

Применение гомоморфного алгоритма поверхностно-согласованной деконволюции при обработке сейсморазведочных данных и его сравнение со стандартными методами

- Матвеев Н.М., ООО «ПетроТрейс», г. Москва.
- Степанов П.Ю., МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва.

Аннотация: На данный момент на практике наибольшее распространение получили алгоритмы деконволюции, основанные на подходе Винера-Левинсона. В то же время в литературе встречается большое количество описаний нестандартных техник, которые остаются за рамками применения в производстве, но сами по себе могут обладать значительным потенциалом. Настоящее исследование направлено на изучение процедуры гомоморфной деконволюции, а также на оценку ее практической применимости и эффективности в обработке сейсморазведочных данных. В рамках работы автором были разработаны и реализованы различные методы гомоморфной деконволюции. Алгоритмы были опробованы на реальном 2D наборе нефтегазовой наземной сейсморазведки, полученном в Западной Сибири: в качестве тестового, был выбран один конкретный профиль, который показался наиболее репрезентативным для демонстрации результатов. В этом контексте на базе одного из наиболее перспективных одноканальных кепстральных алгоритмов была разработана программа гомоморфной поверхностно-согласованной деконволюции как инструмент для решения реальных задач наземной сейсморазведки. Далее, были проведены его тестирование и сравнительный анализ с результатами работы поверхностно-согласованной деконволюции традиционными методами. Результаты, полученные при кепстральной реализации, с одной стороны, показывают сходство с общепринятыми методами, а с другой — обладают рядом преимуществ в случае отдельных гомоморфных модификаций.

Ключевые слова: Обратная фильтрация, гомоморфная деконволюция, кепстральный анализ, поверхностно-согласованная деконволюция.

Введение

Данная работа посвящена изучению процедуры гомоморфной деконволюции и ее практического применения при обработке сейсмических данных; является продолжением исследования, результаты которого представлены в работах [3 – 4]. В качестве материалов для анализа использовались набор данных нефтяной 2D-сейсморазведки, предоставленные компанией ООО «ПетроТрейс». Для проведения тестов деконволюции был выбран один конкретный профиль по Западной Сибири, показавшийся наиболее репрезентативным для демонстрации результатов.

Целью данной работы является разработка алгоритма гомоморфной поверхностно-согласованной деконволюции, его опробование и оценка практического применения при обработке реальных данных 2D сейсморазведки.

Для ее достижения были разработаны и реализованы в программном виде различные алгоритмы деконволюции в кепстральной области, в дальнейшем протестированные на реальных данных.

Оценка работоспособности и эффективности гомоморфных методов выполнялась путем их сравнения с традиционными подходами к деконволюции.

Теоретические основы кепстрального анализа

Оригинальное определение (энергетического) кепстра было предложено Б.П. Богертом и др. в статье 1963 г. как:

$$C_p(\tau) = |FT\{\ln |FT\{x(t)\}|^2\}|^2 \quad (1)$$

Здесь $C_p(\tau)$ – энергетический кепстр, τ – *кьюфренси*, независимая переменная в кепстральной области, имеющая единицы измерения времени, FT – прямое преобразование Фурье, $x(t)$ – функция сигнала [7].

В дальнейшем было введено понятие *комплексного кепстра*, определяемое следующим образом:

$$\begin{aligned} C_c(\tau) &= IFT\{\ln FT\{x(t)\}\} = IFT\{\ln\{A(f)e^{j\varphi(f)}\}\} = \\ &= IFT\{\ln(A(f)) + j\varphi(f)\} \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь IFT – обратное преобразование Фурье, $\varphi(f)$ – фазовый спектр функции сигнала.

Также была выведена формула для *действительного кепстра*, получаемая из равенства (2) путём исключения слагаемого, включающего фазовый спектр сигнала:

$$C_r(\tau) = IFT\{\ln |FT\{x(t)\}|\} = IFT\{\ln(A(f))\} \quad (3)$$

Все представленные выше формулы кепстрального анализа полностью основаны на теории Фурье, поэтому также обладают свойством обратимости. Тем не менее, только комплексный кепстр позволяет «вернуться» в исходную область (где была определена сигнальная функция) с сохранением фазовой информации сигнала. Именно по этой причине его практическое использование оказывается наиболее предпочтительным при обработке сейсмических данных. Следовательно, далее требуется подробно рассмотреть *некоторые ключевые свойства комплексного кепстра* [15–18].

Свойство 1. Комплексный кепстр свертки двух (и более) сигналов есть сумма их комплексных кепстров:

$$x(t) = f(t) * g(t) \leftrightarrow C_{cx}(\tau) = C_{cf}(\tau) + C_{cg}(\tau) \quad (4)$$

Свойство 2. Комплексный кепстр действительной последовательности также является действительным.

Свойство 3. Свойства комплексных кепстров минимально- и максимально-фазовых последовательностей:

1) Если $x(t)$ – *минимально-фазовая* последовательность, то ее комплексный кепстр $C_{cx}(\tau)$ – *каузальная* последовательность.

2) Если $x(t)$ – *максимально-фазовая* последовательность, то ее комплексный кепстр $C_{cx}(\tau)$ – *антикаузальная* последовательность.

Свойство 4. Связь действительного и комплексного кепстров действительной минимально-фазовой последовательности.

$$C_{cx}(\tau) = \begin{cases} 0, \tau < 0 \\ C_{rx}(\tau), \tau = 0 \\ 2C_{rx}(\tau), \tau > 0 \end{cases} \quad (5)$$

Свойство 5. Комплексный кепстр сигнала, спектр которого является плавным, имеет тенденцию концентрироваться вблизи малых абсолютных значений кьюфренси.

Свойство 6. Комплексный кепстр периодической функции (последовательности) есть периодическая функция (последовательность) с тем же периодом.

Гомоморфная фильтрация (liftering)

В 1965 г. А.В. Оппенгейм предложил обобщение принципа суперпозиции на определенный класс нелинейных систем, то есть гомоморфных систем, для которых линейная фильтрация в обычном представлении не имела бы смысла.

В исследованиях было установлено,

что любая гомоморфная система (фильтр) допускает каноническое представление в виде каскада из трех подсистем (рис. 1). Первая подсистема $D_*[]$ представляет собой обратимый нелинейный характеристический оператор (систему), преобразующий неаддитивную комбинационную операцию, такую как свертка, в обычное сложение. Вторая подсистема $L[]$ это линейная система, подчиняющаяся принципу аддитивной суперпозиции, а третья $D_*^{-1}[]$ является обратной по отношению к первой нелинейной системе. Таким образом, для сигналов, объединенных операцией свертки, гомоморфная система фильтрации (деконволюции) сначала преобразует свертку в сложение, затем выполняет линейную обработку (сохраняя сложение) и, наконец, переводит сложение обратно в свертку. Ключевая идея такого канонического представления гомоморфных систем заключается в том, что линейная подсистема $L[]$ обеспечивает гибкость при проектировании и реализации требуемого гомоморфного фильтра («lifter»). [1,5,8–14,19–21].

