

Влияние регуляризации на миграцию данных многократных сейсмических наблюдений (Effect of regularization in the migration of time-lapse data)

Gordon Poole и Didier Lecerf из компании CGG Technology, London, UK

Введение

В случае 4D сейсмических исследований цель состоит в том, чтобы наблюдать за изменениями сигнала в коллекторе, который может улучшить наше понимание динамической системы коллектора и дать возможность оптимизировать процесс добычи. Для успешного изучения, шум должен быть минимизирован, так как величина сигнала, связанного с 4D эффектом в общем случае мала и имеет тот же самый порядок, что и шум. Существует множество причин неповторяемости при морских 4D сейсмических исследованиях – различия в условиях регистрации сигналов, в параметрах окружающей среды, в процессе обработки данных. Когда мы сравниваем наборы данных многократных сейсмических наблюдений, этот не повторяющийся шум остается, и будет препятствовать интерпретации данных.

Временная миграция Кирхгофа до суммирования (PreSTM) – это технология обработки данных, используемая в сейсморазведке при разведке и мониторинге коллекторов. Эта схема миграции является привлекательной,

поскольку позволяет учесть скоростные поля, изменяющиеся в пространстве и во времени, при миграции данных. Эта процедура является уместной только для наборов данных с гладкими скоростными контрастами, поскольку любые резкие скоростные изменения (например, приповерхностные неоднородности) добавляет остаточную энергию в разрез в виде «ульбок» миграции. Даже с гладкими скоростными полями, другая форма шума миграции берет начало из близкой к оптимальной интерференции оператора миграции. Поскольку при выполнении PreSTM используется симметричный оператор (не как в случае Глубинной

Миграции до Суммирования), то лучшая возможная конструктивная и ослабляющая интерференция требует квадратных бинов с общей срединной точкой (ОСТ), расположенной в центре бина. Кроме того, трассы в кубе данных с единичным выносом должны быть моноазимутальными (или иметь одинаково распределенное азимутальное содержание для каждого бина), и монооффсетными. Если миграция не была остаточной, то шум останется в виде отпечатка системы измерения данных. В 4D исследованиях, где каждый набор данных имеет немного различных параметры измерения, каждый повторный набор данных характеризуется своей собственной моделью помех миграции. Этот шум некоррелируется между повторными съемками и появляется в виде энергии на разностном разрезе. Использование весовых схем в алгоритме PreSTM может помочь при подавлении шума, нормализуя выходные данные миграции. В общем случае регуляризация данных на входе оптимизирует конструктивную и ослабляющую интерференцию, что позволяет нормализовать амплитуды на оси синфазности, а также подавить улыбки миграции.

В этой статье мы оцениваем уровень шума миграции от близких к оптимальному положению точки записи в среде с постоянной скоростью для алгоритма Кирхгофа PreSTM. Кроме того, мы выделяем некоторые технологии обработки, которые позволяют понизить уровень шума миграции.

Исследование оператора PreSTM

Операция PreSTM по Кирхгофу состоит из образования результирующей трассы амплитуд на основе соседних

