

Сравнение методов спектрального разложения

Comparison of spectral decomposition methods

John P. Castagna, университет Хьюстона, и Shengjie Sun, Fusion Geophysical, обсуждают ряд различных методов спектрального разложения, затем предлагают некоторые улучшения, возможные с их собственными вариациями разложения по методу «поиск совпадения».

В сейсморазведке, спектральное разложение связано с любым методом, в котором производится непрерывный частотно-временной анализ сейсмической трассы. Поэтому спектр частот вычисляется для каждого отсчета времени сейсмической трассы. Спектральное разложение использовалось для различных приложений, включая определение толщины слоя (Partyka и другие, 1999), стратиграфическую визуализацию (Marfurt и Kirilin, 2001) и прямое обнаружение углеводородов (Castagna и др., 2003; Sinha и др., 2005).

Спектральное разложение — неоднозначный процесс, поэтому одна сейсмическая трасса может привести к различным частотно-временным анализам. Существует разнообразие методов спектрального разложения. Они включают DFT (дискретное преобразование Фурье), MEM (метод максимальной энтропии), CWT (непрерывное вейвлет-преобразование) и MPD (разложение по методу «поиск совпадения»). Ни один из этих методов, строго говоря, не является «правильным» или «неправильным». Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, и в различных приложениях требуются различные методы. DFT и MEM включают явное использование окон, а расчеты в окнах сильно сказываются на временном и спектральном разрешении выходных данных. Вообще, дискретное преобразование Фурье предпочтительно в случае оценки спектральных характеристик в длинных окнах, содержащих много отраженных волн, со спектрами в общем случае, на которые влияют расстояния между осями синфазности. MEM часто трудно параметризовать, к тому же этот метод может давать неустойчивые результаты.

CWT эквивалентна временной узкополосной фильтрации сейсмической трассы и имеет преимущество перед DFT для широкополосных сигналов в том, что окно, соответствующее набору вейвлетов, зависит от частоты. Однако CWT имеет большое неудобство, заключающееся в том, что используемые вейвлеты должны быть ортогональными. Широко используемый волновой пакет Morlet, к примеру, имеет недостаточное вертикальное разрешение из-за множества боковых лепестков. Кроме того, для типичных сейсмических сигналов, расчет в окнах, зависящих от частоты, присущий CWT не особенно важен, и опыт показал, что дискретное преобразование Фурье с гауссовым окном соответствующего размера дает почти тот же результат, что и CWT с вейвлетом Morlet. MPD (Mallat и Zhang, 1993) — более интенсивный процесс в вычислительном отношении, чем другие, однако, как будет показано в данной статье, он характеризуется лучшим временным и спектральным разрешением, если используется компактный исходный волновой пакет.

Разложение по методу "поиск совпадения" включает взаимную корреляцию набора вейвлетов и сейсмической трассы. Проекция вейвлета, который лучше всех коррелируется с сейсмической трассой, затем вычитается

из трассы. Набор вейвлетов затем коррелируется с разностью, и снова проекция вейвлета, который коррелируется лучше всех, вычитается. Процесс повторяется многократно, пока энергия получившейся разности не становится ниже некоторого заданного порога. Пока набор вейвлетов встречает простые условия допустимости, процесс будет сходиться. Наиболее важно, волновые пакеты не должны быть ортогональными. Результатом процесса является набор вейвлетов с их соответствующими временами вступления и амплитудами для каждой сейсмической трассы. Обратное преобразование достигается просто суммированием набора вейвлетов и разности, таким образом, восстанавливается первоначальная трасса. Набор вейвлетов быстро преобразовывается в частотно-временной анализ совмещением спектров частот вейвлетов. Простой поиск совпадения имеет сложность в определении точного времени вступления интерферирующих вейвлетов — обычно это немного сдвигает вейвлеты, что также приводит к немного неправильной центральной частоте вейвлета. Кроме того, может быть замечено, что процесс зависит от последовательности: небольшое изменение сейсмической трассы может привести к совершенно другому порядку вычитания. Таким образом, это может привести к поперечной неустойчивости неоднозначного частотно-временного анализа. Взаимная корреляция набора вейвлетов с сейсмической трассой — по существу непрерывное вейвлет-преобразование, поэтому можно отметить, что метод включает многократно выполняемые сотни, если не тысячи, вейвлет-преобразований для каждой сейсмической трассы.

