



# Ослабление влияния системы наблюдений 3D наземных съемок

Acquisition footprint suppression on 3D land surveys

**Necati Gulunay,<sup>1</sup> Nigel Benjamin<sup>2</sup> и Mag Magesan<sup>1</sup> из CGG обсуждают влияние геометрии системы наблюдений, которое проявляется в большинстве 3D наземных съемках, и надежный метод для ослабления этого влияния.**

**В**лияние геометрии системы наблюдений 3D наземных съемок проявляется себя в виде полос на временных срезах суммарного куба данных с инлайновым и кросслайновым периодами, которые совпадают с интервалами между источниками и интервалами между приемниками в системе наблюдений. Hill и др. (1999) дают детальное описание и исследование влияния системы наблюдений. ДМО кубы, также известно, демонстрирует такие артефакты. Schleicher и др. (1989) и Ronen (1994) объясняют артефакты ДМО, как проявление неоднородностей в диаграмме кратности.

Эти артефакты на суммарных кубах (или ДМО кубах) иногда описываются как «штриховка» или «дребезг», и они препятствуют точной интерпретации. Это явление подобно периодическим артефактам, которые наблюдаются вдоль направления инлайна (ОГТ) 2D профилей, вследствие того, что распределение удалений в пределах ОГТ имеет периодичность, пропорциональную отношению интервала между источниками и интервала между приемниками. В 2D съемках геометрия источников и приемников и полевые расстановки могут быть объединены по правилу «суммарная расстановка» (Ansty, 1986; Morse и др., 1989) для ослабления таких артефактов.

Хорошо известно, что такие артефакты в 2D могут быть ослаблены неоднозначным способом интерполяции трасс, поскольку источником проблемы является крутопадающая составляющая (содержание зеркальных частот), появившаяся вследствие использования редкой геометрии системы наблюдения. В 3D наземных съемках, вследствие больших интервалов линий источников и приемников, и поиска малых расстановок источников и приемников, невозможно применение правила «суммарной расстановки». Любая многоканальная процедура, является ли это суммированием, ДМО или миграцией, чувствительна к таким артефактам. Поскольку интерполяция является трудной или дорогостоящей, то требуется другой способ для ослабления таких артефактов.

Первые известные нам изданные исследования, связанные с проблемами влияния системы наблюдений на 3D кубы и детерминированными способами их решения, были сделаны Meunier и др. (1992) и Baixas и др. (1993). Вскоре Gulunay и др. (1994) предложили аддитивный к данным метод режекторной фильтрации в частотно-волночисловой области, который работал хорошо в основном для плоских волн. Gulunay (1999, 2000) позже дополнил метод для наклонных волн, заметив, что формы артефактов являются частотно-инвариантными, но их положение меняется с частотой и повторяет наклон каждой преобладающей волны.

Работа в частотной области не единственный способ: Drummond и др. (2000) предложили использовать временные срезы и детерминистическую режекторную фильтрацию этих срезов в области волнового числа. Однако, поскольку их основной метод фильтрации временных срезов не был аддитивен к данным и диаграммы шумов могли меняться со временем, они также предложили использование аддитивного подавления помех. Зависящая от геометрии детерминистическая фильтрация временных срезов 3D кубов для подавления влияния системы наблюдения была позже предложена Soubaras (2002). Karagul и др. (2004) показали интересные результаты на наборе данных со сложным строением, используя метод Soubaras. Самой последней является предложенная Al-Banna и др. (2004) фильтрация временных срезов с разложением по сингулярным числам матрицы (SVD), где ослабление влияния системы наблюдений и случайное подавление шума выполняются на одном шаге путем выбора определенных сингулярных чисел.

Изучая похожие предшествующие публикации, можно естественно задаться вопросом, каковы за и против работы с временными или частотными срезами, поскольку они неизбывательно одинаковые, даже когда все частоты отфильтрованы в методе частотной области. Можно было также задаться вопросом, могут ли аддитивные к данным методы, как метод Gulunay (1999, 2000), работать со сложными волновыми картинами или должны ли мы проектировать детерминированные фильтры для каждого отдельного случая. Оставив первый вопрос на будущие исследования, Gulunay и др. (2005) разработали метод режекторной фильтрации частотных срезов по волновым числам, названный FKF3D, с обширным пользовательским средством управления и небольшими требованиями к контролю качества, и проверили его на различных массивах данных, полученных на Ближнем Востоке. В данной статье мы приводим введение в основные принципы метода и некоторые результаты, полученные для близневосточных полевых данных.

