

## Расширение полосы сейсмических частот на основе использования непрерывного вейвлет-преобразования. Extending seismic bandwidth using the continuous wavelet transform

Michael Smith<sup>1</sup>\*, Gary Perry<sup>1</sup>, Jaime Stein<sup>2</sup>, Alexandre Bertrand<sup>3</sup> и Gary Yu<sup>2</sup> рассказывают о реализации методики Расширения полосы частот на основе синтетических и реальных примеров.

**Р**азрешение – это способность идентифицировать отдельные особенности или детали на заданном изображении. По природе сейсмических данных 3D, сейсмическое разрешение включает как вертикальное (временное), так и горизонтальное (пространственное) разрешение. Временное разрешение является функцией частоты заданного сигнала. Достижение оптимального тонкослоистого разрешения требует широкополосного спектра. Поскольку большая часть сейсмических работ является ограниченной по частоте, рекомендуется расширить полосу частот данных так, чтобы это можно было проверить, и она согласовывалась с геологией.

При обработке сейсмических данных, применяются многие методы расширения полосы частот сигнала, в то же время поддерживается приемлемое соотношение сигнал-шум (SNR). Многие процедуры деконволюции, такие как деконволюция сжатия, направлены на получение более острого импульса. Спектральное отбеливание также часто применяется для расширения частотного диапазона, наиболее часто со стороны высоких частот (но иногда также и со стороны низких частот). В сущности, при использовании этих методов часто встречаются две проблемы – то, что они имеют тенденцию к увеличению уровня шума больше, чем сигнала и то, что величина ожидаемого улучшения обычно существенно меньше, чем октава.

Однако были предложены новые методы, которые дают результаты, сравнимые с каротажными синтетическими сейсмограммами и с геологическими условиями (например, построения высокочастотных изображений или HFI, Namarbatan et al., 2006). Большая часть этих методов сконцентрирована на расширении верхнего конца спектра но, в особенности, когда имеется намерение провести инверсию сейсмических данных, также желательно расширить нижний конец спектра. Низкочастотная модель, должна в идеале, расширяться до не более, чем 4-5 Гц. Всякая информация, которая соответствует частотам ниже этих значений, может оказать плохое влияние на результаты инверсии между контрольными точками.

Имея в виду эти критерии, был разработан собственный метод, называемый BE (Расширение полосы частот) в котором используется непрерывное вейвлет-преобразование (CWT) в целях расширения полосы частот сигнала как в сторону высоких, так и низких частот. Прежде всего, мы остановимся на основах теории «разрешения». Затем познакомим вас с методикой BE, которая будет применена к синтетическим и реальным примерам.

### Теоретические основы «разрешения»

Расширение полосы частот сигнала в обе стороны спектра, длительное время являлось целью регистрации

и обработки сейсмических данных. Расширение спектра, прежде всего расширение спектра в сторону высоких частот, являлось предметом споров ввиду того, что из-за поглощения преимущественно высоких частот в среде, они часто теряются и их невозможно восстановить в спектре. Многие технологии, такие как Q-компенсация (например Wang, 2006) доказали, что это предположение неверно.

При заданной частоте дискретизации по времени  $\Delta t$ , максимальная теоретическая частота в спектре, называемая частотой Найквиста  $F_m$ , при которой в данных не будет алиясинга, определяется как:

$$F_m = \frac{1}{2\Delta t} \quad [1]$$

Этот предел представляет собой максимальную частоту, на которой сигнал характеризуется энергией, отвечающей теореме о дискретизации. Предел классического разрешения  $\lambda_R$ , получаемый из критерия Релея, говорит о том, что отражение от кровли и подошвы тонкого слоя, может быть выделено при мощности до четверти преобладающей длины волны  $\lambda_D$  ( $\lambda_R \sim 1/4 \lambda_D$ ). Однако это не означает, что невозможно обнаружить более тонкие слои: Widess (1973) доказал, что амплитуда отражения, идущего от такого тонкого слоя, меняется с изменением мощности слоя. Он показал, что, несмотря на то, что полностью разделить кровлю и подошву тонкого слоя может быть сложно, влияние этой мощности на сигнал все же можно измерить. Его работа раздвинула предел разрешения на новый минимум порядка половины от критерия Релея. Новая разрешаемая мощность  $\lambda_W$  определяется как  $\lambda_W \sim 1/2 \lambda_R \sim 1/8 \lambda_D$ .