В данной статье мы используем вариацию метода «поиск совпадения» под названием поиск экспоненциального разложения (EPD). Метод работает с такими сложными интерференционными картинками, как содержание «поглощающих колодцев» в правильных локализациях вейвлетов, и выбранная локализация вейвлета постепенно приводится к правильной локализации. Большим преимуществом EPD перед другими методами является то, что в нем нет расчетов в окнах и соответствующего «размывания» спектра. Спектры отражений от отдельных границ раздела, которые могут быть разделены данным методом, такие же, как для сейсмических вейвлетов, производящих такие отражения. Таким образом, метод может с уверенностью использоваться для прямого обнаружения углеводородов и стратиграфической визуализации маломощных пластов.

Классический принцип неопределённости Гейзенберга утверждает, что произведение временной и частотной разрешающей способности — константа. Обычно приходится платить уменьшением разрешающей способности в одной области для повышения в другой. В EPD, нет расчетов в окнах, и поэтому разрешающая способность ограничивается шириной полосы частот

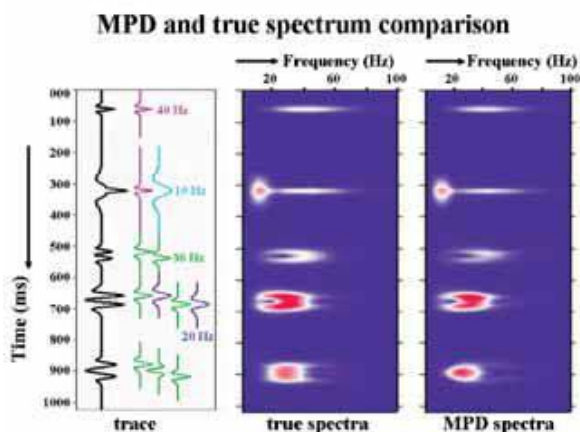


Рис. 1. Синтетическая трасса, полученная суммированием вейвлетов с различными центральными частотами, истинный частотно-временной амплитудный анализ, и частотно-временной спектральный анализ MPD. Суммированные вейвлеты размещены согласно их времени вступления, а центральная частота обозначена цветом вейвлета (светло-голубой — 10 Гц, темно-синий — 20 Гц, зеленый — 30 Гц, лиловый — 40 Гц). Цветовая шкала спектров — от синего (нулевая амплитуда) до красного цвета (самая высокая амплитуда).

цифровых сейсмических данных, окна здесь не могут влиять. Таким образом, принцип неопределенности Гейзенберга не вступает в силу. В результате, EPD обеспечивает лучшую временную и спектральную разрешающую способность, чем другие методы. При сравнении методов спектрального разложения важно помнить, какова цель анализа.

Не существует понятия «правильного» или «неправильного» спектрального разложения. Вопрос, который нужно задавать, — «полезен» ли применяемый метод или «не полезен» для конкретного применения. Если целью является определение мощности пласта для разрешимых отражений, то необходимы методы с низкой разрешающей способностью по вертикали, которые не реагируют на отдельные отражения. Таким образом, для определения толщины мощного пласта, годится DFT, в то

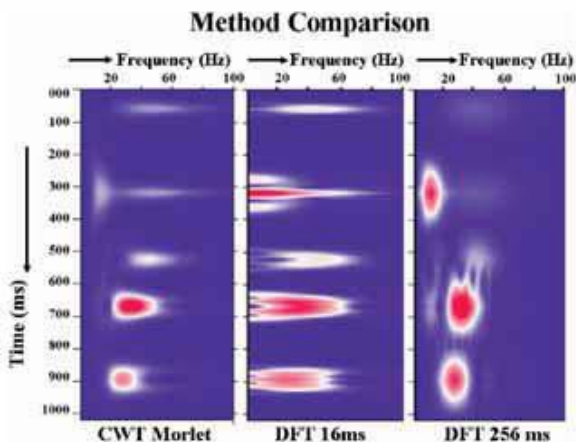


Рис. 2. Частотно-временной анализ сейсмической трассы, приведенной на рис. 1, включающий непрерывное вейвлет-преобразование (CWT) с вейвлетом Morlet, и дискретное преобразование Фурье в окнах без переходных зон на краях размером 16 и 256 мс.