Кепстральный анализ на примере 1D модели среды

Первоначальные кепстральные оценки проводились на элементарной синтетической трассе для заданного 1D скоростного и плотностного распределения и импульса источника с помощью языка MATLAB.

Для целей моделирования был выбран импульс Берлаге (рис. 2), задаваемый формулой:

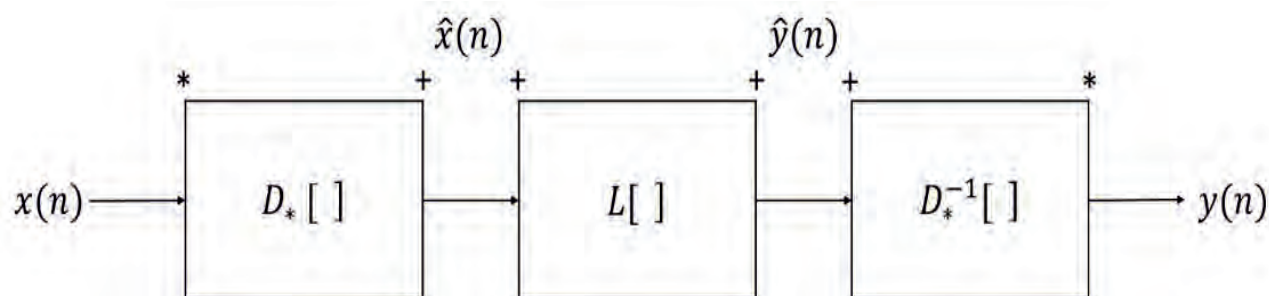
$$w(t) = t^n \exp(-bt) \sin(2\pi f_0 t) \quad (6)$$

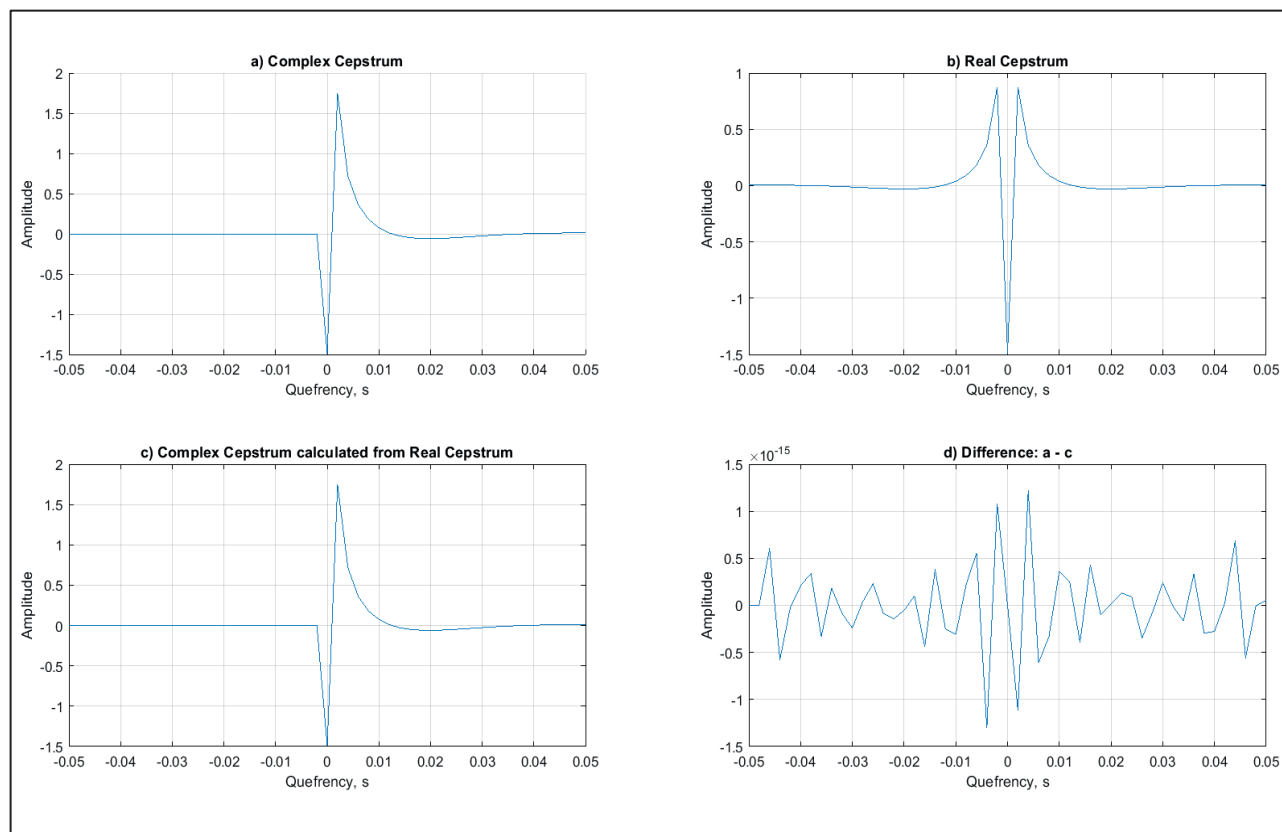
Здесь f_0 – несущая частота сигнала, n , b – дополнительные коэффициенты, определяющие вид огибающей импульса и его затухание, соответственно. [6]

После задания импульса была построена упрощенная модель среды, включающая 10 слоев. На данном этапе исследования модель не соотносилась с какими-либо конкретными геологическими условиями. Расчет импульсной характеристики среды выполнен для случая нормального падения плоской продольной волны на границу пласта.

Анализ действительного кепстра итоговой трассы (рис. 3с) позволяет точно идентифицировать временной участок вблизи начала координат, где доминирует влияние импульса. Это свидетельствует о том, что структура действительного кепстра трассы делает его более перспективным для непосредственной оценки амплитудных характеристик источника по сравнению с комплексным кепстром (рис. 3б). Вопрос определения фазовых характеристик сигнатуры остается открытым, поскольку действительный кепстр не содержит фазовой информации. В связи с этим необходимо делать допущение о фазе импульса и на его основе вычислять комплексный