Это доказательства отражающей способности ниже разрешения подразумевает, что сейсмический импульс содержит информацию об отражениях за пределами доминантной частоты сейсмического импульса и что высокие частоты можно потенциально восстановить посредством цифровой обработки – мотивация разработки нового расширения полосы частот.

### Расширение полосы частот (BE) на основе CWT

Традиционный метод анализа сейсмотрассы в частотной области использует преобразование Фурье или быстрое преобразование Фурье (FFT). Проблема в использовании FFT

<sup>1</sup> Geotrace, Dallas, TX, USA.

<sup>2</sup> Geotrace, Houston, TX, USA.

<sup>3</sup> Geotrace Norge, Stavanger, Norway.

\* Автор-корреспондент, email: msmith@geotrace.com.

## Методики увеличения эффективности

заключается в том, что оно преобразует локальную информацию в глобальную информацию. Решение на основе краткого преобразования Фурье облегчает проблему в том смысле, что сохраняет некоторую локальную информацию. Однако небольшое окно накладывает ограничения на частоты, а размер локализации ограничен одной выбранной величиной окна. Вейвлет-преобразование не имеет этих ограничений и позволяет проводить анализ как локальной, так глобальной информации одновременно.

Здесь, мы используем CWT для выполнения анализа временных рядов, на которые были разложены соответствующие амплитудные и фазовые компоненты сейсмической трассы, как в частотной, так и во временной областях. CWT определяется как свертка временных рядов  $f(t)$  с масштабированным ( $s$ ) и трансформированным ( $\tau$ ) импульсом  $\psi(t)$ .

$$W(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi^* \left( \frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad [2]$$

где (\*)  
указывает на  
комплексное  
сопряженное.

Масштабированные вейвлеты называются дочерними вейвлетами, поскольку их перемасштабируют из материнского вейвлета  $\psi$ .

CWT 'в теории являются бесконечно избыточными – крайняя избыточность является меньшей проблемой, чем можно подумать; ряд исследователей обнаружили способы быстрого извлечения существенной информации из этих избыточных преобразований' (Hubbard, 1998). Поскольку применение CWT является дискретным оператором, а не непрерывным оператором, требуется сделать выбор того сколько дочерних вейвлетов будет использовано, таким образом насколько избыточна будет система (бесконечная избыточность просто не практична). Для восстановления входных временных рядов из преобразования путем расчета их реконструкции достаточно минимум 10 величин (голосов) на октаву. Более того, материнский вейвлет  $\psi$  также должен удовлетворять условию допустимости (Qian, 2002) поскольку анализируемый импульс будет использован в целях реконструкции исходных временных рядов после расширения полосы частот.

Мы решили использовать вейвлет Морлета в качестве материнского вейвлета. Вейвлет Морлета является комплексной функцией, которая представляет плоскую волну, модулированную функцией Гаусса. Комплексная природа вейвлета позволяет производить расчет амплитуды и фазы для каждого масштаба в заданное время. Выбор этого вейвлета определялся природой анализируемой задачи. В нашем случае, мы анализируем сейсмическую трассу, а плоская волна модулированная функцией Гаусса, была бы хорошей аппроксимацией для анализа сейсмических временных рядов. Вейвлет Морлета задается как:

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\alpha\eta} e^{-\eta^2/2} \quad [3]$$

CWT 'дает избыточное, но также крайне детальное описание сигнала в терминах как времени, так и частоты' (Walker, 1999). Эти свойства применяются для предсказания гармоник и субгармоник, используемых для расширения полосы частот. Из-за того, что CWT оперирует в области время-частота

оно ограничено принципом неопределенности, который говорит о том, что мы не можем знать время и частоту с одной и той же точностью одновременно. Это очевидно ограничивает количество информации, используемой для предсказания гармоник более высокого и низкого порядка в любое заданное время. Вот почему было выбрано CWT избыточное по природе в качестве нашего преобразования в противовес дискретному вейвлет-преобразованию, (DWT), которое использует ортонормированный базис и таким образом, не избыточно. Нечеткая природа CWT позволяет нам производить расчет гармоник и субгармоник нечетким образом, то есть, имея неполную информацию, как во временной, так и в частотной областях.