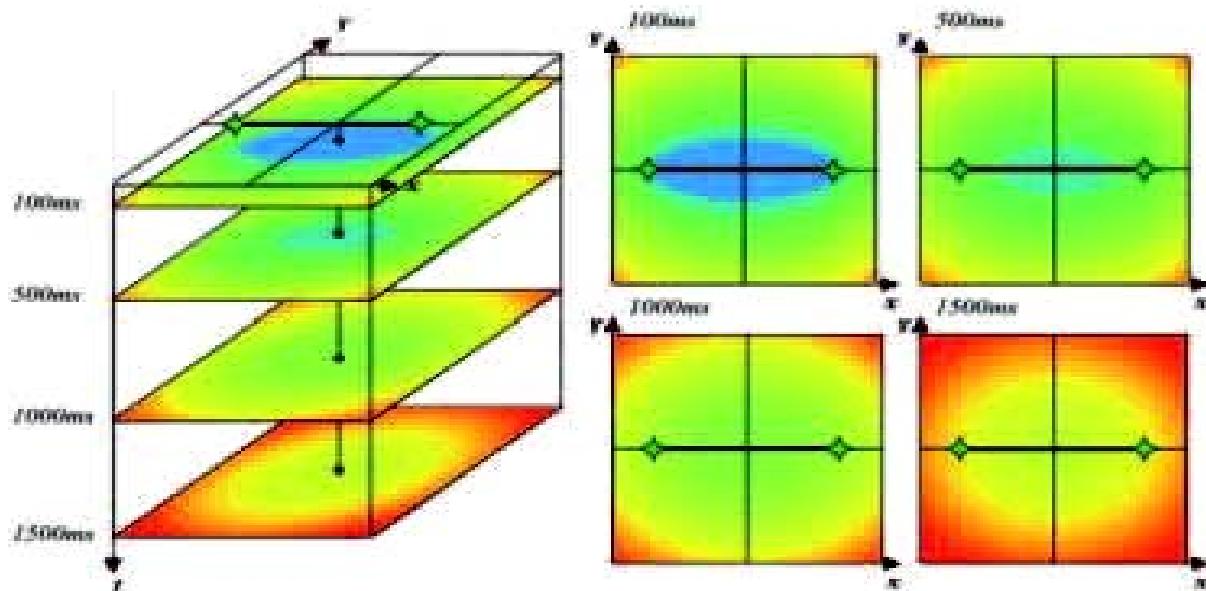


Рис. 1. Срезы времен пробега в среде с постоянной скоростью (2000 м/с).

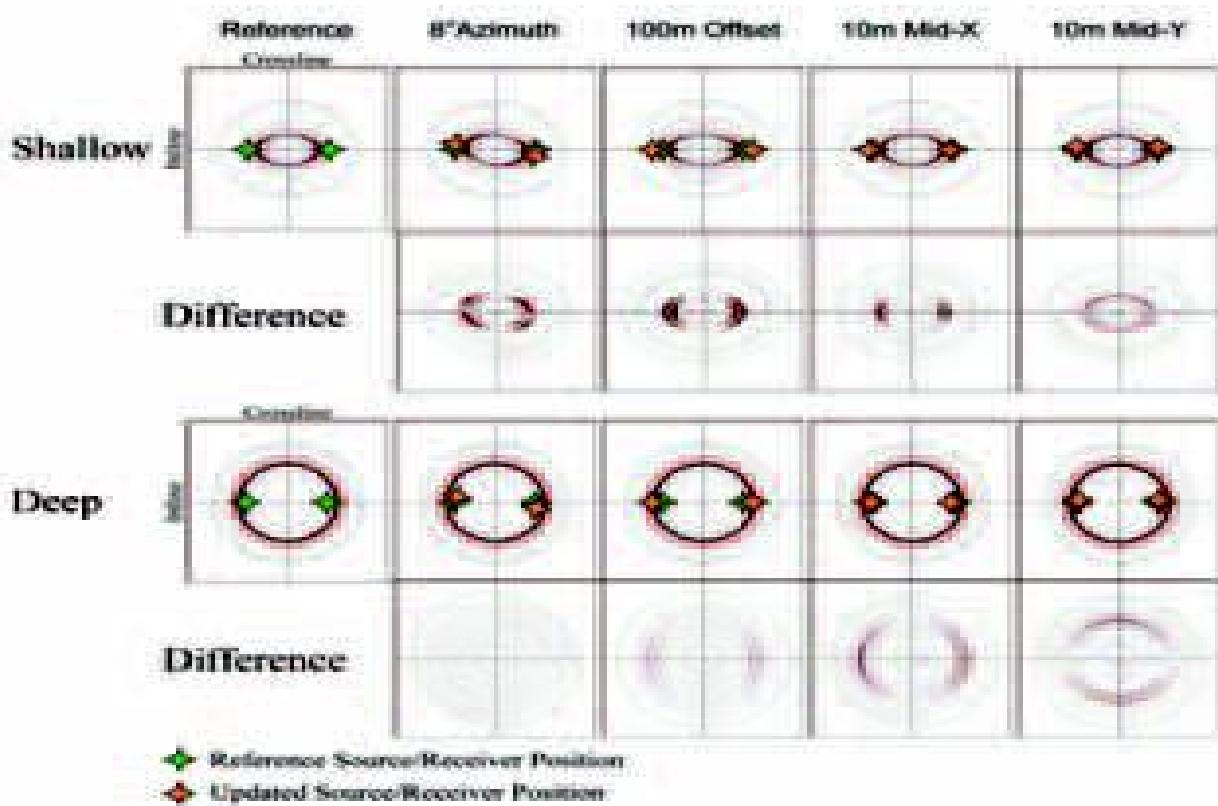


Рис. 2. Временные срезы для различных импульсных характеристик PreSTM.