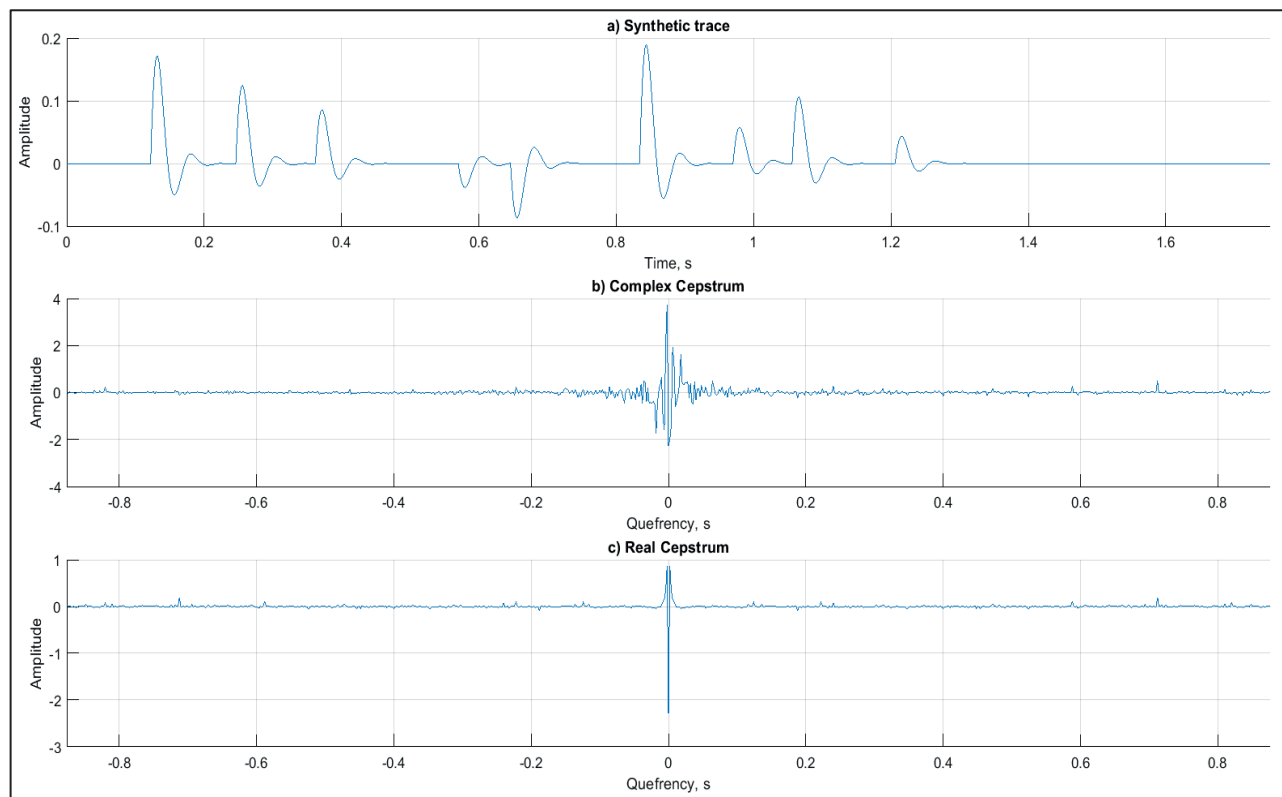
▼ Рис. 1. Каноническое представление гомоморфной системы для свертки.





▲ Рис. 2. Кепстры входного минимально-фазового импульса: комплексный кепстр (a), действительный кепстр (b), комплексный кепстр, вычисленный на основании действительного кепстра (c), разница между a и c (d).

▼ Рис. 3. Синтетическая сейсмическая трасса (a) и соответствующие ей комплексный (b) и действительный (c) кепстры.



кепстр по действительному. Следует подчеркнуть, что именно комплексный кепстр обеспечивает однозначное восстановление временной последовательности.

Одноканальные алгоритмы гомоморфной деконволюции

Ввиду разнообразия подходов к выполнению гомоморфной деконволюции и отсутствия стандартизированной оптимальной методики первоначально были разработаны и опробованы одноканальные алгоритмы в кепстральной области. Эталоном эффективности их работы было принято сходство с результатами деконволюции сжатия.

Автором были разработаны и протестированы следующие гомоморфные алгоритмы: *метод кепстральной оценки и извлечения сигнатуры источника и метод с аналогичной оценкой, но с извлечением импульса с помощью винеровской фильтрации*. Предполагается, что оценка сигнатуры в кепстральной области оказывается более точной, чем статистическая оценка по винеровскому подходу.

Оценка сигнатуры источника по действительному кепстру и ее извлечение в кепстральной области. Представленный алгоритм гомоморфной деконволюции базируется на вычислении комплексного кепстра сигнатуры источника (с последующим его вычитанием из комплексного кепстра трассы) на основе действительного кепстра трассы. Как упоминалось ранее, для реконструкции комплексного кепстра импульса по его действительному кепстру необходимо сделать предположение о фазовой характеристике сигнала. В данном случае использовалась минимально-фазовая сигнатура с применением **свойства 4**.

Конкретная последовательность операций включает следующие этапы:

1. По действительному кепстру трассы определить диапазон времен, на который основное влияние оказывает сигнатура источника, то есть выбрать временное окно анализа. Логично выбирать симметричное относительно начала координат окно, так как действительный кепстр (действительной последовательности) является четным.

2. Обнулить действительный кепстр за пределами этого окна и считать результирующую последовательность действительным кепстром входного импульса.

3. По свойству 4 вычислить оценку комплексного кепстра источника по полученному в п.2 действительному кепстру.

4. Рассчитать комплексный кепстр трассы и вычесть из него оценку комплексного кепстра источника.

Результат разности из п.4 преобразовать из кепстральной области во временную.

Основным параметром алгоритма является *размер окна анализа*, который иначе можно назвать *длиной оператора деконволюции в кепстральной области*. В случае минимально-фазового импульса размер окна анализа будет в 2 раза больше длины оператора. [20]

Оценка сигнатуры источника по действительному кепстру и ее извлечение во временной области с помощью обратного фильтра Винера. Предлагаемая методика представляет собой синтез гомоморфной обработки и деконволюции сжатия. Аналогично описанному ранее подходу, оценка импульсной характеристики выполняется по действительному кепстру трассы. Затем восстановленный комплексный

кепстр источника трансформируется во временную область и извлекается посредством применения обратного фильтра Винера.

Данный метод потенциально может объединить достоинства обоих подходов: возможно, более точную оценку импульса в кепстральной области и соответствие критерию оптимальности Винера. Следует подчеркнуть, что применение винеровского подхода требует соблюдения стандартных предположений, характерных для процедуры деконволюции.

Тестирование одноканальных алгоритмов гомоморфной деконволюции на примере реальных сейсмических данных 2D

Сейсморазведочные работы проводились в пределах лицензионной площади, находящейся в Шаимском нефтегазоносном районе ХМАО. Геологический разрез площади включает породы доюрского фундамента, а также юрские, меловые и палеоген-четвертичные отложения осадочного чехла. Главными продуктивными комплексами в данном районе служат средне-верхнеюрский и доюрский. [2]

Сейсмическая съемка выполнена методом общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) с номинальной кратностью 40 при использовании 320-канальной системы наблюдений и в диапазоне удалений от 6 до 1994 м. В качестве источников сейсмических волн применялись взрывы. Шаг между пунктами возбуждения составлял 50 м, между пунктами приема – 12.5 м. Регистрация данных велась с длиной записи 4 с и шагом дискретизации 2 мс.

Прежде чем перейти непосредственно к тестированию алгоритмов деконволюции, проводился кепстральный анализ по сейсмограммам в сортировке ОПВ

для определения длины оператора. Предполагается, что задействованный сейсмический набор характеризуется минимально-фазовой сигнатурой. По результатам тестов был взят фильтр длительностью 90 мс.