время как спектры EPD не будут зависеть от мощности пласта для разрешения кровель и подошв. Если вы интересуетесь спектральными характеристиками отдельных отражающих горизонтов (например, для измерения поглощения), то интересующий отражающий горизонт должен быть выделен методом разложения. Мы покажем, что EPD наиболее подходящий метод для определения отдельных отражающих горизонтов, чем другие методы разложения. С другой стороны, можно задуматься о стратиграфических моделях для границ раздела, мощность которых значительно меньше стандартной мощности тьюнинга, и которые порождают сложные отражения. В этом случае, спектры EPD могут использоваться для настройки стратиграфической визуализации, в то время как спектры DFT могут быть подвержены влиянию интерференций с другими отдельными отражениями в пределах анализируемого окна.

Синтетические примеры

Единственное обстоятельство, где известно «правильное» частотно-временное разложение, — случай синтетических данных. Вспоминая принцип суперпозиции Фурье, если мы знаем времена вступления и амплитуды вейвлетов, суммированных для получения синтетической сейсмической трассы, и мы знаем спектры этих вейвлетов, то мы можем определить спектр частот как функцию времени, просто суммируя спектры сдвинутых по времени и взвешенных по амплитуде вейвлетов. В случае синтетической сейсмограммы, мы знаем спектр сейсмического импульса, поэтому времена вступления и амплитудное взвешивание определены коэффициентами отражения. Поучительно сравнение методов спектрального разложения с истинным частотно-временным анализом для синтетических трасс различного типа.

На рисунке 1, построена необычная сейсмическая трасса с целью обучения. Трасса составлена суммой вейвлетов с различными центральными частотами. Первая сейсмическая волна (на 50 мс) — отдельный вейвлет с центральной частотой 40 Гц. Заметьте, что длительность его истинного спектра не больше длительности вейвлета по времени. Вторая сейсмическая волна (на 300 мс) —

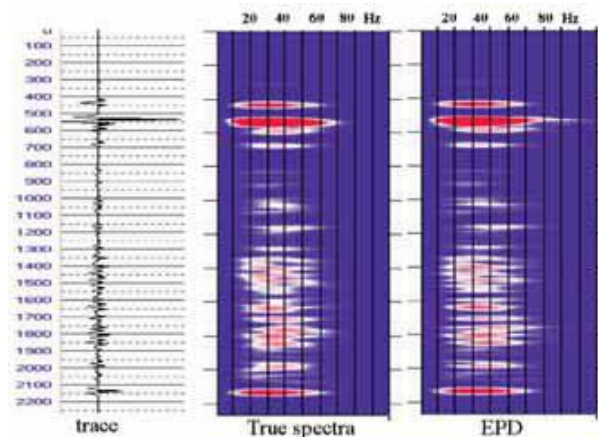


Рис. 3. Сравнение истинного спектра и спектра EPD (разложение экспоненциальным поиском) реалистичной синтетической сейсмической трассы.

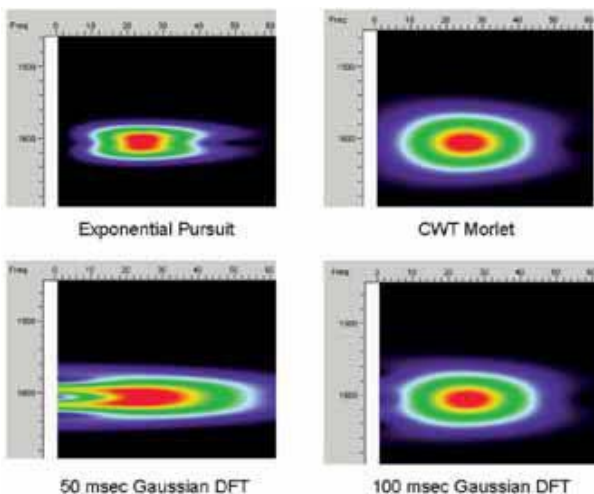


Рис. 4. Частотно-временные анализы для слоя с равными и противоположными коэффициентами отражения и временной мощностью 20 мс. CWT выполнен с набором вейвлетов Morlet, DFT выполнено в гауссовских окнах, размером 50 и 100 мс.