трасс. Оператор PreSTM выражает фактическое время распространения энергии из источника к приемнику через точку отражения через среду, которая характеризуется заданной среднеквадратичной (RMS) скоростью. На Рис. 1 показаны времена пробега PreSTM для единственной входной трассы с выносом 2000 м в среде с постоянной скоростью 2000 м/с. Данный отсчет амплитуды на входной трассе размажется вдоль изолинии соответствующей входному времени.

Заметим, что оператор PreSTM является строго эллиптическим вблизи поверхности, и становится кольцевым по мере увеличения времени. Ось симметрии располагается вдоль оси источник-приемник.

Различия в азимуте отражены вращением оператора вокруг ОСТ. Мы ожидаем, что различия во временах пробега в отношении к азимуту будут намного большими в верхней части разреза, где оператор является более эллиптическим, чем в глубокой части. Изменения в положении ОСТ приведут к переносу оператора, что будет сделать проблематично на всех временах пробега. Изменения в выносе также влияют на эллиптичность оператора на дальних выносах, он растягивается по оси источник-приемник.

Амплитуда этих разностей для горизонтальной модели среды с постоянной скоростью может быть исследована путем вычитания импульсных передаточных функций PreSTM для различных геометрий наблюдения. На Рис. 2 показаны временные срезы импульсного отклика PreSTM на двух различных временах. Поверхностный рефлектор расположен на времени 200 мс, а глубокозалегающий рефлектор на 1000 мс. Временные срезы оператора были сделаны на времени 50 мс выше рефлектора вне зоны Френеля.

Из этого анализа, мы видим, что различия оператора миграции по отношению к азимуту и выносу уменьшаются по мере увеличения времени пробега, однако остаточная энергия, относящаяся к положению ОСТ, остается значительной даже на большой глубине.

К шуму миграции приводят не отдельные отклики миграции. Скорее сумма конструктивной и ослабляющей интерференции между откликами от всех входных трасс. В

следующем разделе мы исследуем это явление более тщательно для множества нерегулярных параметров измерительной системы, используя синтетические данные.

Шум миграции для синтетических данных навигации

Опорные навигационные точки для трехмерного куба данных были воссозданы со следующими характеристиками: нулевой азимут, ОСТ в центре бина и монофазность трасс (500 м). Опорные данные были беспорядочно возмущены для получения навигационных данных в неоптимальных положениях точки записи. Неоднородности имели максимум $\pm 20^\circ$ по азимуту, ± 50 м по выносу, и ± 7 м по положению ОСТ на илайнах и кросслайнах. Они рассматривались как отдельно, так и в комбинации с квадратными бинами с размерами 12.5 м. Для каждого набора навигационных данных, были созданы синтетические данные для однородной среды с постоянной скоростью, содержащей горизонтальные отражающие границы.

Нормализованные среднеквадратичные значения (NRMS) обычно используются как критерий повторяемости сейсмических данных через всю последовательность процедур обработки. Значение NRMS может быть выражено как среднеквадратичное значение (RMS) разностного разреза, отнесенное к среднему RMS двух исходных разрезов, для заданного временного окна. Уравнение для NRMS (Kragh и Christie, 2001) выглядит следующим образом

$$NRMS = \frac{2 \cdot RMS(a-b)}{RMS(a) + RMS(b)}$$

где RMS(a-b) - RMS значение амплитуд разностного разреза, а RMS(a) и RMS(b) представляют собой RMS значения амплитуд исходных разрезов.

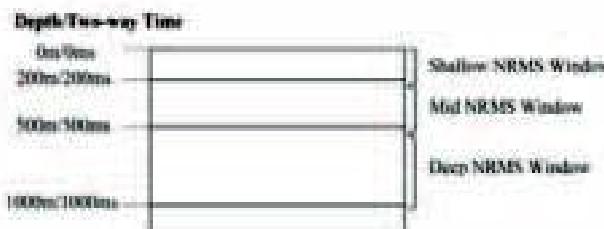


Рис. 3. Синтетическая модель – все слои имеют скорость 2000 м/с.