## Пространственно-периодические помехи формируют пики в области волнового числа

Может быть использована простая модель для иллюстрации принципов метода FKF3D. Периодически повторяющийся цуг волн-помех проявляется в области волнового числа в виде пикив, наложенных на спектр сигнала. Эти помехи могут быть ослаблены простым масштабированием пикив в этой области. Для модели давайте возьмем сигнал  $s$  с 50 точками, с затуханием от 10 до 5 (изображен красной кривой на рисунке 1).

<sup>1</sup>CGG Americas Inc, Houston, Texas.

<sup>2</sup>CGG Dedicated Centre for PDO, Muscat, Oman.

Давайте также построим модель помехи  $\mathbf{n}$  с 50 дискретами, используя импульс, состоящий из 5 дискретов (-2, -1, 0, +1, +2), который повторяем 10 раз (изображен синей кривой на рисунке 1).

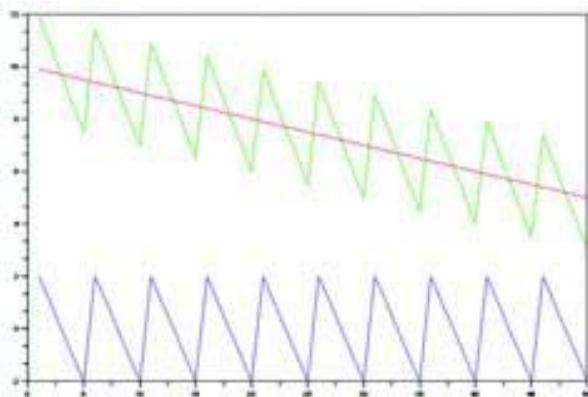
Заметьте, что такое повторение можно рассмотреть как свертку этого короткого импульса помех с гребенчатой функцией в пространстве

$$\text{comb}_5(x) = (1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0),$$

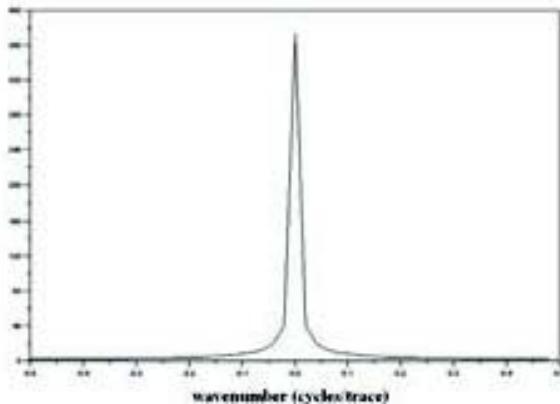
где нижний индекс показывает длину волны. Есть 10 пиков на этой гребенчатой функции (это видно на синей кривой рисунка 1). Сумма,  $\mathbf{d}=\mathbf{s}+\mathbf{n}$ , сигнала и помехи показана зеленой кривой на рисунке 1.

Спектр волновых чисел сигнала  $\mathbf{S}$  показан на рисунке 2. Как было замечено, вследствие пространственной вариации, в сигнале нет нулевых сигнальных компонентов для всех волновых чисел ( $k$ ).

Спектр волновых чисел помехи  $\mathbf{N}$  показан на рисунке 3. Заметьте, что преобразование Фурье (FT) вышеупомянутой гребенчатой функции от  $x$  (в пространстве) является другой гребенчатой функцией для волнового числа ( $k$ ).



**Рис. 1.** Пример колебательных одномерных данных (зеленый), полученных из гладкого сигнала (красный) и периодической помехи (синий).