Разрешение по времени и частоте меняются с масштабом (-ами) в соответствии со стандартным отклонением материнского вейвлета во временной области ( $\Delta_t$ ) и частотной области ( $\Delta_\omega$ ) как  $s\Delta_t$  и  $\Delta_\omega/s$ . Таким образом, разрешение во времени возрастает, а разрешение в частотной области уменьшается для малого масштаба (более высоких частот), а разрешение во времени уменьшается, и разрешение по частоте увеличивается с увеличением масштаба (более низкие частоты). Иными словами, в нижней части спектра разрешение по частоте более важно, чем разрешение по времени, а в верхней части спектра все наоборот. Результатом является то, что стандартные отклонения времени и частоты постоянны для всего анализируемого частотного спектра (Qian, 2002). Это дает нам наиболее оптимальную картину во временной и частотной областях.

Путем использования анализа временных рядов CWT, мы можем рассчитать гармоники и субгармоники по имеющейся полосе частот сейсмического вейвлета. Гармоники являются целым кратным основной частоты, а подгармоники отношением единицы к целому кратному (например, 1/2). Поскольку мы используем комплексный вейвлет, информация по амплитудам и фазам доступна для этого расчета. Выполняя свертку частот гармоник и субгармоник с сейсмической трассой, мы можем восстановить эту информацию и лучше определить коэффициенты отражения, которые сложно определить иным методом. Это определение отражательной способности выполняется путем расширения полосы частот вейвлета при добавлении гармоник и/или подгармоник к сейсмическому трассе. Поскольку это процесс наподобие свертки, частоты гармоник и субгармоник, которые соответствуют отражательной способности в сейсмическом трассе, будут добавляться к сейсмическому вейвлету, но гармоники, которые не соответствуют отражательной способности, выпадут из преобразования.

Окончательный этап реконструкции – модифицирование временных последовательностей CWT из области времен и масштабов в функцию только времени, наша новая сейсмическая трасса будет иметь расширенную полосу частот. Формула реконструкции задается:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|s|}} W(\tau, s) \psi \left( \frac{t - \tau}{s} \right) \frac{ds d\tau}{s^2} \quad [4]$$

где  $C_\psi$  задается условием допустимости. При реализации алгоритма, сейсмическая трасса трансформируется CWT. Основные частоты выбираются на основе

## Методики увеличения эффективности

выбора пользователя, то же касается и частотного диапазона для расчета гармоник и субгармоник. Точки со значениями частоты, которые характеризуют диапазон используемых частот, называются осевыми частотами. Каждая осевая частота выбирается путем анализа сейсмического спектра, а частота, которая ниже этой осевой частоты на октаву, используется для расчета гармонических частот или масштабов. Для подгармоник, выбираются различные осевые частоты по сейсмическому спектру, а октава над этой частотой используется для расчета подгармоник или масштабов. Гармоники и/или подгармоники могут распространяться вверх/вниз на 1-2 октавы, конечно с учетом Найквиста и границ 0 Гц.

Производится регулировка плотности энергии таким образом, чтобы гармонические и субгармонические масштабы давали лучшую форму амплитудного спектра. Эти настройки выполняются перед тем как добавлять обратно гармонические масштабы к спектру сейсмического вейвлета. Трансформированная сеймотрасса, с добавленными гармониками и/или субгармониками, затем реконструируется для получения новой сеймотрассы с расширенной полосой частот.

**Пример модели клина**

Мы протестировали алгоритм BE расширения в область высоких частот на простой модели клина в целях анализа