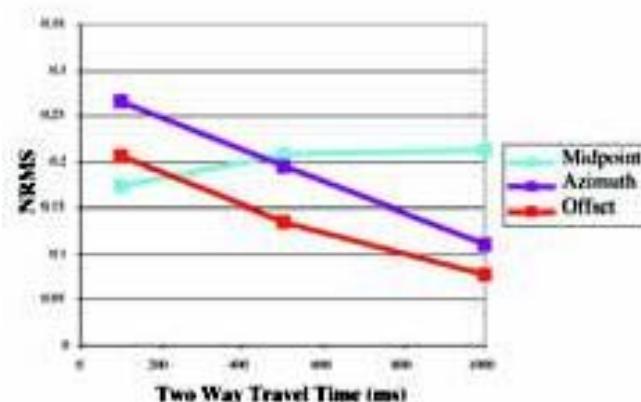


Рис. 4а. Графики зависимости значений NRMS от различных ошибок измерения.

Измерения NRMS были сделаны между результатом работы процедуры PreSTM для каждого сценария возмущения и набора опорных данных. Окно NRMS включало в себя оба вида остаточной энергии для каждой отражающей границы и «усы» миграции над ними. Модели и окна NRMS показаны на Рис. 3. Данные PreSTM NRMS показаны на Рис 4.

Рисунок 4а отображает тот факт, что шум миграции от изменений положения средней точки сохраняется для всех времен пробега. Остаточная энергия, относящаяся к изменениям азимута и выносов, проблематична только в верхней части разреза, и с увеличением времени пробега уровень энергии падает. На Рис. 4б мы комбинируем различные атрибуты навигационных данных. Типичная схема измерения включает в себя изменения всех трех комбинированных атрибутов, поэтому мы можем ожидать различий в результатах миграции на всей глубине сейсмического разреза.

Технологии обработки данных стремятся регуляризовать данные относительно одного или нескольких таких параметров. Рис. 4б иллюстрирует тот факт, что для этого синтетического набора данных, мы могли надеяться сократить уровень шума миграции в два раза на времени 1000 мс, используя регуляризацию средней точки.

Реальные положения точки записи трасс образуют некую схему и расположены не случайно. В этом случае мы не можем предполагать, что они будут иметь тот же самый отклик, как и те, что мы видим в этих синтетических примерах навигационных данных. Однако эти синтетические тесты показывают относительный вклад различных параметров системы измерения данных в шум, созданный процессом PreSTM.

Инлайновое центрирование бинов

При морских съемках мы можем использовать преимущество регулярной дискретизации данных в направлении косы, чтобы сделать регуляризацию ОСТ вдоль

траектории движения судна. Пространственный аляйсинг в этой области минимизируется посредством высокой плотности приемников на косе. Кроме того, конструкция группы предоставляет защиту в виде пространственного антиалайсинга. Входные данные воссоздаются в новом местоположении таким образом, чтобы средняя точка попадала в центр бина по оси инлайна. Повторное перераспределение пространственных точек может быть выполнено посредством пространственной sinc интерполяции или обратного преобразования Фурье. Геометрия данной процедуры показана на Рис. 5.

Использование области пунктов возбуждения (ПВ) позволяет избежать нерегулярного шага по средним точкам, выносам, и азимутам перед сортировкой данных в кубы равных выносов. Кроме того, этот способ является очень быстрым и устойчивым в применении.

Офсетная регуляризация

Далее мы можем использовать регулярные положения точки записи в направлении траектории движения судна для выполнения инлайновой и офсетной регуляризации. Это делается через комбинацию областей пунктов возбуждения (ПВ) и пунктов приема (ПП). На основе трехмерного бина и определений класса выносов, мы можем вычислить требуемые положения ПВ и ПП, при которых средняя точка данных попадает в центр бина в направлении инлайна, и вынос расположен в центре класса выносов. В первую очередь, трассы с координатами требуемых положений ПП создаются посредством обратного преобразования Фурье для всех пунктов возбуждения, которые вносят вклад в положение данного приемника. В результате получается сейсмограмма ОПП для отдельных положений ПП. Процедура восстановления данных в пределах сейсмограммы ОПП перемещает трассу в нужный бин по оси инлайна и в центр класса выносов. На

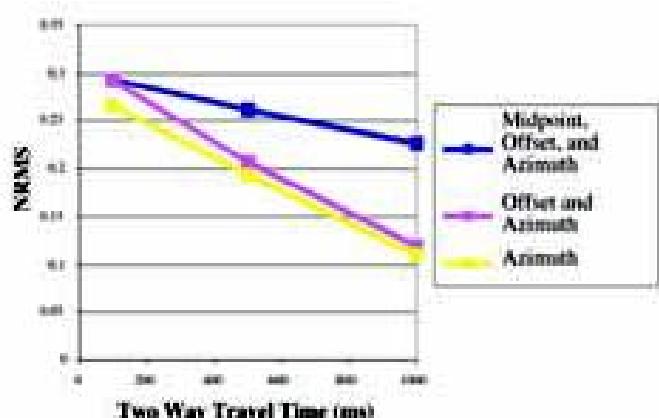


Рис. 4б. Графики зависимости значений NRMS от ключевых параметров системы измерения.