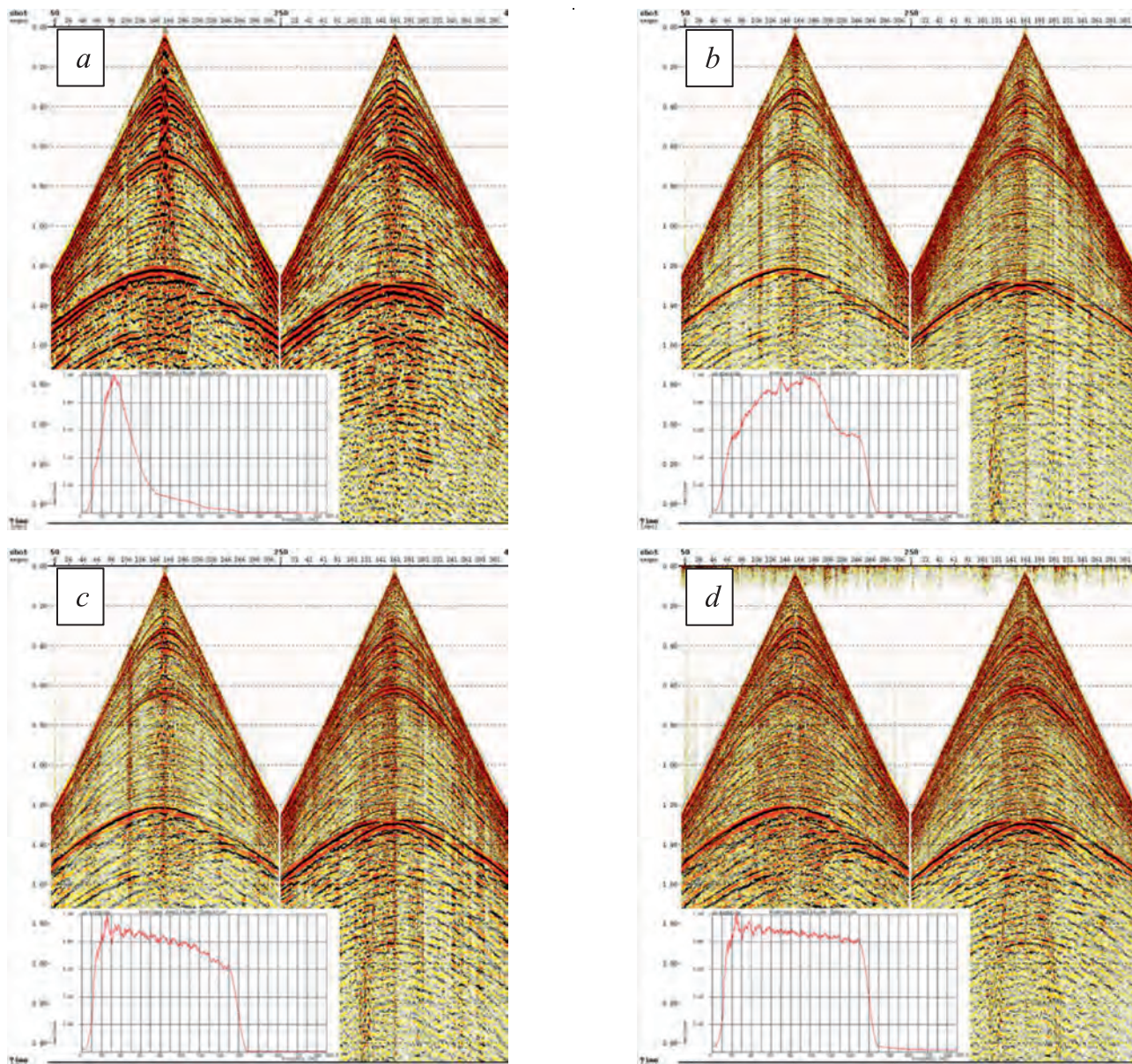
Для деконволюции сжатия были выбраны следующие параметры: длина оператора (n) – 180 мс, окно расчета АКФ (W) – от мьютинга первых вступлений до 2000 (на ближних удалениях) – 2200 мс (на дальних удалениях), уровень белого шума (ε) – 0.1%. Параметры винеровской фильтрации в комбинированном подходе выбирались аналогичными.

В целом все рассмотренные реализации обеспечивают кондиционные итоговые результаты и близость в функционировании. Данные, обработанные *методом кепстральной оценки сигнатуры источника и ее извлечения с помощью винеровской фильтрации*, сопоставимы и схожи с работой деконволюции сжатия (рис. 4b, c, 6, 7).

При анализе результатов *гомоморфной деконволюции, основанной на кепстральной оценке и извлечении сигнатуры источника* (рис. 4d, 8), уместно подчеркнуть соответствующие отличия от деконволюции сжатия (рис. 4b, 6):

- Появление помех в области от 0 до 200 мс и ослабление шумовой составляющей вблизи зоны первых вступлений на сейсмограммах.
- Лучшее выравнивание амплитудных спектров по сейсмограммам, менее действенное – на частотах выше 60 Гц по разрезам.
- Значительное пространственное выравнивание по амплитудам итоговых ансамблей (Матвеев и др., 2024; Матвеев, Степанов, 2024).

Учитывая описанные особенности полностью кепстрального алгоритма и



▲ Рис. 4. Сейсмограммы ОПВ и соответствующие им амплитудные спектры: до деконволюции (а), после деконволюции сжатия Винера (b), после гомоморфной деконволюции по методу кепстральной оценки сигнатуры источника и ее извлечения с помощью винеровской фильтрации (с), после гомоморфной деконволюции по методу кепстральной оценки и извлечения сигнатуры источника (d).

его взаимосвязь с винеровским подходом, можно предположить, что более широкое внедрение данного метода в практику обработки позволит объективно оценить его реальные преимущества. Особого внимания заслуживает аспект амплитудной балансировки: с одной стороны, он может быть аналогичен процедуре поверхностного согласования (что создает определенную параллель с

поверхностно-согласованной деконволюцией), с другой стороны, существует риск возникновения динамических искажений данных.

Сравнение результатов поверхностно-согласованных алгоритмов деконволюции: стандартной, робастной (медианной) и гомоморфной.

