты и выводы

Результаты работы трехмерного метода SRME WEM для набора данных высокой плотности и для набора данных с номинальной плотностью наблюдений очень похожи друг на друга, как показано на разностном разрезе на рис. 6. Поэтому мы можем заключить, что, хотя высокая плотность наблюдений действительно дает незначительные улучшения в модели кратных волн, это улучшение конечно не пропорционально усилиям и затратам на сбор данных. Мы можем приписать это двум факторам, которые

	Высокая плотность	Номинальный
--	-------------------	-------------

Обработка данных



Рис. 6. Разность между номинальным набором данных после работы трехмерного метода SRME и набором данных высокой плотности после работы трехмерного метода SRME (полностью использующего данные высокой плотности). Показанное окно соответствует суммированному разрезу по центральному инлайну на ближних выносах, который показан на рис. 4, и оно изображено при том же самом относительном усилении.

обсуждались ранее. Во-первых, модель отражательной способности для небольшой глубины относительно нечувствительна к плотности наблюдений начиная с номинальной системы наблюдений 3D, благодаря высококачественной интерполяции и алгоритмам PSTM. Во-вторых, номинальные трехмерные конфигурации системы наблюдений позволяют выполнять правильную дискретизацию полей однократных и многократных волн, позволяя использовать сейсмограммы ОПВ как региональные источники для экстраполяции волнового поля с удалением зеркальных частот. Это не является неожиданностью для общего случая, поскольку проект съемки будет обеспечивать адекватную дискретизацию и для других важных этапов обработки, например для построения итогового разреза и выполнения стандартной процедуры удаления кратных волн на основе кинематических поправок.

Различие в данном практическом примере между адекватно дискретизированными номинальными данными и хорошо дискретизированными данными высокой плотности минимально. Факторы, которые пришлось учесть в этом примере тестового набора данных для сравнения, состоят из ограниченной апертуры кросслайнов и отклонения буксируемой косы от курса судна.

Первый фактор, очевидно, ограничивает апертуру кросслайнов нашего моделирования кратных волн и, следовательно, точность модели, поэтому мы и не ожидали результатов, которые были бы наилучшими в районе изучения. Отклонение буксируемой косы от курса судна не представляет собой особенную проблему для трехмерного метода SRME WEM, поскольку существует процедура восстановления положения плавучей линии.

Обсуждение

Принимая во внимание то, что трехмерный сверточный метод SRME может требовать высокой плотности наблюдений для обеспечения адекватного результата, мы увидели, что дело не так обстоит для трехмерного метода SRME WEM. Мы рекомендуем не тратить так много усилий на увеличение плотности наблюдений, а лучше потратить эти усилия на что-либо ещё. Получение сейсмограмм ОПВ с дополнительными выносами в поперечном направлении (широко-азимутальные данные), увеличило бы апертуру кросслайнов и для применения трехмерного метода SRME WEM и для задач построения сейсмического изображения, тогда как увеличение плотности по инлайнам для приложения метода SRME можно было бы считать менее важным для сейсмического отображения.

Помимо возможности эффективной работы трехмерного метода SRME для трехмерных данных морской сейсморазведки, независимость от системы наблюдений у подхода WEM позволяет распространить трехмерный метод SRME на разреженные наборы данных и на данные, полученные с помощью нерегулярной конфигурации наблюдений. Критический случай применения предложенной методики был связан с применением донных регистрирующих блоков (OBS) (Pica и др., 2006). В этом случае использовались сейсмограммы ОПП, полученные на основе данных 3D OBS, вместо сейсмограмм ОПВ, полученных на основе данных морской съемки, для моделирования кратных волн.

Эти результаты также вдохновили исследователей на переработку старых данных, которые можно считать слишком

Обработка данных

разреженными для применения сверточного трехмерного метода SRME. В контексте использования старых данных, особой важностью обладает возможность их использования при сейсмическом мониторинге в процессе анализа съемки разных лет на одной и той же площади.

Смотря в будущее, подход использования сейсмограмм ОПВ делает трехмерный метод WEM SRME очень подходящим для широко-азимутальных конфигураций наблюдения, при которых обработка данных может быть выполнена исключительно на основе трехмерных сейсмограмм ОПВ с целью сохранения азимутальной информации.

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить компанию Statoil за разрешение на публикацию данных результатов исследования шельфа Норвежского моря.

Ссылки на литературу

Weisser, T., Pica, A., and Herrmann P. [2006] Wave Equation based Multiple Modelling - comparison of Nominal and Dense acquisition geometries. *68th EAGE Ann. Conference & Exhibition*, F022

Pica, A., Manin, M., Granger PY., Marin D., Poulain G., Suaudeau E., David B., and Herrmann P. [2006] Using and removing 3D Surface Related Multiples from OBS data. *Workshop: Removing or using multiples? 68th EAGE Annual Conference & Exhibition*,

Pica, A., Poulain, G., David, B., Magesan M., Baldock, S., Weisser, T., Hugonnet, P., and Herrmann P. [2005] 3D surface-related multiple modeling, principles and results. *75th SEG Ann. Internat. Mtg, Expanded Abstracts*, 2080-2083. Biersteker, J. [2001] MAGIC: Shell's surface multiple attenuation technique. *71st SEG Ann. Internat. Mtg. Expanded Abstracts*, 1301-1304.

Verschuur, D.J., and Berkhout, A.J. [1997] Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part II: Practical aspects and examples. *Geophysics*, 62, 1596-1611.