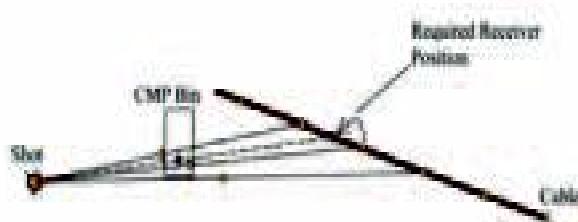


Рис. 5. Инлайновое центрирование бинов в области пункта возбуждения.

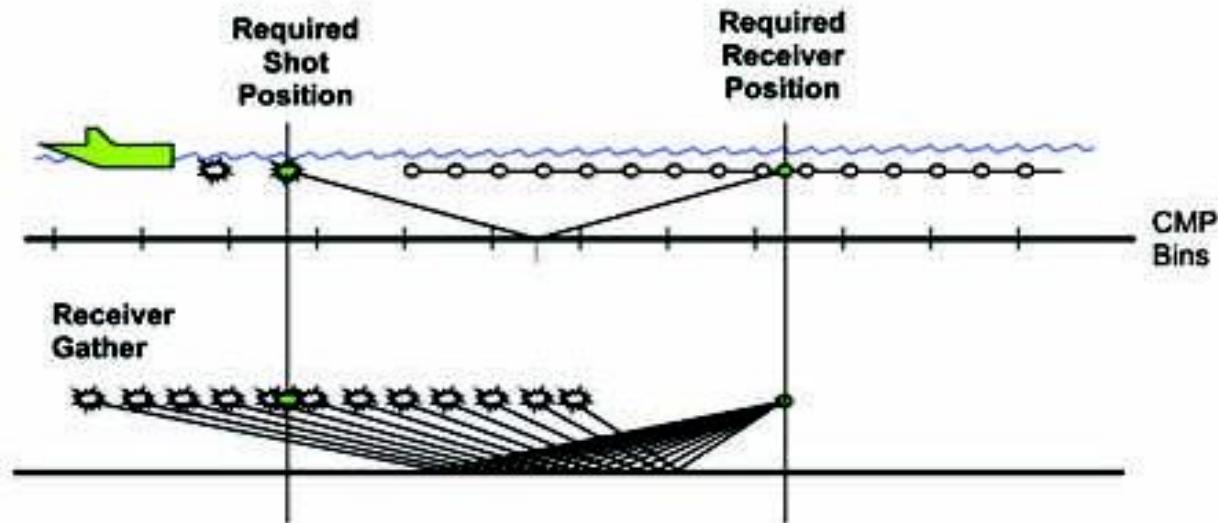


Рис. 6. Офсетное/инлайновое центрирование бинов на сейсмограмме ОПП.