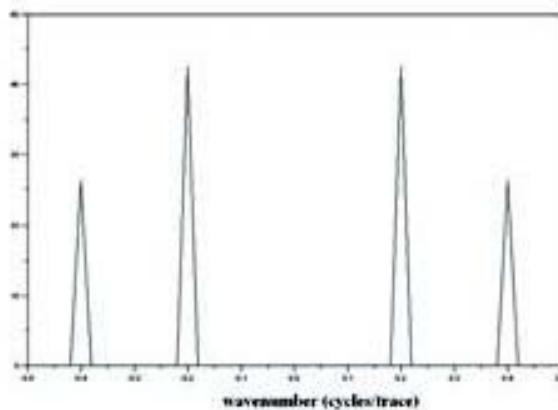


**Рис. 2.** Спектр волновых чисел сигнала (красный) с рисунка 1.

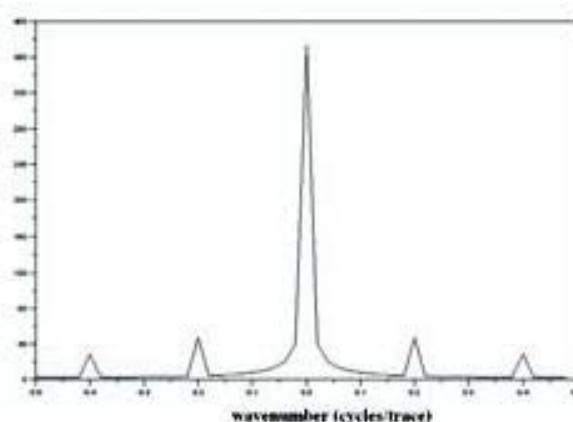
$\text{FT}(\text{comb}_N(x)) = \text{comb}_{1/N}(k)$   
где нижние индексы  $N$  и  $1/N$  показывают периодичность соответственно для  $x$  и  $k$ .

В этом примере, поскольку периодичность  $1/5$  в области волновых чисел, то в этой области будет пять пиков. Однако, хотя мы замечаем, что спектр шумов на рисунке 3 включает пики, мы также замечаем, что величина этих пиков не постоянна и что один пик отсутствует. Причина этого в том, что свертка получена в области волновых чисел. Спектр шумов  $\mathbf{N}$  может быть интерпретирован как дискретизированная версия широкого спектра, сформированного коротким импульсом помех (-2,-1,0,1,2) с этой гребенчатой функцией. Причина отсутствия 5-ого пика (который должен быть на  $k=0$ ) заключается в том, что периодический импульс в пространстве не содержит постоянной составляющей.

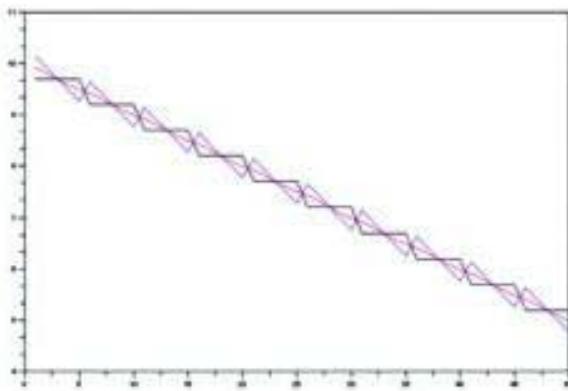
Спектр волновых чисел сигнала плюс помехи показан на рисунке 4. Заметьте, что эта картина очень напоминает спектр, который встречался в области волновых чисел для реальных данных.



**Рис. 3.** Спектр волновых чисел помехи (синий) рисунка 1.



**Рис. 4.** Спектр волновых чисел данных (сигнал плюс помеха – зеленый) рисунка 1.



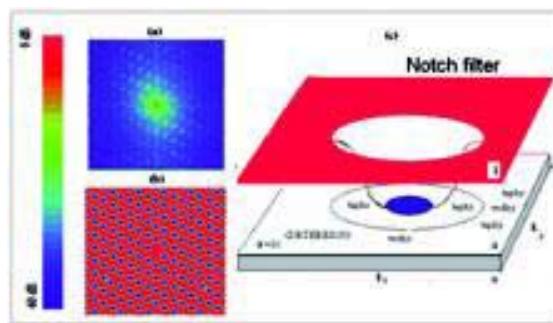
**Рис. 5.** Восстановленный сигнал с масштабным коэффициентом  $a=0.2$  (синий),  $a=0.1$  (красный) и  $a=0.0$  (черный).

Сравнивая это со спектрами сигнала с рисунка 2, мы видим, что эффект добавления помех к сигналу должен прибавить эти четыре пика к данным в области волновых чисел ( $k = -0.4$ ,  $k = -0.2$ ,  $k = +0.2$ , и  $k = +0.4$ ). Масштабируя значения полного спектра в этих точках с постоянными масштабными коэффициентами 0.2, 0.1, и 0.0, и инверсией преобразовывая обратно в пространственную область, получаем синюю, красную и черную кривые, изображенные на рисунке 5. Масштабный коэффициент 0 слишком мал, а масштабный коэффициент 0.2 является слишком большим, в то время, как масштабный коэффициент 0.1 хорошо подходит. Этот простой пример показывает, что, уменьшая значения пиков с собственными значениями, в данном случае 0.1, составляющие сигнала будут надежно восстановлены.