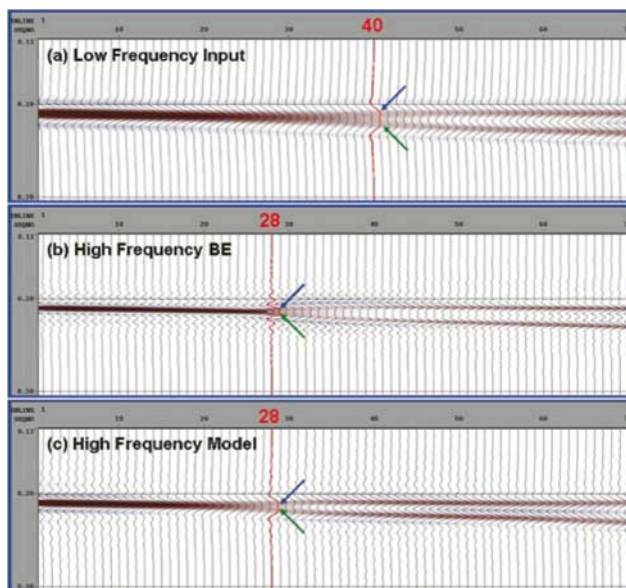


Рисунок 1 Расширение полосы частот, применяемое к модели выклинивания. (a) низкочастотная синтетика (на входе в BE), (b) высокочастотное расширение для (a) (на выходе BE), (c) высокочастотная синтетика для сравнения с результатами BE. Синяя и зеленая стрелки указывает на ограничение разрешения для отражений от кровли и подошвы клина, соответственно.

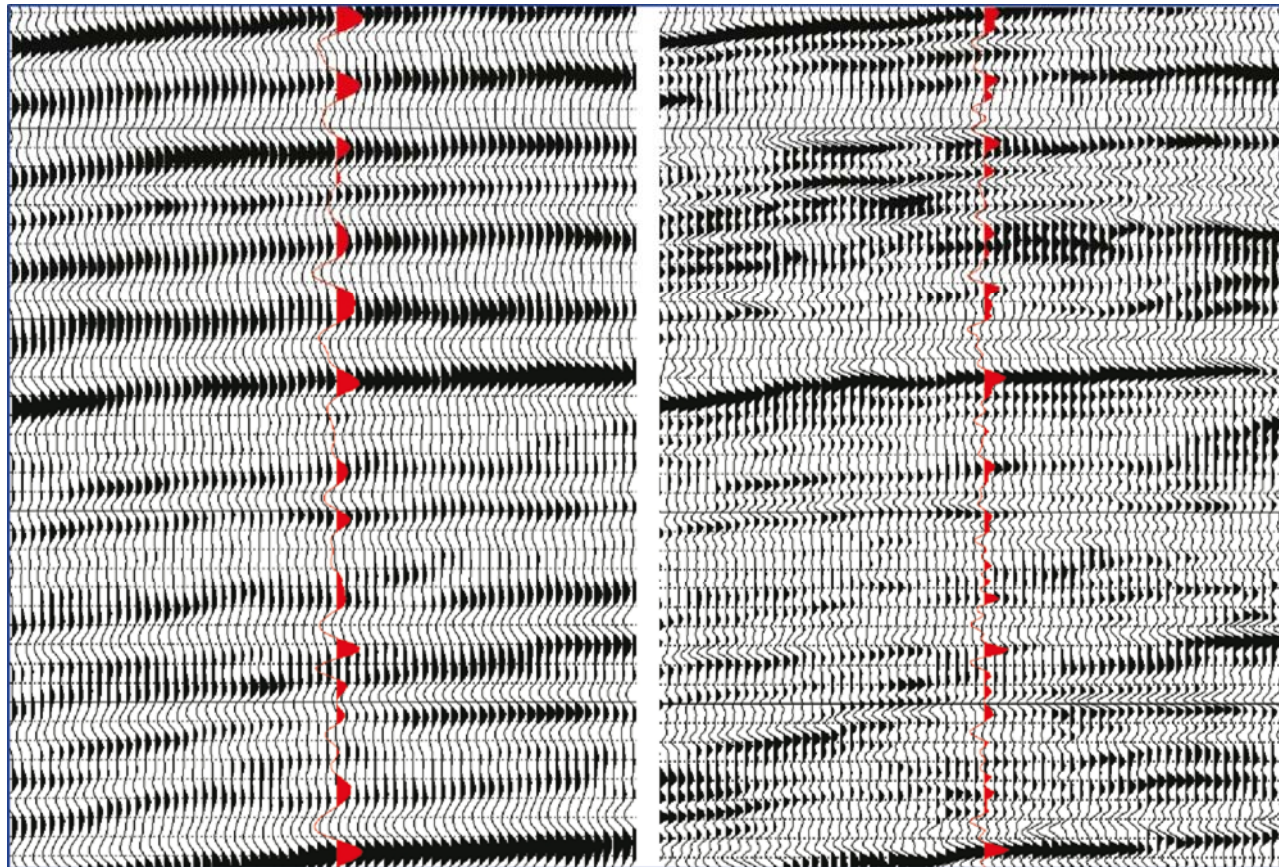


Рисунок 2 Входные данные (слева) и данные с расширенным частотным диапазоном (справа) с наземной 3D съемки. Красные линии – это синтетические сейсмограммы, полученные с использованием каротажной кривой отражательной способности и извлеченного вейвлета для соответствующих данных. Интервал между линиями времен - 100 мс.