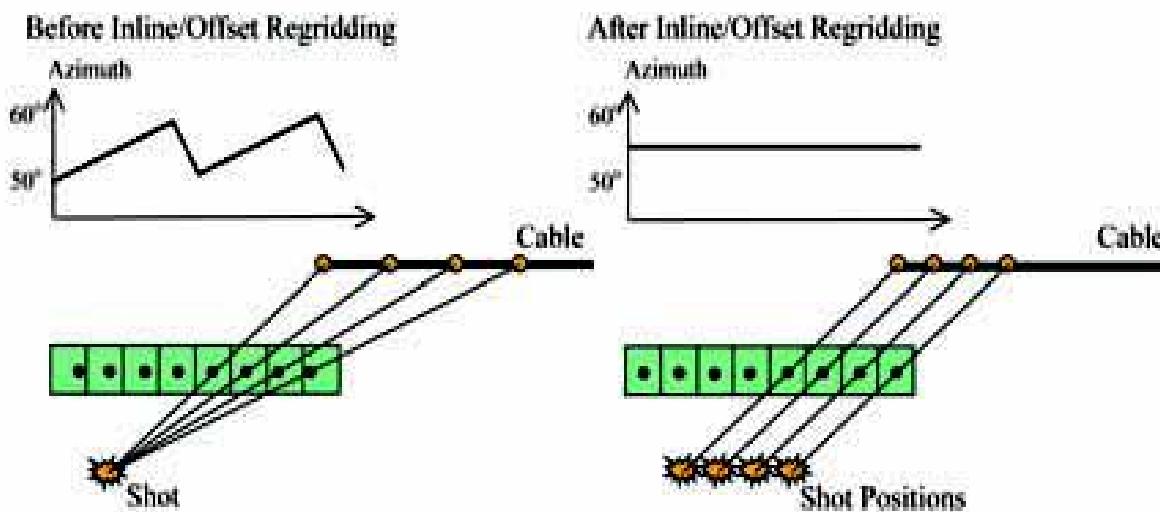


Рис. 7. Азимутальные изменения при инлайновом/оффсетном центрировании.

Рис. 6 изображены области, в которых происходит восстановление данных.

Также в результате сглаживаются азимутальные картины в области выносов по отношению к ПВ: отношение шага между приемниками. Это показано на Рис. 7.

Азимутальные значения, показанные на Рис. 7 относятся к ближним каналам на внешней части кабеля. Важно убедиться в отсутствии алиасинга в области ПП. Может потребоваться интерполяция пунктов возбуждения. Максимально используя регулярно зарегистрированные области ПП и ПВ, мы можем подавить неоднородности по инлайнам и выносам в исходных данных. Кубы выносов тогда будут более сглаженными, и будут представлять собой лучшую основу для регуляризации данных по кроссслайнам.

Кроссслайновое центрирование бинов

Кроссслайновое центрирование бинов в пределах отдельного пункта взрыва более проблематично, поскольку выборка данных в этом направлении более груба, содержит эффекты алиасинга и содержит данные, полученных от меньшего

количество точек (то есть обычно мы располагаем 6-10 кабелями). При некоторых условиях, повторное перемещение кроссслайна может быть осуществлено в области ПВ, см. Eiken и др., 2003. Общее надежное решение состоит в применении процедуры кроссслайнового центрирования бинов после сортировки данных в кубы выносов. Нерегулярное пространственное прямое преобразование, сопровождаемое обратным преобразованием на регулярную сетку может отобразить данные в центр бина в направлении кроссслайна. Даже после предварительного пересчета инлайнов и выносов на новую сетку, азимутальные вариации могут все еще иметь место в добавок к неправильному положению ОСТ на кроссслайне. Выполняя центрирование бина таким способом, мы делаем предположение о том, что диапазон азимутов является относительно малой величиной, что соответствует тому, что мы возбуждаем волны перпендикулярно основной структуре.

Для решения этой задачи было применено несколько различных преобразований - два популярных

преобразования: обратное преобразование Фурье и высокоразрешающее преобразование Радона. Прямое дискретное преобразование Фурье осложняется нерегулярностью выборки данных, которая может быть устранена путем использование прореженного набора данных (Zwartjes, 2001) или «не текущих» преобразований Фурье (Xu и Pham, 2004). Также может возникнуть потенциальное пространственное искажение, связанное с преобразованием Фурье (Zwartjes и Sacchi, 2004). Высокоразрешающее преобразование Радона также использует разреженное преобразование Фурье и имеет преимущество в уменьшении влияния алиасинга (Hermann и др., 2000). Однако этому может препятствовать потеря разрешающей способности вследствие ограниченного диапазона данных.

Сравнение в контексте 4D

Если бы два набора 4D данных были оба получены при абсолютно одинаковых положениях измерительной установки, то они оба имели бы идентичные отпечатки усов миграции, которые взаимно уничтожились бы при вычислении разностного разреза. Когда положения точки записи не одинаковые, усы миграции будут отличны и поэтому остаются на разностном разрезе в виде шума. Так как 4D сигнал, связанный с добычей полезных ископаемых, имеет малую амплитуду, то важно подавить все источники шума. Одним решением является регистрировать данные настолько точно, насколько это возможно, но технологии обработки исходных разрезов могут также существенно повысить уровень повторяемости.

В этом разделе мы создаем синтетические данные с реальной навигацией, взятой из Базовой и Мониторинговой съемок. Как и в предыдущих исследованиях использовалась среда с постоянной скоростью с тремя горизонтальными отражающими границами (см. Рис. 3). После миграции была рассчитана разность между Базовым и Мониторинговым наборами данных. Значения NRMS вычислялись в трех временных окнах, и они показаны на Рис. 8. Параметры измерительной установки для наборов данных многократных сейсмических наблюдений приведены в Табл. 1.