Одноканальные алгоритмы гомомор-

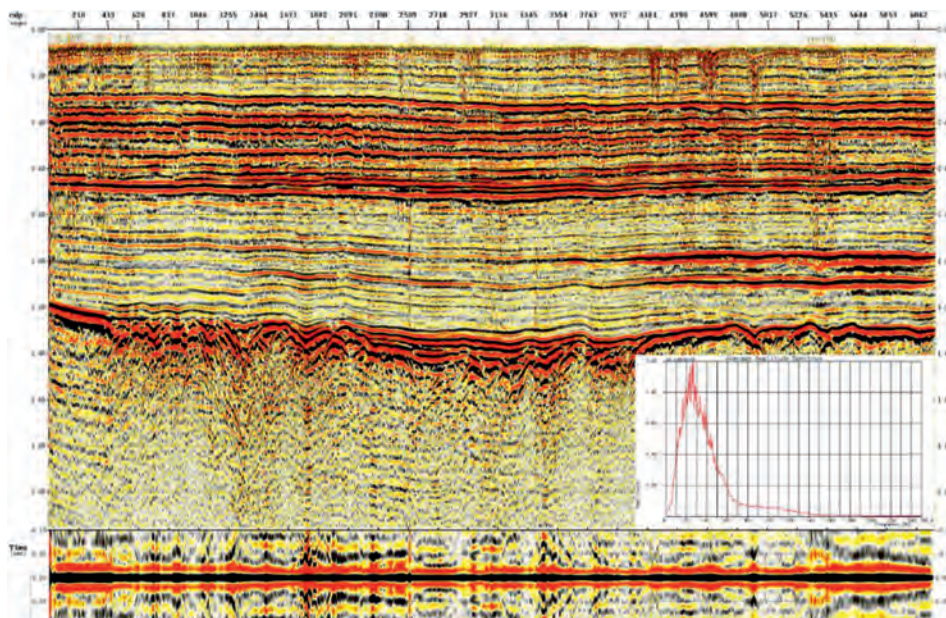


Рис. 5.
Временной разрез,
соответствующие
ему амплитудный
спектр и АКФ до
деконволюции.

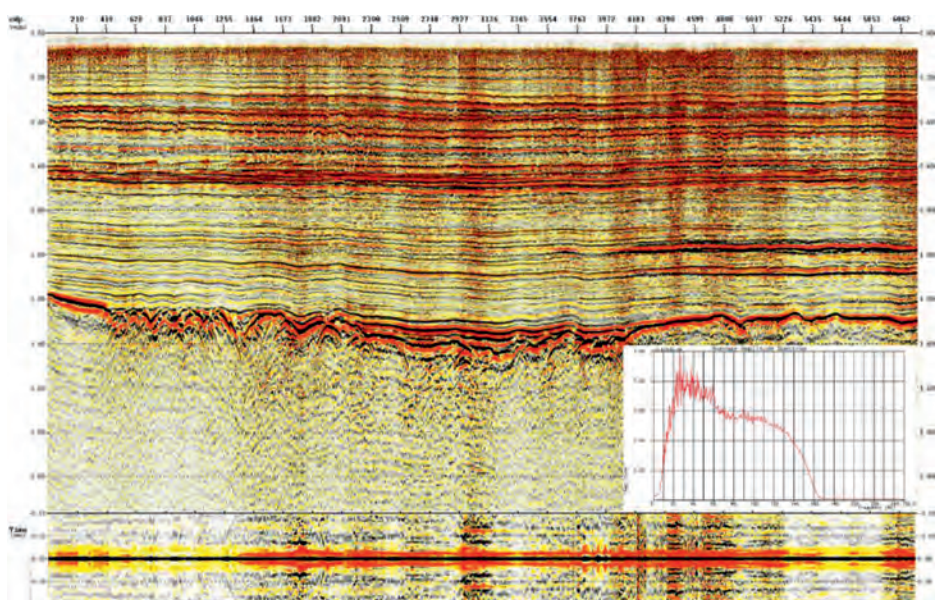


Рис. 6.
Временной разрез,
соответствующие
ему амплитудный
спектр и АКФ после
деконволюции
сжатия Винера.

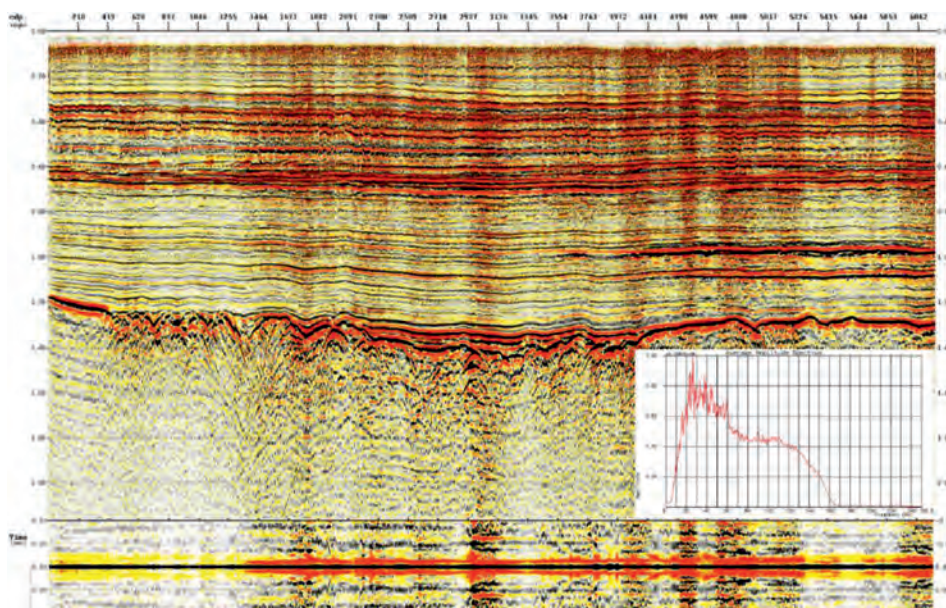
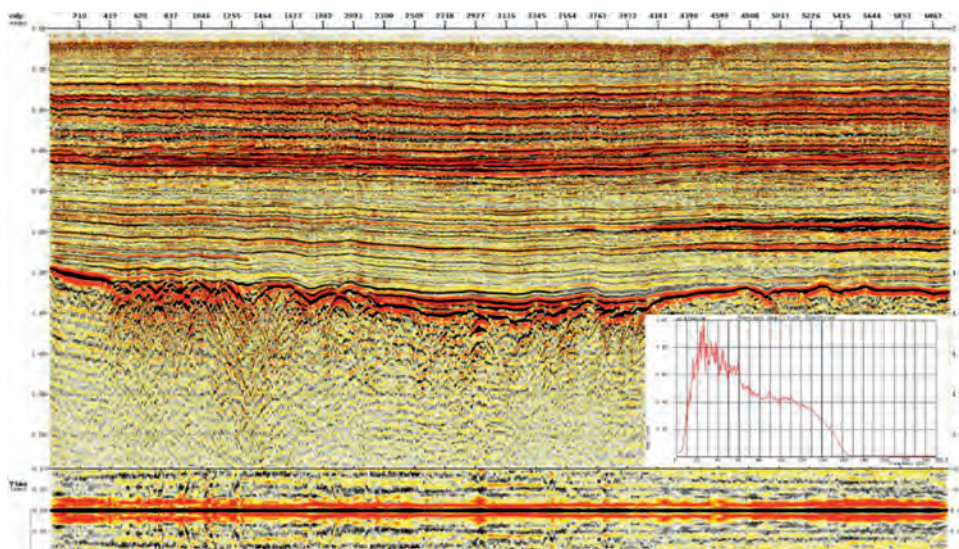


Рис. 7.
Временной разрез,
соответствующие
ему амплитудный
спектр и АКФ после
гомоморфной
деконволюции
по методу
кепстральной
оценки сигнатуры
источника и ее
извлечения с помощью
винеровской
фильтрации.