Вышеприведенный анализ для простоты приведен только для одной пространственной размерности. Его можно легко расширить на два пространственных измерения. Когда данные являются ровными, они показывают ту же диаграмму влияния системы наблюдений на всех частотах, и эти диаграммы сосредоточены в нулевом волновом числе. Суммируя отклики данных поперек частот можно получить достоверную форму проявления системы наблюдений для легкого обнаружения точек, которые нуждаются в масштабировании (Gulunay 1994). Когда данные имеют большие наклоны, артефакты кажутся сосредоточенными около каждой наклонной волны и нужно прослеживать наклонные волны в  $f$ - $k$  или  $f$ - $k_x$ - $k_y$  области (Gulunay 1999, 2000).

### Метод FKF3D

В нашем методе под названием FKF3D мы используем соображения, похожие на приведенные выше, и обрабатываем 3D данные в небольших кубах времени-пространство( $x$ )-пространство( $y$ ). Типичный размер такого куба — 400 мс x 100 инлайнов x 100 кроссслайнов. Эти кубы перекрываются на 50% во всех измерениях, чтобы сформировать конечный 3D объем. Для каждого куба мы можем построить четыре диагностических графика: а) входной  $k_x$ - $k_y$  спектр, б) локальные обнаруженные максимумы, в) конечный фильтр, и д) выходной  $k_x$ - $k_y$  спектр.



**Рис. 6.** а) пример усредненного  $k_x$ - $k_y$  спектра, б) заданные режекторные фильтры в  $k_x$ - $k_y$  области, и в) форма режекторного фильтра в  $k_x$ - $k_y$  области.

На рисунке 6а показан усредненный  $k_x$ - $k_y$  спектр, полученный из одного массива полевых данных в небольшом кубе, как описано выше. Центр  $k_x$ - $k_y$  спектра там, где находятся данные и зеленовато-желтые пятна вокруг этого — пики, которые должны быть ослаблены. Положения этих пиков могут быть вычислены автоматически. Кроме того, амплитуда этих пиков, как видно, затухает с удалением от центра. Если эти модели стационарны, то можно наложить модель, как показано на рисунке 6б. Форму фильтра, которую мы используем для 3D данных на каждом найденном пике, можно увидеть на рисунке 6с. Это — масштабная функция, равная единице вне внешнего эллипса (красная зона) и постоянному скаляру меньше единицы внутри внутреннего эллипса (синяя зона). Радиальное косинусное ослабление имеет место в промежутке. Поскольку данные обработаны во временных окнах, значения уровня ослабления могут быть получены изменением времени. Более сильные эффекты системы наблюдений проявляются на малых временах записи (например, в зонах мытигинга) и здесь могут быть желательны большие значения коэффициента ослабления этих пиков. Размеры внутреннего и внешнего эллипсов также контролируют эффективность фильтра.

Наличие пространственных окон и автоматического обнаружения положений пиков также облегчает обработку перекрывающихся съемок. Заметьте, что центр отклика  $k_x$ ,  $k_y$  (поскольку они всегда находятся в области волны) занят сигналом и должен быть защищен в течение процедуры.

### Примеры полевых данных

Мы экспериментировали, используя суммарные данные ряда различных 3D геометрий, среди которых те, что обычно называются «Единичный зигзаг», «Двойной зигзаг», «Тройной зигзаг», «Сдвинутый двойной зигзаг» и «Шахматная доска». Каждая из них представляет собой редкое 3D наблюдение с вариациями плотностей источников и приемников и поверхностного расположения. Как следствие, каждая из них характеризуется различным эффектом системы наблюдений. Здесь мы представим следствия трех из этих экспериментов. На рисунке 7 приведена конфигурация источников и приемников для расположения, известного как Двойной зигзаг. На рисунке 8а приведен  $k_x$ - $k_y$  спектр, полученный по методу FKF3D (в интервале времени 0-400 мс первого пространственного окна размером 100 профилей и 100 кроссслайнов).

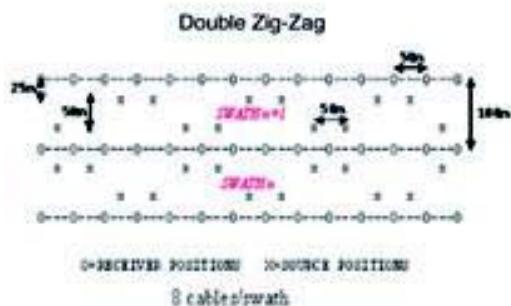


Рис. 7. Полевая конфигурация «Двойной зигзаг» (x=источник, o=приемник).