## Методики увеличения эффективности

результатов классической задачи разрешения. Модель включает плоскую кровлю с положительной отражательной способностью и наклонно-падающей подошвой с положительной отражательной способностью равной значению в кровле. Отражающая граница подошвы имеет положительное падение 0.3 мс/трасса, это означает, что клин расширяется с увеличением номеров трасс по направлению к правой части разреза. Реалистичный частотный состав (7-55 Гц через полрumba) используется для моделирования низкочастотного отклика клина (Рисунок 1a). В этом частотном диапазоне слой можно полностью

различить, согласно критерию Релея, на трассе 40 (мощность = 11.7 мс) где выделяются отражения от кровли и подошвы.

Новый подход BE используется в попытке улучшения разрешения клина. После BE (Рисунок 1b), отражения от кровли и подошвы клина можно выделить на трассе 28, что соответствует тому же разрешению что и у того же клина, который был смоделирован с использованием частотного диапазона 7-85 Гц (Рисунок 1c).

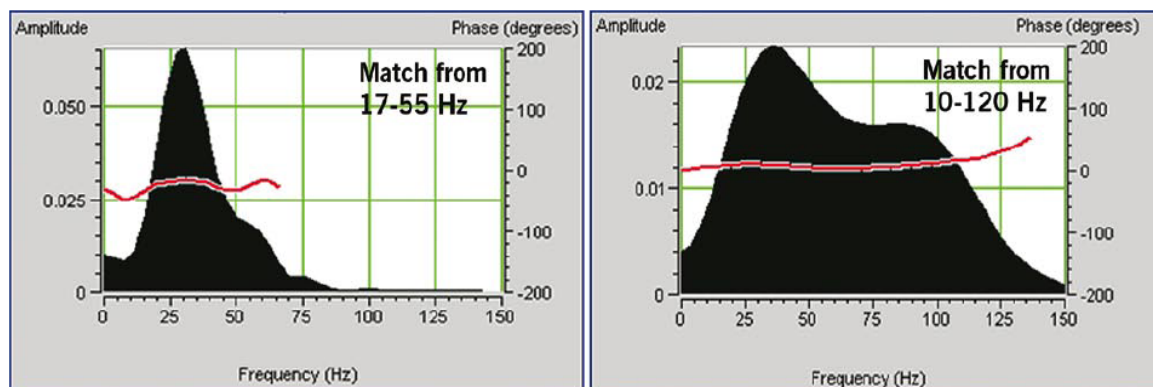


Рисунок 3 Амплитудный и фазовый спектры извлеченных импульсов (входной слева и BE справа). Это очень характерно для процедуры поскольку показанные входные данные имеют хорошее совпадение со скважиной для 17-55 Гц (менее чем две октавы) с почти нуль-фазовой характеристикой, тогда как данные с расширенной полосой частот соответствуют скважине для 10-120 Гц (3.5 октав), при этом все еще остается нуль-фазовая характеристика.