сумма вейвлетов с частотами 40 и 10 Гц, вступающих на одном времени. Истинный спектр является бимодальным, с пиками в 10 Гц и 40 Гц. Остальные сейсмические волны, встречающиеся на более поздних временах — смешанные отражения для двух или трех близко расположенных времен вступления волн. Истинные спектры относительно гладки, поскольку спектральные врезки интерферирующих отражений вне полосы частот данных. Временные максимумы спектров соответствуют временам вступления интерферирующих вейвлетов. Частотно-временной анализ MPD очень похож на истинный частотно-временной анализ. Заметьте, что для отдельных отражений, длительность спектров MPD по времени такая же, как для истинных спектров. Заметьте также, что бимодальный спектр для отражения на времени 300 мс хорошо разрешен MPD, и что длительность спектральных пиков по времени сохраняется по всей длительности вейвлетов.

Хотя и частотно-временной анализ MPD подобен истинному частотно-временному анализу для интерферирующих волн, существуют значительные отличия. В частности симметричные отражения на трассе могут быть несимметричными как функция времени для частотно-временного анализа MPD. Это имеет отношение к зависимости метода от пути. EPD минимизирует зависимость от пути и фактически возвращает истинный

частотно-временной анализ для этого простого примера (здесь не приводится, поскольку спектр не отличается от истинного спектра).

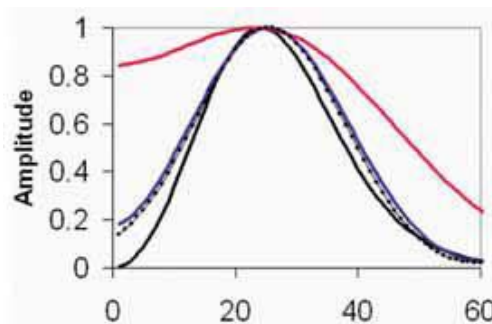


Рис. 5. Линейчатые спектры на времени 1596 мс для спектральных разложений одного слоя, показанных на рисунке 4. Показаны кривые для DFT с гауссовским окном в 50 мс (красная кривая), DFT с гауссовским окном в 100 мс (синяя кривая), CWT с набором вейвлетов Morlet (пунктирная кривая), и для разложения с экспоненциальным поиском (черная кривая).

На рис. 2 показано несоответствие методов DFT и CWT. CWT, выполненный с набором дискретов Morlet, ограничил временное разрешение и не может отделить близко расположенные отражения, так же как и MPD или EPD. Для DFT нужно брать маленькое окно, чтобы его разрешающая способность приравнялась разрешающей способности метода MPD. Примечательно, что DFT с 16 мс окнами без переходных зон на краях расширяет спектры частот (следствие принципа неопределенности Гейзенберга), таким образом вводя энергию на нулевой частоте, чего нет в первоначальной трассе и тем самым производятся ложные отражения, связанные с боковыми лепестками. В случае 256 мс окон без переходных зон на краях отражения размываются по всей длине окон и вводятся врезки в частотно-временные спектры, связанные с интервалом времени между отражениями. Ясно, что в данном случае MPD и EPD более подходящие для исследования характеристик отдельной сейсмической волны, которые могут быть интересны для количественного сейсмического анализа.

Применение EPD к реалистической синтетической сейсмограмме (рис. 3) показывает замечательное улавливание существенных спектральных характеристик истинного спектра. В нашем опыте никакой другой метод не смог достичь такой комбинации временной и частотной

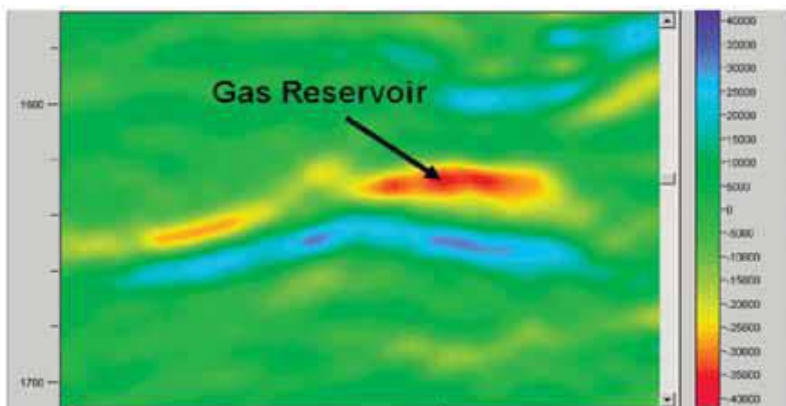


Рис. 6. Суммарный сейсмический разрез, где видно яркое пятно, вызванное малым импедансом газового пласта Мексиканского залива, дающего самый слабый отклик. Вертикальная ось — время в миллисекундах.