На Рис. 8 показано, что уровень NRMS понижается с ростом времени пробега. Мы наблюдаем наибольшее понижение значений NRMS после кроссслайнового центрирования бинов. Кроме того, мы видим, что параметр NRMS в верхней части разреза достиг значения приблизительно 0.05 после применения регуляризации выносов.

На времени 1000 мс уровень шума миграции понизился более чем в два раза: значение NRMS снизилось от 0.36 до 0.13, это по большей части произошло после применения кроссслайнового центрирования бинов. Значения NRMS после регуляризации сопоставимы со значениями на Рис. 4b с аналогичным уровнем азимутальной неоднородности. Этот пример демонстрирует тот факт, что средства, предложенные в предыдущих разделах, достаточны, на примере с синтетическими данными, для достижения ожидаемого уровня остаточной энергии на разрезе разности.

Природа 4D шума также важна: имеет ли он место на разрезе из-за физического явления или, как указано выше, из-за разности усов миграции. Все это может повлиять на результат интерпретации разностного разреза. На Рис. 9 показаны разностные разрезы для альтернативных схем

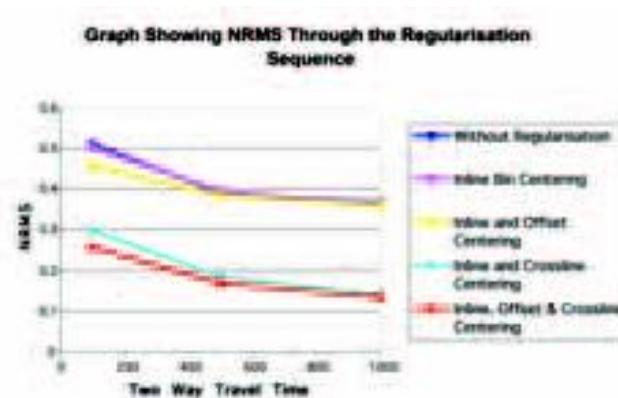


Рис. 8. Уровень NRMS в процессе регуляризации.

регуляризации вместе с опорным разрезом

для того чтобы показать относительный уровень амплитуды данных.

Рисунки показывают, как процессы регуляризации понижают уровень шума от Рис. 9b к 9d. Регуляризация выносов лишь незначительно улучшает полный уровень NRMS (Рис. 8), однако наблюдается существенное понижение уровня улыбок миграции на разностных разрезах (Рис. 9c и 9d).

Весовые схемы миграции могут помочь понизить уровень помех, нормализуя вывод миграции. Кроме того, временные и амплитудные несоответствия могут быть уменьшены путем введения статических поправок и настройки формы импульса. Однако, остаточные усы остаются и препятствуют интерпретации данных, накладываясь на низкие амплитуды 4D сейсмических явлений.

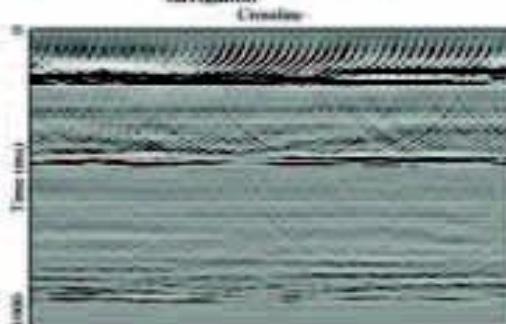
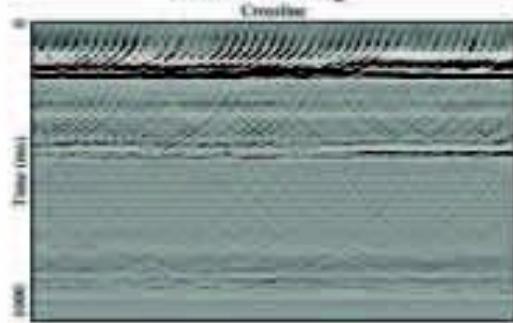
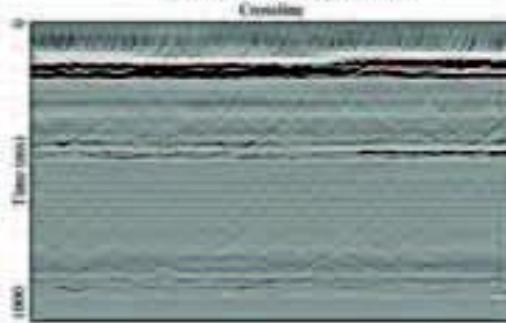
Выводы