► Рис. 8.

Временной разрез,
соответствующие
ему амплитудный
спектр и АКФ
после гомоморфной
деконволюции
по методу
кепстральной
оценки и извлечения
сигнатуры
источника.



фной деконволюции демонстрируют свою эффективность наравне со стандартными методами. Наибольшим потенциалом обладает метод *кепстральной оценки и извлечения сигнатуры источника*. В связи с этим на его базе был разработан *поверхностно-согласованный гомоморфный алгоритм* как метод деконволюции для решения реальных задач наземной сейсморазведки. Далее, были проведены его тестирование на реальных сейсмических данных 2D по Западной Сибири и сравнительный анализ с результатами работы *поверхностно-согласованной деконволюции* стандартным (минимизация ошибок решения при декомпозиции осуществляется по норме L_2 , метод наименьших квадратов) и робастным (медианным) (минимизация ошибок решения при декомпозиции – по норме L_1 , итеративный медианный алгоритм – аналог метода наименьших модулей) методами.

Алгоритм поверхностно-согласованной гомоморфной деконволюции:

1. По действительному кепстру трассы определить диапазон кьюфренси, на который основное влияние оказывает сигнатура источника, то есть выбрать временное окно анализа (n отсчетов)

2. Логично выбирать симметричное относительно начала координат окно, так как действительный кепстр (действительной последовательности) является четным.

3. Сформировать переопределенные СЛАУ относительно действительных кепстров трасс и поверхностно-согласованных компонент (источника, приемника, ОГТ). Количество СЛАУ соответствует $n/2+1$ отсчет для четных n и $(n-1)/2+1$ отсчет для нечетных n .

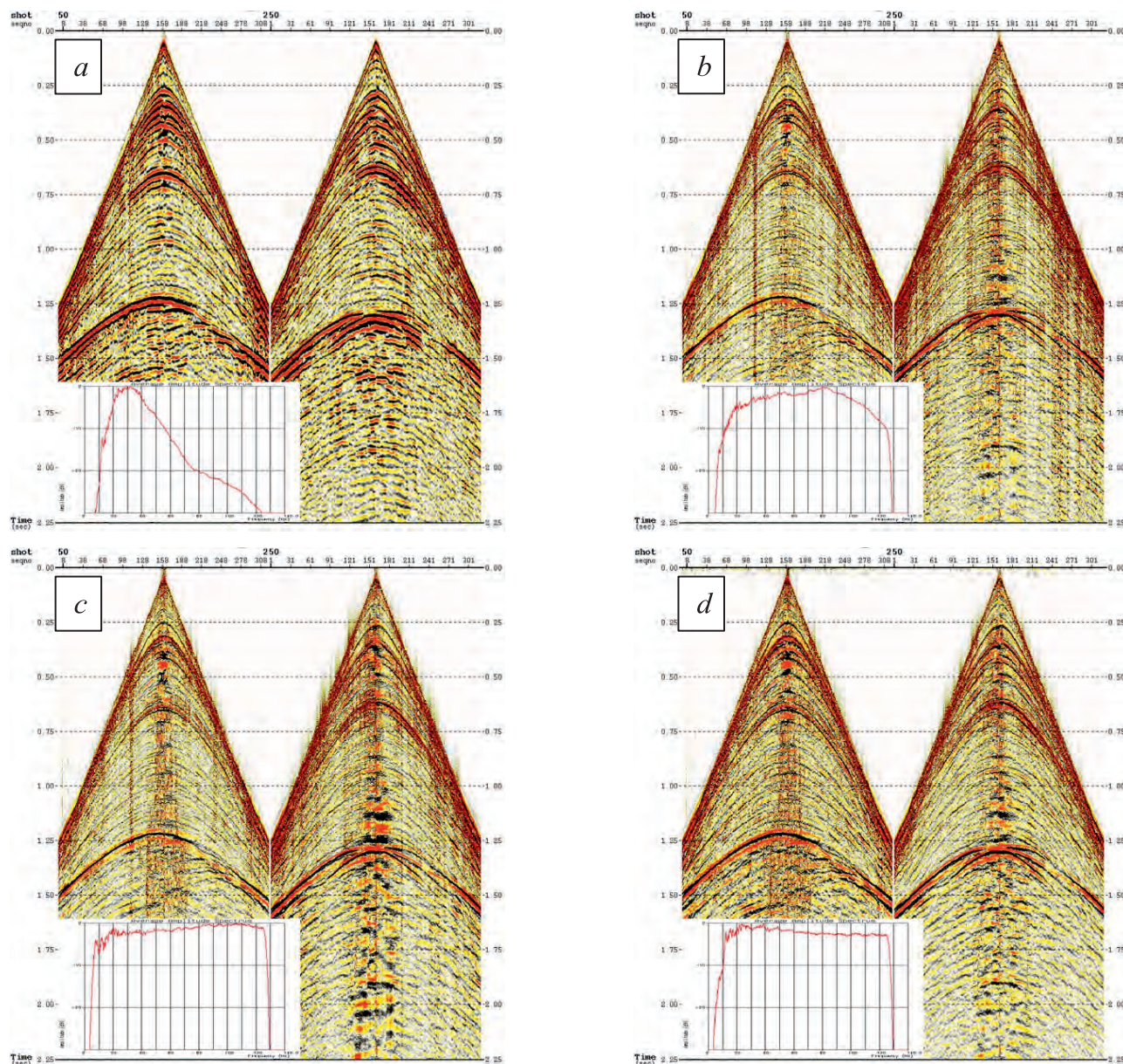
4. Решить СЛАУ. В данной реализации использован метод наименьших квадратов.

5. По свойству 4 комплексного кепстра вычислить оценки комплексных кепстров всех компонент по полученным в п.3 действительным кепстрам.

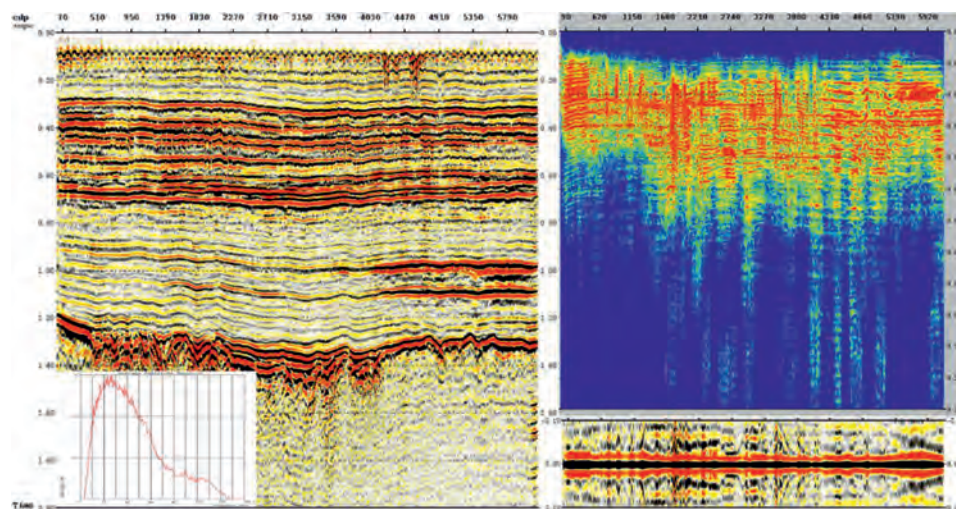
6. Рассчитать комплексные кепстры трасс и вычесть из них соответствующие оценки комплексных кепстров компонент.