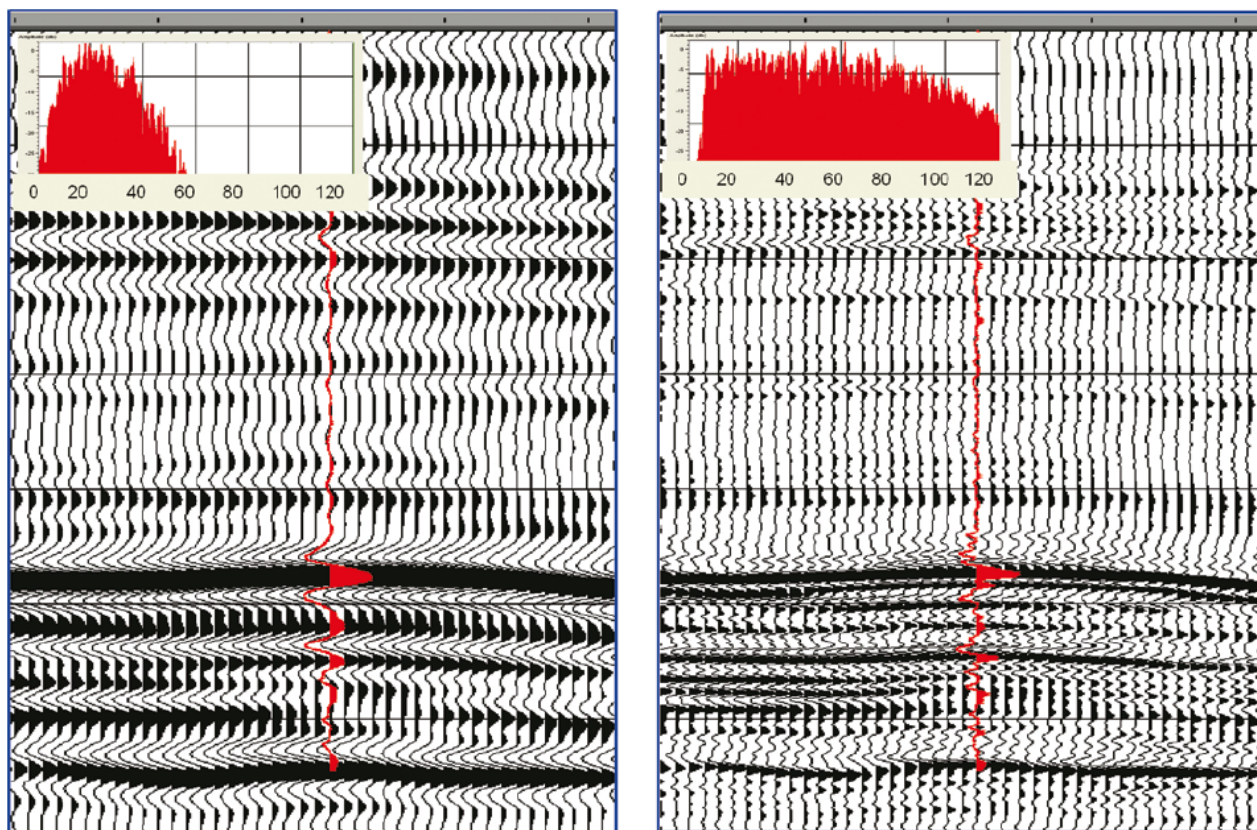


Рисунок 4 Входные данные в левой части характеризуются используемыми частотами до порядка 55 Гц, тогда как данные с расширенной полосой частот (справа) имеют высокие частоты в спектре за 120 Гц и хорошую корреляцию со скважиной.