Даже в случае простого геологического строения с существенными неоднородностями, нерегулярные положения точки записи в среде с постоянной скоростью среды дают начало существенным уровням остаточной энергии миграции. Изучив оператор PreSTM по Кирхгофу и проанализировав синтетические данные, мы получили представление об уровне шума миграции на различных временах пробега волн при различных системах сбора данных. Несмотря на то, что взвешивание в алгоритме PreSTM и 4D сопоставление может понизить шум миграции, усы миграции останутся на 4D разностном разрезе выше отчетливых осей синфазности. Эта энергия пространственно коррелируется и её не просто убрать с помощью статистической фильтрации.

Эти разности могут быть минимизированы, если параметры измерения для базовой и повторной съемки будут мало отличаться друг от друга. Одна из них также можно минимизировать, используя алгоритмы регуляризации данных в процессе обработки сейсмических данных. Мы суммировали некоторые методики регуляризации и объяснили, как мы можем максимально использовать плотную регулярную выборку данных по траектории движения судна для проведения регуляризации по инлайнам и кроссслайнам. Мы продемонстрировали, что

	Кол-во источников	Расстояние между ПВ	Кол-во кабелей	Расстояние между кабелями	Сетка бинирования	Сетка обработки
Базовый	1	18.75 м	10	50 м	12.5 м X 25 м	12.5 м X 25 м
Мониторинговый	2 (поочередно работающие группы источников)	37.5 м (один источник)	10	75 м	12.5 м X 18.75 м	12.5 м X 25 м

Табл. 1. Параметры измерения набора данных многократных сейсмических наблюдений.

Figure 9a Reference migration**Figure 9b** Difference (Base – Monitor) migration with real navigation**Figure 9c** Difference (Base – Monitor) migration with IL/XL bin centering**Figure 9d** Difference (Base – Monitor) migration with IL/XL & offset regularization**Рис. 9. Результаты регуляризации.**

остаточные усы миграции, относящиеся к нерегулярностям в выносах и азимутах, значительно уменьшаются с увеличением времени пробега. Нерегулярные положения средней точки обеспечивают большую часть шума, связанного с системой измерения данных, который остается интенсивным по всему разрезу. Хотя регуляризация выноса значительно не понижает общий уровень NRMS в глубинной части разреза, с её помощью можно значительно улучшить качество отображения приповерхностных частей разреза путем её очистки от усов миграции. Регуляризация выносов может улучшить взаимное выравнивание сейсмических сигналов миграции, уменьшая времена и сдвиги фаз между наборами данных многократных сейсмических наблюдений. Хотя эта методика не может считаться необходимой для трехмерных проектов, она может

быть особенно важной для случаев 4D, когда измеряется малый по величине эффект от добычи углеводородов или когда коллектор залегает не на большой глубине. Методики регуляризации в настоящее время являются частью стандартного графа обработки для большинства 3D и 4D наборов данных. Уровень повышения качества на реальном 4D наборе данных может быть переменным в зависимости от качества съемки и уровня других различий в данных.

International Meeting, Expanded Abstracts.

Schonewille, M. A., Monijn, R., Duijndam, A. J. W., and Ongkiehong, L. [2003] A general reconstruction scheme for dominant azimuth 3D seismic data. *Geophysics*, 68, 2092-2105.

Xu, S. and Pham, D. [2004] Seismic data regularization with anti-leakage Fourier transform, 66th EAGE Meeting, Expanded Abstracts.

Zwartjes, P. M. and Hindriks, C. O. H. [2001] Regularising 3D data using Fourier reconstruction and sparse inversion 71st SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts.

Zwartjes, P. M. and Sacchi, M. D. [2004] Fourier reconstruction of non-uniformly sampled, aliased data. 74th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts.

Благодарности

Мы хотели бы благодарить CGG Technology за поддержку и руководство в течение этого проекта и за множество обсуждений.

Ссылки на литературу

- Eiken, O., Haugen, G. U., Schonewille, M., and Duijndam, A. [2003] A proven method for acquiring highly repeatable towed streamer seismic data. *Geophysics*, 68, 1303-1309.
- Herrmann, P., Mojesky, T., Magesan, M., and Hugonnet, P. [2000] De-aliased high-resolution Radon transforms. 70th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts.
- Kragh, E. and Christie, P. [2001] Seismic repeatability, normalized RMS and predictability. 71st SEG Annual