7. Результат разности из п.5 преобразовать из кепстральной области во временную.

Результаты *стандартного* (рис. 9б, 11) и *робастного* (рис. 9с, 12) *поверхностно-согласованных* методов схожи. Однако данные после второго алгоритма имеют более равномерные спектральные характеристики, меньшую зашум-

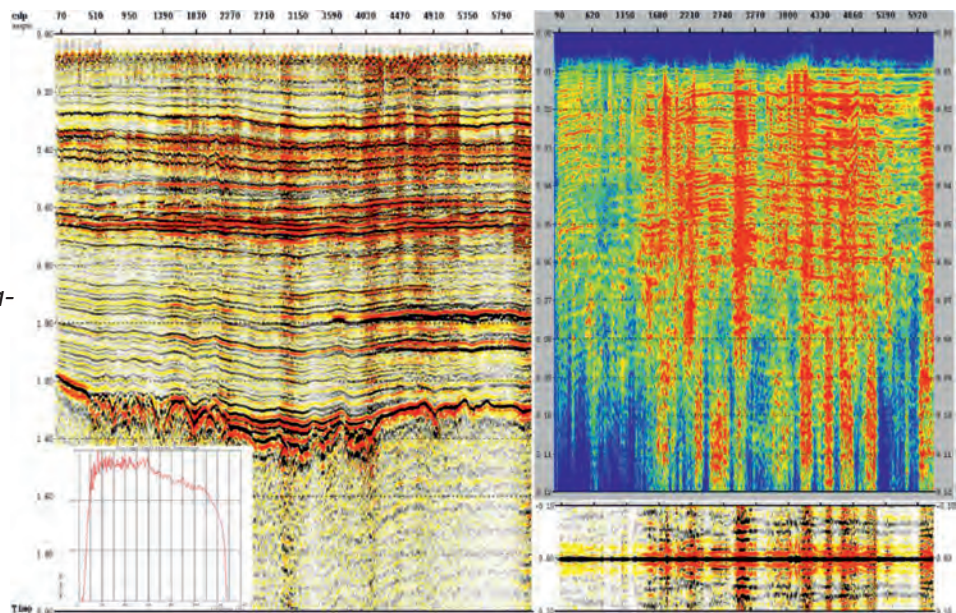


▲ Рис. 9. Сейсмограммы ОПВ до деконволюции (а), после поверхностно-согласованной деконволюции: стандартным (b), робастным (медианным) (c) и гомоморфным (d) методами.

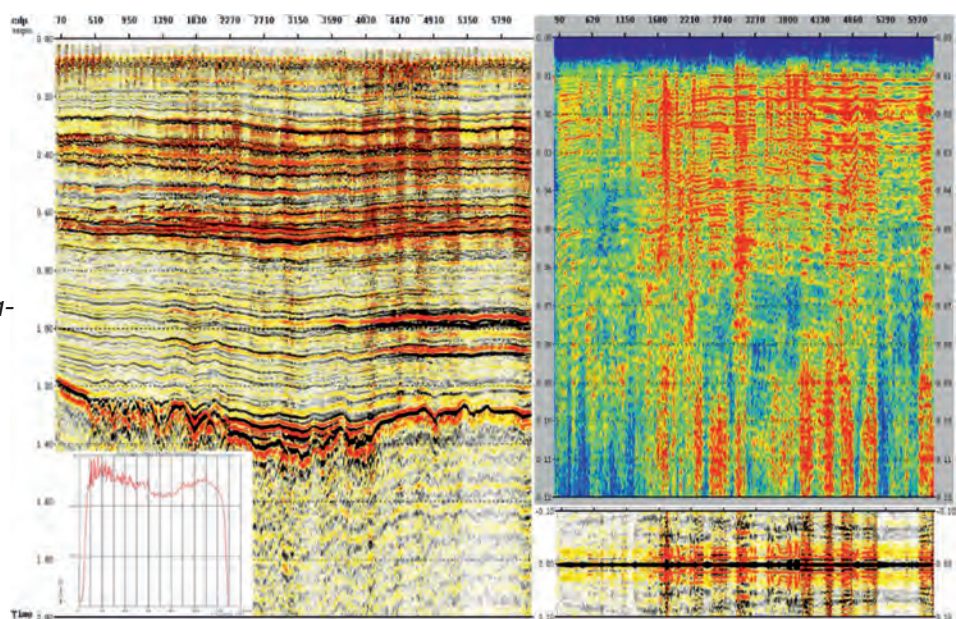


◀ Рис. 10. Временной разрез, соответствующие ему амплитудный спектр, Fx-секция и АКФ до деконволюции.

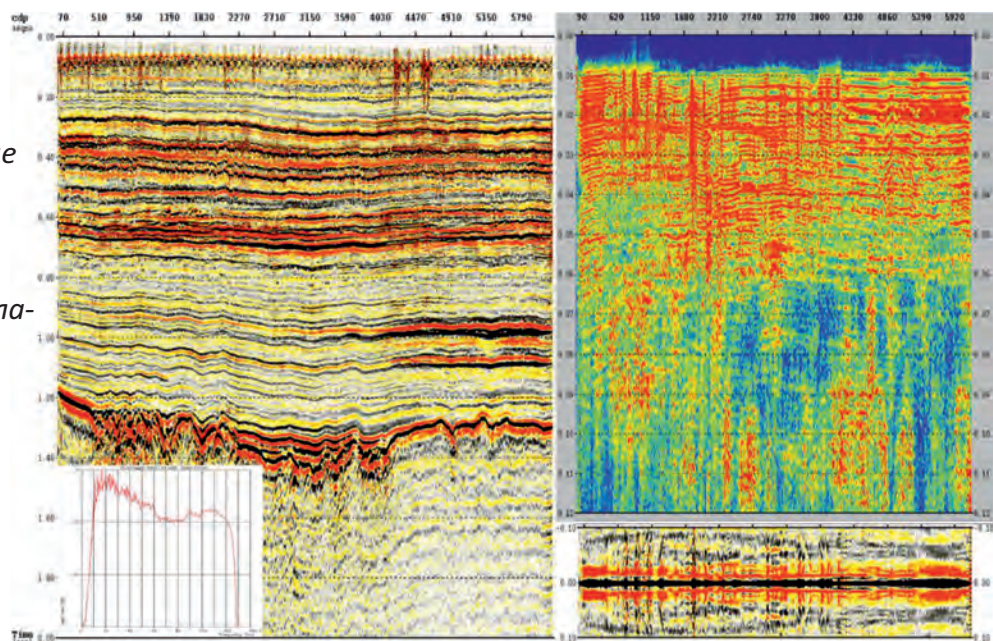
- Рис. 11.
Временной разрез,
соответствующие
ему амплитудный
спектр, FX-секция
и АКФ после
поверхностно-согла-
сованной
деконволюции
стандартным
методом.