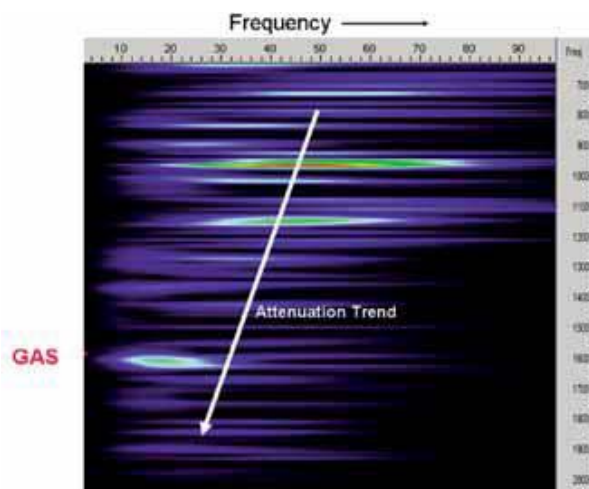


Рис. 7. Частотно-временной анализ по методу экспоненциального поиска для сейсмической трассы, содержащей отражение от пласта газа. Белая линия указывает на направление уменьшения пиков частот, за счет затухания. Газовый пласт характеризуется аномально низкой пиковой частотой.

разрешенности. Поэтому обращаем внимание на спектральное разложение с использованием методов MPD или EPD, как мгновенный спектральный анализ; подразумевается, что спектры, приведенные в частотно-временном анализе, являются показательными для локальных спектральных характеристик данных без нежелательных эффектов, связанных с окнами, таких, как расширение спектра или появление врезок.

Детальное рассмотрение реакции различных методов спектрального разложения на близко расположенные отражающие горизонты приводится на рисунках 4 и 5, которые получены для обычной синтетической сейсмограммы, вычисленной для одного слоя с использованием импульса Рикера с частотой 25 Гц. На рисунке 4 без труда можно заметить, что EPD имеет лучшую комбинацию временной и спектральной разрешенности. Интересно заметить, что CWT с набором

вейвлетов Morlet очень похож на DFT с гауссовскими окнами размером 100 мс. Различия в разрешающей способности по частоте лучше всего видны на графике линейчатых спектров на единичном времени (рисунок 5). Методы DFT и CWT расширяют рассчитанный спектр, в то время как EPD дает истинный спектр сигнала.

Реальный пример применения разложения с экспоненциальным поиском

На рисунке 6 показан классический коллектор газа Мексиканского залива, проявившийся ярким пятном. Разложение с экспоненциальным поиском дает частотно-временную картину, на которой видно постепенное уменьшение пиковой частоты, вызванное затуханием, также показано отражение от резервуара, имеющее аномально низкую частоту (рис. 7). Только EPD разделяет кровлю и подошву этого пласта. Как видно на рисунке 8, спектр CWT имеет четкую врезку на частоте 50 Гц, которая соответствует толщине слоя примерно в 20 мс. Линейчатый спектр EPD, приведенный на рисунке 8 не имеет этой врезки. По разным причинам коллекторы газа обычно характеризуются более низкочастотной картиной, чем соответствующая порода по падению, насыщенная минеральным раствором. Когда это происходит, отношение спектра нормализованного по падению, к нормализованному спектру коллектора газа может быть диагностической. Как показано на рисунке 9, спектральное соотношение EPD равномерно растет с увеличением частоты, показывая ослабление высоких частот для коллектора газа. С другой стороны, врезка для толщины слоя на 50 Гц делает это отношение обманчивым, когда для спектрального разложения используется метод CWT.

Выводы

Разложения сейсмических данных по методам совпадения и экспоненциального поиска (MPD и EPD) не используют окон для расчетов и таким образом имеют лучшую комбинацию временной и спектральной разрешенности по сравнению с дискретным преобразованием Фурье (DFT) и непрерывным вейвлет-преобразованием (CWT). EPD в поперечном направлении более устойчив, чем MPD и