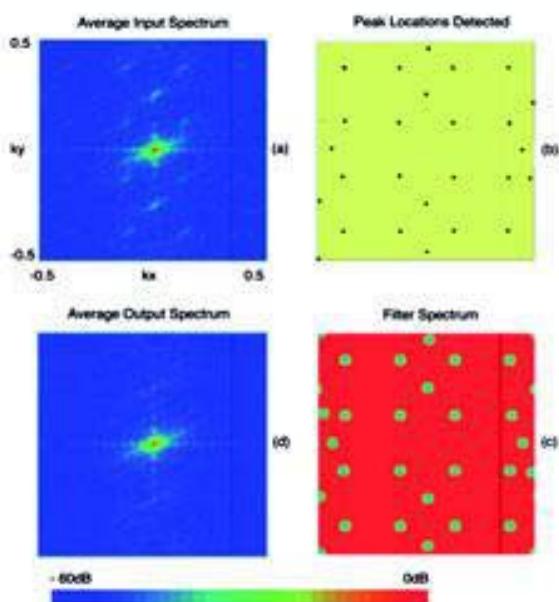


Рис. 8. Диаграммы «Двойной зигзаг» контроля качества данных по методу FKF3D: a)  $k_x$ - $k_y$  спектр, рассчитанный по методу FKF3D для небольшого окна времени-пространство, b) локальные максимумы, c) фильтр, и d) выход.

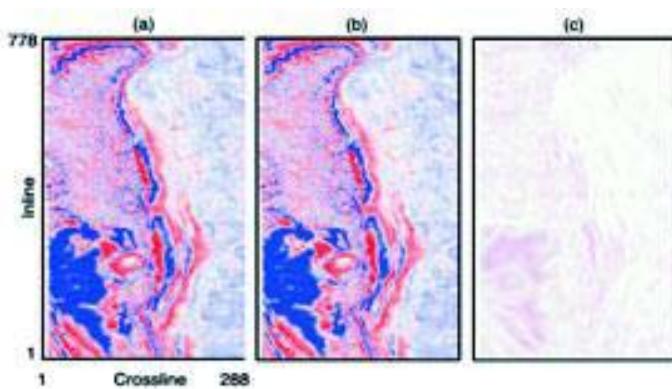


Рис. 11. Временной срез (200 мс) данных с геометрией Двойной зигзаг: a) выход, b) выход, и c) разница

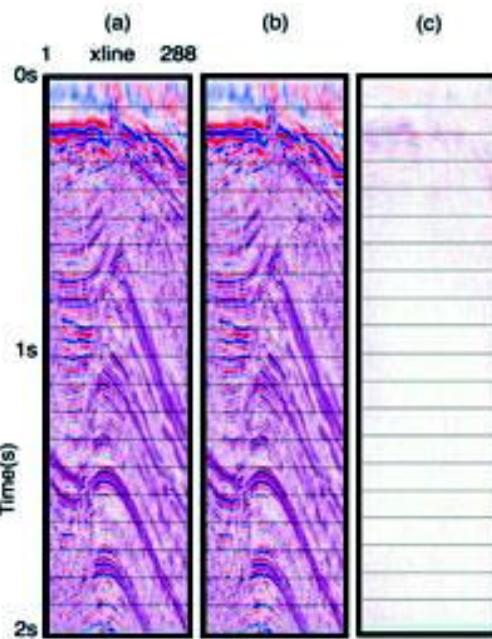


Рис. 9. Инлайн данных с геометрией Двойной зигзаг: a) вход, b) выход, и c) разница

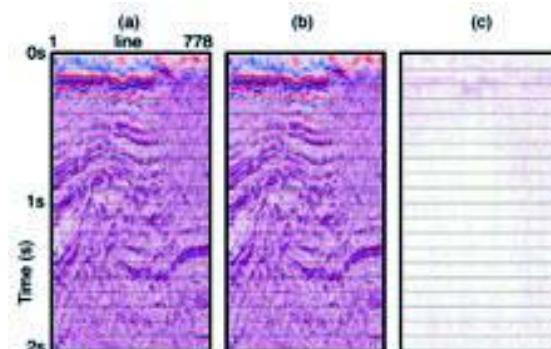


Рис. 10. Кросслайн данных с геометрией Двойной зигзаг: a) вход, b) выход, и c) разница

Эта диаграмма представляет накопленный  $k_x$ - $k_y$  спектр, полученный по данным на всех частотных срезах в том интервале времени. Красный цвет - пик (0 дБ), желтый – приблизительно 30 дБ, и синий – приблизительно 60 дБ. Пространственная периодичность, которая существует в поверхностном расположении, преобразовывается в спектральные пики в  $k_x$ - $k_y$  области таким образом (x=кросслайн, y=профиль).