- Рис. 12.
Временной разрез,
соответствующие
ему амплитудный
спектр, FX-секция
и АКФ после
поверхностно-согла-
сованной
деконволюции
робастным
(медианным)
методом.



- Рис. 13.
Временной разрез,
соответствующие
ему амплитудный
спектр, FX-секция
и АКФ после
поверхностно-согла-
сованной
деконволюции
гомоморфным
методом.



ленность и лучшее латеральное распределение амплитуд.

В свою очередь, *гомоморфный поверхностно-согласованный метод* (рис. 9d, 13) демонстрирует близость в функционировании с робастным методом. При этом первый обладает рядом преимуществ: не происходит переусиления высоких частот, ослабляются шумы и в значительной степени улучшается пространственное распределение амплитуд.

Заключение

В ходе работы автором были самостоятельно разработаны и запрограммированы все представленные кепстральные реализации, в том числе поверхностно-согласованная. Несмотря на вычислительные особенности кепстральных преобразований, предложенные гомоморфные алгоритмы оказались сопоставимы со стандартными подходами, при этом для первых выделяется ряд преимуществ. В свою очередь, метод поверхностно-согласованной кепстральной деконволюции способствует значительно лучшему выравниванию амплитуд по латерали по сравнению с общепринятыми алгоритмами.

В дальнейшем предполагается оценка влияния различных помех и поверхностных условий на стабильность поверхностно-согласованной реализации, более широкое тестирование гомоморфных алгоритмов в производственных масштабах, внедрение робастности в кепстральные подходы.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за важные замечания и неоценимую помощь в подготовке статьи сотрудникам компании ООО «ПетроТрейдс»: Александру Королеву и Алексею Шевченко.

Литература

1. Борисенко Ю.Д., Калайдина Г.В. Обратная фильтрация исходных сейсмических записей на основе кепстрального анализа. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки, № 6, 2010. 106–110 с.
2. Габриэлянц Г.А., Дикенштейн Г.Х., Капустин И.Н. и др. Региональная геология нефтегазоносных территорий СССР. Под ред. Г. А. Габриэлянца; Всесоюз. н.-и. геол.-развед. нефт. ин-т. - М.: Недра, 1991. 281,[2] с.
3. Матвеев Н.М., Степанов П.Ю., Королев Д.А. Применение гомоморфной деконволюции при обработке сейсмических съемок с различными источниками. Геофизика. №1. 2024. 15–23 с.
4. Матвеев Н.М., Степанов П.Ю. Применение кепстрального анализа и гомоморфной деконволюции при обработке нуль-фазовых сейсмических данных. Гелиогеофизические исследования. Том 43. 2024. 46–55 с.
5. Митрофанов Г.М. Гомоморфная фильтрация и слепая деконволюция. Технологии сейсморазведки, №1, 2015. 46-56 с.
6. Рабинович Е.В. и др. Модель сейсмического импульса, возникающего при гидравлическом разрыве пласта. Математические структуры и моделирование, №. 4 (32), 2014. 105–111 с.
7. Bogert B.P., Healy M.J.R., Tukey J.W. The Quefrency Analysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo-Autocovariance, Cross-Cepstrum and Saphe Cracking. In Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis. John Wiley & Sons, 1963. 209–243 p.
8. Nicolas P. Deconvolution by Homomorphic and Wiener filtering. SACLANT UNDERSEA RESEARCH CENTRE LA SPEZIA (ITALY), 1988. 127 p.
9. Oppenheim A.V. Generalized super-

position. Inf. Control., 11(5/6), 1967. 528 – 536 p.

10. Oppenheim A.V., Kopec G.E., Tribolet J.M. Signal Analysis by Homomorphic Prediction. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Volume 24, № 4, 1976. 327 – 332 p.

11. Oppenheim A.V. and Schafer R.W. From Frequency to Quefrency: A History of the Cepstrum. IEEE Signal Processing Magazine, Volume 21, № 5, 2004. 95 – 106 p.

12. Oppenheim A.V., Tribolet J.M. Application of homomorphic filtering to seismic data processing. Applied Time Series Analysis I. Academic Press, 1978. 261 – 286 p.

13. Otis R.M., Smith R.B. Homomorphic deconvolution by log spectral averaging. Geophysics (1977) 42 (6): 1146–1157 p.

14. Peardon L.G., Evans R.H. Homomorphic Deconvolution Applied to VSP Data. SEG Technical Program Expanded Abstracts 1991. Society of Exploration Geophysicists, 1991. 1331 – 1334 p.

15. Randall R.B. A history of cepstrum analysis and its application to mechanical problems. Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 97, 2017. 3 – 19 p.

16. Randall R.B. Cepstrum Analysis and Gearbox Fault Diagnosis. Technical Report 13-150. Brüel & Kjær Technical Review, 1981. 21 p.

17. Randall R.B., Antoni J., Smith W.A. A survey of the application of the cepstrum to structural modal analysis. Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 118, 2019. 716 – 741 p.

18. Stakenborg M.J.L. On the use of cepstrum analysis in gearbox monitoring. Afstudeerverslag ter afronding van de studie tot werktuigbouwkundig ingenieur, 1984. 100 p.

19. Tribolet J.M., Oppenheim A.V. Deconvolution of Seismic Data using

Homomorphic Filtering. Massachusetts Inst. of Tech. Cambridge Research Lab. of Electronics, 1977. 9 p.

20. Ulrych T.J. Application of homomorphic deconvolution to seismology. Geophysics, Volume 36, № 4, 1971. 650 – 660 p.

21. Ulrych T.J., Jensen O.G., Ellis R.M., Somerville P. Homomorphic deconvolution of some teleseismic events. Bulletin of the Seismological Society of America 62(5), 1972. 1269 – 1281 p.

Подробнее об авторах



Матвеев
Никита Михайлович
Окончил МГУ имени
М.В. Ломоносова в 2022 г.
В настоящее время
аспирант кафедры
сейсмометрии и
геоакустики. Старший
геофизик отдела
временной обработки
компания ООО «ПетроТрейс».
Область научных интересов –
устойчивость работы
алгоритмов деконволюции,
кепстральный анализ,
гомоморфная фильтрация.



Степанов Павел Юрьевич
Окончил МГУ имени
М.В. Ломоносова в 1996 г.,
к. ф.-м. н. Доцент,
заместитель заведующего
кафедрой сейсмометрии
и геоакустики, заместитель
декана по учебной работе в
МГУ имени М.В. Ломоносова.
Область научных интересов
– теория распространения
сейсмических волн в
сложнопостроенных
неоднородных анизотропных
средах, сейсмические
исследования верхней
части разреза. Автор 23
научных публикаций.