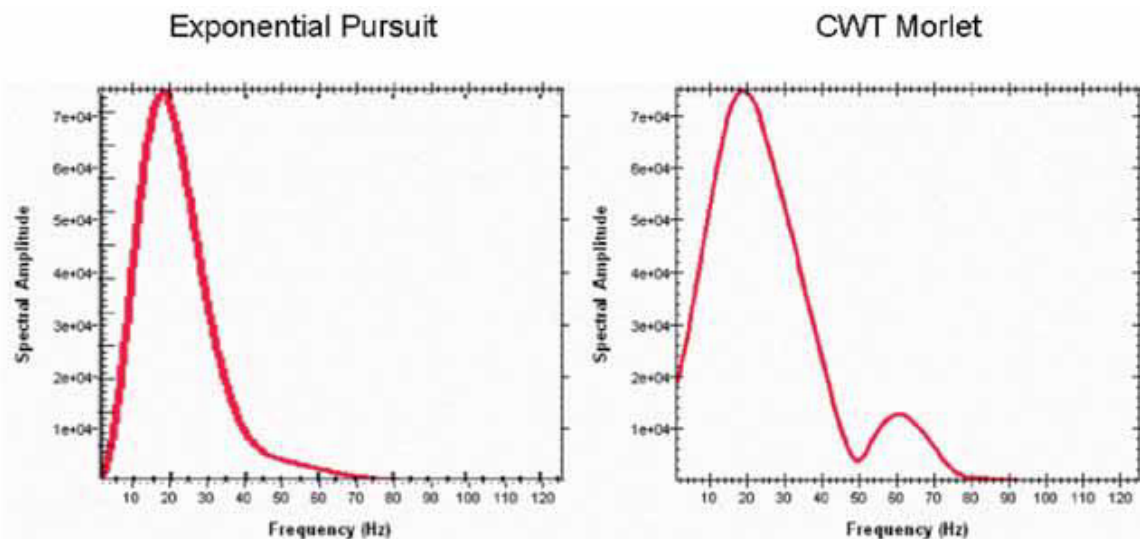


Рис. 8. Сравнение спектров на временах, соответствующих кровле газового пласта, показанного на рисунке 6. Врезка на частоте 50 Гц для спектра CWT — следствие интерференции с отражением от подошвы, расположенной примерно на 20 мс ниже кровли.

более точно размещает вейвлеты по времени, в случае интерференции вейвлетов. Синтетические сейсмограммы открывают замечательную способность EPD разделять интерферирующие вейвлеты. Реальный пример данных

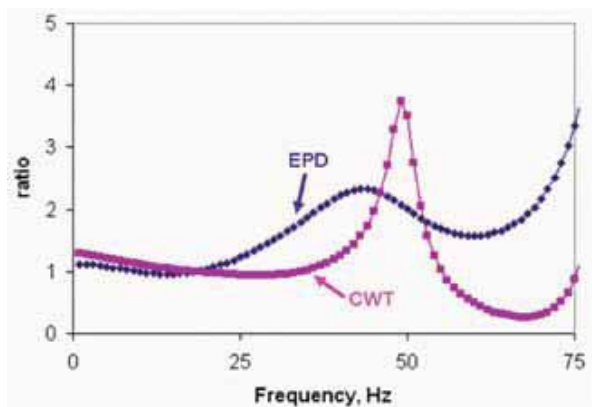


Рис. 9. Отношение спектра по падению и спектра, соответствующего области газового пласта, полученного методом разложения с экспоненциальным поиском (EPD) и непрерывного вейвлет-преобразования с набором вейвлетов Morlet (CWT).

Мексиканского залива с ярким пятном показывает, что аномально низкочастотная область резервуара лучше выявляется по методу EPD (по сравнению с CWT), потому что он меньше подвержен влиянию интерференции между отражениями от кровли и подошвы. Мы делаем вывод, что EPD — самый полезный метод для количественного анализа спектральных характеристик отдельных отражений.

Ссылки на литературу

- Castagna, J. P., Sun, S., and Siegfried, R. W. [2003] Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons. *The Leading Edge*, **22**, 129-127
- Mallat, S., and Zhang, Z. [1993] Matching pursuits with time-frequency dictionaries. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **41**, 2297-3415.
- Marfurt, K. J., and Kirlin, R. L. [2001] Narrow-band spectral analysis and thin-bed tuning. *Geophysics*, **66**, 1274-1283.
- Partyka, G. J., Gridley, J., and Lopez, J. [1999] Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization. *The Leading Edge*, **18**, 353-360
- Sinha, S., Routh, P. S., Anno, P. D., and Castagna, J. P. [2005] Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transforms. *Geophysics*, **70**, 19-25