На рисунке 8б показаны локальные максимумы, обнаруженные методом FKF3D. Рисунок 8с — фильтр, который будет применен к данным в том интервале времени. Заметьте, что красный цвет - 0 дБ, и серый -36 дБ. На рисунок 8д показан усредненный  $k_x$ - $k_y$  спектр после применения фильтра к данным на частотных срезах. Пики хорошо ослабляются, пока точки данных хорошо фиксированы ( $k_x=k_y=0$ ).

На рисунках 9а, б и с приводятся входы, выходы и соответственно разности, на одном из инлайнов данной съемки. Заметьте сложные временные структуры на этих данных. На рисунках 10а, б и с показаны соответствующие разрезы по кросслайну. Ясно, что FKF3D зафиксировал структурированные данные, подавляя влияние системы наблюдений, которое существовало на малых временах. На рисунках 11а, б и с показаны соответственно временные срезы входа, выхода и разности на 200 мс. Влияние системы наблюдений ясно проявилось на разрезе разности (рисунок 11с).

На рисунке 12 показана другая конфигурация съемки на Ближнем Востоке, известная как «Сдвинутый двойной зигзаг». На рисунке 13а мы видим пространственную периодичность, также образованную как спектральные пики в  $k_x$ - $k_y$  области в малом окне (0-400 мс) время-пространство. На рисунках 13б, 13с и 13д показаны соответственно локальные максимумы, обнаруженные по методу FKF3D, финальный фильтр, и  $k_x$ - $k_y$  спектры после применения фильтра к этому окну время-пространство. На рисунках 14а, б и с мы соответственно видим вход, выход и разницу для временного среза на 400 мс. Соответствующие разрезы по профилю и кросслайну приводятся на рисунках 15 и 16.

На рисунке 17 показана другая геометрия съемки на Ближнем Востоке, известная как «Сдвинутый тройной зигзаг» и  $k_x$ - $k_y$  спектр, полученный по данным в малом временном окне. Снова мы видим пространственную периодичность, также в виде спектральных пиков в  $k_x$ - $k_y$  области в малом окне (0-400 мс) время-пространство. На рисунке 18 показаны результаты обработки по кросслайну для первой секунды данных. На рисунках 19а, б и с соответственно приводятся входной, выходной и разностный срезы на 200 мс.



Рис. 12. Полевая расстановка «Сдвинутый двойной зигзаг» (x=источник, o=приемник).

## Обсуждение

Можно было задаться вопросом, может ли данный метод обработать какую-нибудь пространственную периодичность. Мы показали выше, что пространственная периодичность N трасс дает N пиков в области волновых чисел. В двух пространственных измерениях,  $N_x$  погонная периодичность по x направлению и  $N_y$  погонная периодичность в y направлении, возникают  $N_x \cdot N_y$  пики в области волновых чисел. Поскольку  $N_x$  и  $N_y$  становятся все больше и больше, появляется все больше пиков в  $k_x$ - $k_y$  плоскости. Отличие этих пиков, следовательно, становится все более малым. Это означает, что мало того, что слишком много точек будут затронуты фильтром, но также и что сохранение прообраза станет более трудным как только пики будут очень близки к прообразам, которые должны быть подавлены. С типичными малыми пространственными промежутками (100 инлайнов, 100 кросслайнов), используемыми в методе (вследствие сложности структуры), мы обнаружили, что разрешенности не достаточно для того, чтобы точно отфильтровать такие артефакты.

## Заключение

В данном исследовании мы заметили, что влияние систем наблюдения 3D съемок могут быть эффективно ослаблены на многих других конфигурациях съемки данных с умеренной сложностью геологии, без искажения основных данных, применяя режекторные фильтры к частотным срезам в области волновых чисел.