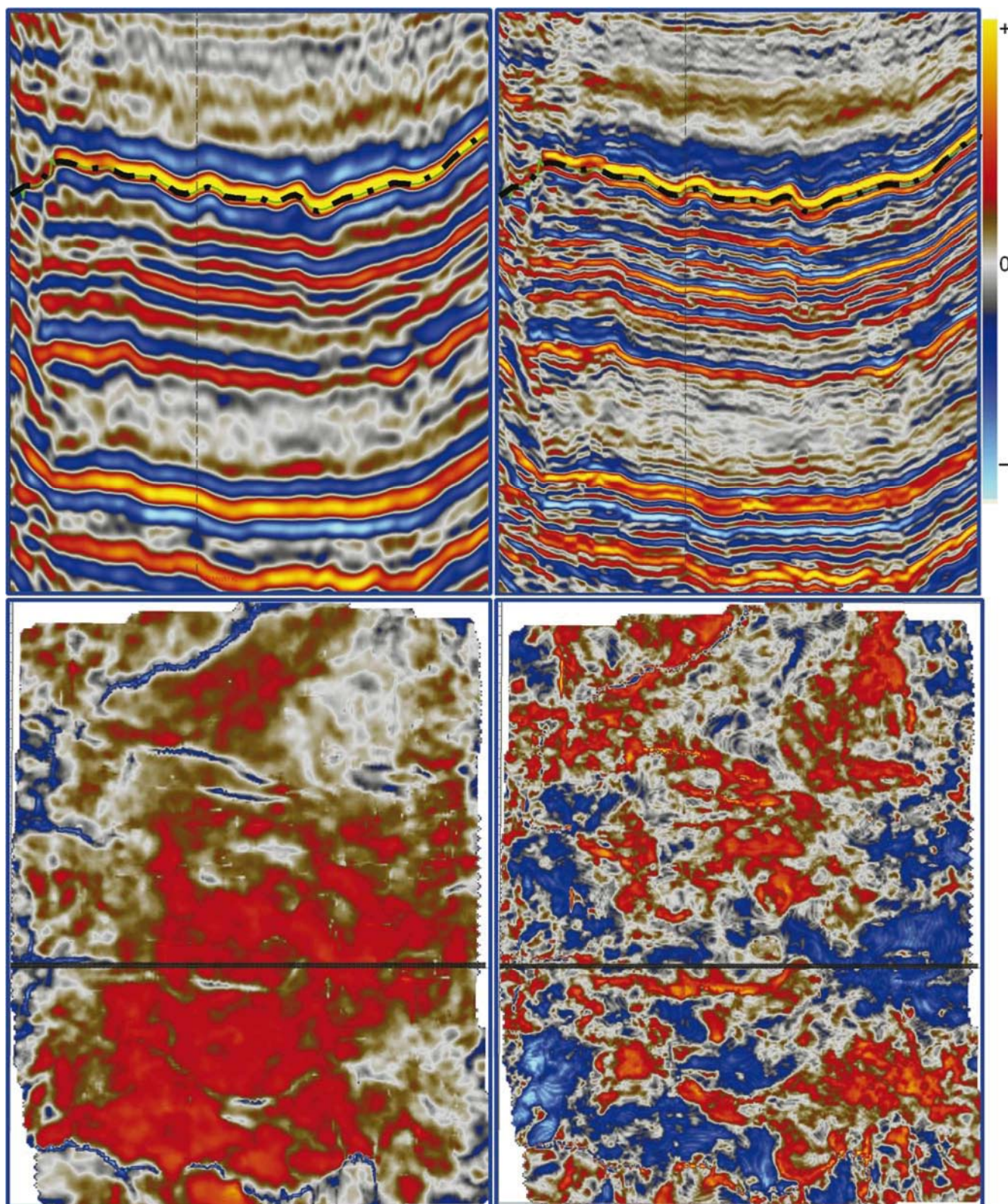


Рисунок 5 В верхней части рисунка показаны вертикальные разрезы через 3D при нормальной полосе частот (слева) и после расширения полосы частот (справа). В верхней части имеются два горизонтальных среза 20 мс под кровлей карбонатного маркера. Кровля карбонатного коллектора отображается в виде горизонта с черным пунктиром на вертикальных разрезах, местоположение вертикального разреза отмечено жирной черной линией.

## Методики увеличения эффективности

Применение ВЕ к модели клина оказалось успешным для увеличения сейсмического разрешения в соответствии с критерием Релея. Иными словами, ВЕ может существенно улучшить временную разрешенность путем оптимального расширения исходной полосы частот (Рисунок 1a) до более полного диапазона (Рисунок 1b), который соответствует целевому диапазону (Рисунок 1c) и в конечном итоге увеличивает разрешение тонких слоев.

### Пример реальных данных 1

Этот первый пример взят из наземных работ 3D в тонком обломочно-кремниевом коллекторе. Сравнение до и после ВЕ приведено на Рисунке 2. Входной диапазон частот достигает 17-55 Гц, и достигается относительно хорошее соответствие с синтетикой (корреляция 70%). При использовании ВЕ, гармоники и субгармоники используются для моделирования одной дополнительной октавы данных в области как низких так и высоких частот спектра. Выходной частотный диапазон 10-120 Гц. При таком расширенном спектре, мы можем наблюдать более богатые низкие частоты, а также более детальные высокие частоты. Одним из недостатков большинства методик расширения спектров является то, что они также уменьшают соотношение сигнал-шум. Здесь, SNR остается на том же уровне, что доказывает хорошее совпадение результата ВЕ с высокочастотной синтетики (корреляция 68%).