## Благодарности

Мы благодарим Petroleum Development Oman (PDO) и Министерство нефти и газа Омана (MOG) за разрешение

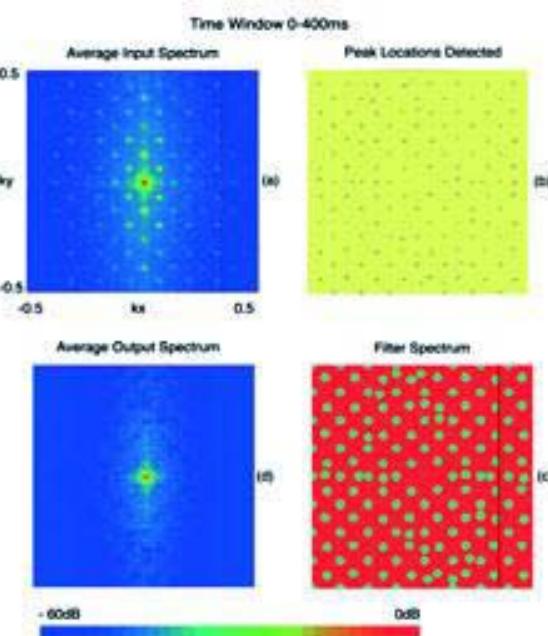


Рис. 13. Контроль качества данных FKF3D «Сдвинутый двойной зигзаг»: а) спектр  $k_x$ - $k_y$ , рассчитанный по методу FKF3D для малого окна времени-пространство, б) локальные максимумы, в) фильтр, и д) выход.

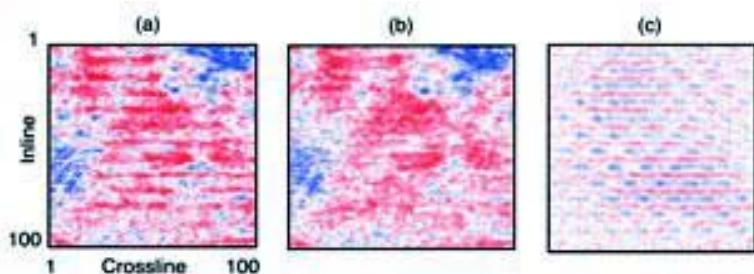


Рис. 14. Временной срез (400 мс) данных, геометрия «Сдвинутый двойной зигзаг», a) вход, b) выход, и c) разница

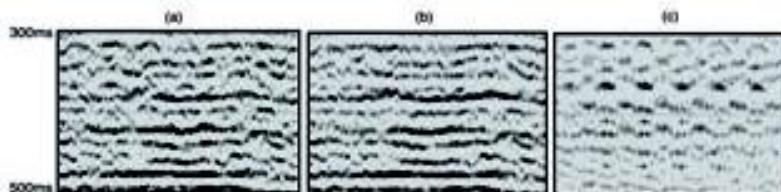


Рис. 15. Инлайн данных, геометрия «Сдвинутый двойной зигзаг», a) вход, b) выход, и c) разница

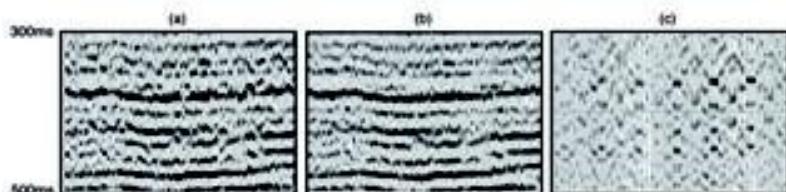


Рис. 16. Кросслайн данных, геометрия «Сдвинутый двойной зигзаг», a) вход, b) выход, и c) разница