Амплитудный и фазовый спектры извлеченных вейвлетов (входного и ВЕ) также представлены на Рисунке 3. Они являются дополнительной диагностикой большей уверенности выделения в данных с расширенным диапазоном, чем на истинной отражающей способности, измеренной по скважинным данным. Они демонстрируют, что соответствие между средой и сейсморазведкой хорошее в более широком частотном диапазоне (с менее чем двух октав до 3.5 октав). Также продемонстрировано, что ВЕ дает очень стабильный нуль-фазовый спектр во всем частотном диапазоне.

### Пример реальных данных 2

Этот второй пример реальных данных соответствует карбонатно-рифовому нефтеносному пласту из наземной съемки 3D. Геологической задачей было определение пористости для данных с более высоким разрешением. На рисунке 4 иллюстрируется сравнение разреза временной миграции до суммирования (PSTM) до и после ВЕ с его соответствующим амплитудным спектром и синтетикой на основе извлеченного вейвлета. Входная частота до 55 Гц, частота после расширения ВЕ- достигает 140 Гц. Корреляция сейсмиков со скважиной до и после ВЕ достаточно высока и сравнима с 70%.

Для более глубокого понимания влияния расширения полосы частот, сравнение *до-и-после* выполнено с помощью горизонтального среза в кровле коллектора и показано на Рисунке 5. Улучшение разрешения после ВЕ для интерпретации в терминах тонких геологических деталей и трендов очевидно. Цветовая гамма калибрована со скважинами и темно-синий цвет соответствует хорошей

пористости. При более высоком частотном диапазоне, теперь более легко и надежно можно идентифицировать тренд пористости – это является инструментом экономии времени и увеличения производительности, потому что мы можем видеть и интерпретировать геологию быстрее и с большей надежностью.

### Заключение

Расширение полосы частот на основе использования гармоник и подгармоник предсказанное и рассчитанное с SWT увеличит сейсмическое разрешение, что позволит выполнять интерпретацию более тонко и детально. Имеются ограничения: теорема дискретизации ограничивает максимальную извлекаемую отражательную способность частотой Найквиста и анти-алиасинговые фильтры опустят этот предел ниже частоты Найквиста. Также, частоты, доступные для предсказания гармоник и пределов, вводимых жесткой полевой фильтрацией и режекторным фильтром, а также принцип неопределенности, влияют на способность расширения полосы частот.

Модель Widess предполагает, что сейсмическая отражательная способность имеет разрешение ниже одной четверти преобладающей длины волны. Эту информацию можно извлечь, что даст увеличение разрешения путем добавления гармонических и субгармонических частот к данным. Кроме того, хорошо известно, что желательно иметь, по крайней мере одну с половиной октаву, если не две октавы, полосы частот для уменьшения боковых лепестков и уменьшения 'звона' в сейсмических данных. Как только это сделано, многие детали, такие как незначительные разломы, налегания, выклинивания, и другие тонкие стратиграфические особенности могут выйти на свет. Все эти детали могут оказывать большое влияние на интерпретацию сейсмических данных и открытие месторождений.

Расширение полосы частот в нижней части спектра также возможно при использовании под-гармоник, предсказанных по имеющимся данным. Эта возможность крайне полезна для широкополосной инверсии в случае, когда во входных сейсмических данных отсутствует большая часть низкочастотного куска спектра.

Три представленные здесь пример (синтетических и реальных данных) доказали преимущества новой методики. Существенно улучшилась тонкослоистое разрешение для модели клина. В реальных примерах были получены не только более широкие полосы частот, но результаты были подтверждены на основе скважинной диагностики.

### Литература

- Hamarbatan, N., Ajaily, A. and Hassab, A. [2006] High frequency imaging in an exploitation production environment - the Murzuq Basin, case study. 68<sup>th</sup> EAGE Annual Conference and Exhibition, Extended Abstract, F005.
- Hubbard, B. B. [1998] *The world according to wavelets - the story of a mathematical technique in the making*. 2<sup>nd</sup> Edition, A K Peters.
- Qian, S. [2002] *Introduction to time-frequency and wavelet transforms*. Prentice-Hall.
- Walker, J.S. [1999] *A primer on wavelets and their scientific applications*. CRC Press.
- Wang, Y. [2006] Inverse Q-filter for seismic resolution enhancement. *Geophysics*, 71, 51-60.
- Widess, M. B. [1973] How thin is a thin bed? *Geophysics*, 38, 1176-1180.