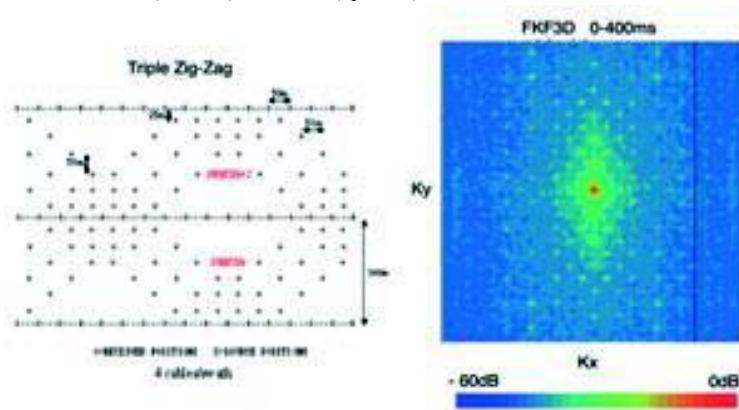
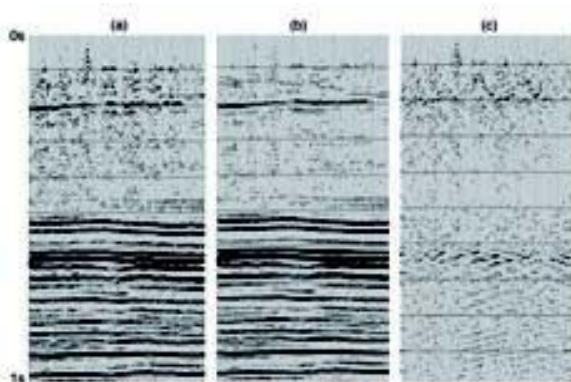
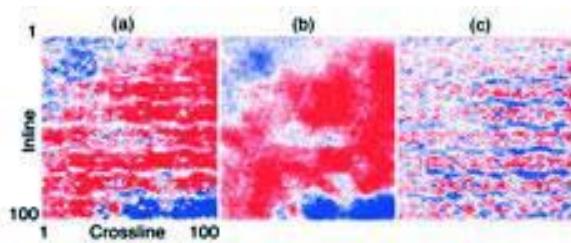


Рис. 17. Полевая расстановка «Сдвинутый тройной зигзаг» ( $x$ =источник,  $o$ =приемник) и спектр  $k_x$ - $k_y$ , рассчитанный по методу FKF3D для малого окна времязаданного пространства.

публикации данных, Philippe Feugere за помощь в получении этого права, Ali Karagul за обратную связь при производственном использовании программы, Edouard Gajewski за помощь в программировании и CGG Americas за разрешение представить данную работу.



**Рис. 18.** Кросслайн данных, геометрия «Сдвинутый тройной зигзаг», а) вход, б) выход, и с) разница



**Рис. 19.** Временной срез данных, геометрия «Сдвинутый тройной зигзаг», а) вход, б) выход, и с) разница

#### Ссылки на литературу

- Al-Bannagi, M.S., Fang, K., Kelamis, P G., and Douglass, G. S. [2004] Acquisition footprint suppression via the truncated SVD technique. *74<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*.
- Ansty, N. A. [1986] Whatever happened to ground roll *Leading Edge*, **5**, 40-45.
- Baixas, F. and Meunier, J. [1993] Examples of methods for counteracting artefacts and errors in 3D seismic surveys. *SEG Summer research workshop*, Expanded Abstracts.
- Drummond, J., Budd, B. and Ryan, J. [2000] Adapting to noisy 3D data - attenuating the acquisition footprint. *70<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*, 9-12.
- Gulunay, N., Martin, F., and Martinez, R. [1994] 3D data acquisition artefacts removal - spot editing in the spatial-temporal frequency domain. *56<sup>th</sup> EAGE Annual Conference*, Session: H049.
- Gulunay, N. [1999] Acquisition geometry footprints removal. *69<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*
- Gulunay, N. [2000] 3D acquisition footprint removal. *62<sup>nd</sup> EAGE Annual Conference*, Session: L0017.
- Gulunay, N., Benjamin, N., and Magesan, M. [2005] Footprint suppression with wavenumber notch filtering for various acquisition geometries, *67<sup>th</sup> EAGE Annual Conference*
- Hill, S., Schultz, M. and Brewer, J. 1999] Acquisition footprint and fold-of-stack plots. *The Leading Edge*, **18**, 6, 686-695.
- Karagul, A., Crawford, R., Sinden, J., and Ali, S. [2004] Recent advances in 3D land processing: Examples from Pakistan Badin Area. *First Break*, **22**, 9, 37-40.
- Meunier J. and Belissent, M. [1992] Reduction of 3D geometry generated artifacts. *6<sup>th</sup> Venezuelan Congress*.
- Morse, P. F. and Hildebrandt, G. F. [1989] Ground-roll sup- pression by the stackarray. *Geophysics*, **54**, 3, 290-301.
- Ronen, S. [1994] Handling irregular geometry: Equalized DMO and beyond. *64<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*, 1545-1548.
- Schleicher, K. L., and , Black, J. L. [1989] Effect of irregular sampling on prestack DMO. *59<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*, 1144-1147.
- Soubaras, R. [2002] Attenuation of acquisition footprint for non-orthogonal 3D geometries. *64<sup>th</sup> EAGE Annual Conference*.