



УДК 550.8.055

ПРИМЕНЕНИЕ КЕПСТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА И ГОМОМОРФНОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ НУЛЬ-ФАЗОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Н. М. Матвеев¹, П. Ю. Степанов²¹ООО «ПетроТрейс», г. Москва, Россия²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Нуль-фазовые сигналы широко используются в интерпретации сейсмических данных, тем не менее, при обработке первых требуются особые подходы, которые образуют устоявшуюся парадигму. В первую очередь это касается вибросейсмических записей на этапе их приведения к минимально-фазовому виду, предшествующему процедуре обратной фильтрации, и деконволюции как таковой. Деконволюция играет ключевую роль в обработке сейсморазведочных данных как инструмент повышения временного разрешения. На сегодняшний день наиболее широко распространены алгоритмы, основанные на методе Винера-Левинсона. Однако, в научной литературе также описаны нестандартные методы, включая деконволюцию в кепстральной области. В рамках данной работы были разработаны и протестированы алгоритмы гомоморфной деконволюции и фильтрации на модельных и реальных сейсмических данных. Эффективность этих методов оценивалась в сравнении со стандартными подходами деконволюции. Результаты показали, что кепстральные методы сопоставимы по эффективности с традиционными подходами и обладают уникальными преимуществами в некоторых случаях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ОБРАТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ, ГОМОМОРФНАЯ ДЕКОНВОЛЮЦИЯ, КЕПСТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

<https://elibrary.ru/xgqpwa>

1. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена оценке эффективности гомоморфной деконволюции и фильтрации при обработке нуль-фазовых данных сейсморазведки. Для анализа использовался набор данных 2D-сейсморазведки, предоставленный компанией ООО «ПетроТрейс». В ходе тестирования процедур были выбраны два профиля по Ближнему Востоку, которые оказались наиболее репрезентативными для демонстрации результатов.

Целью работы является оценка практического применения фильтров приведения к минимальной фазе и деконволюции в кепстральной области при обработке реальных данных 2D-сейсморазведки с нулевой фазой. Для ее достижения были разработаны и запрограммированы различные кепстральные алгоритмы, которые тестировались на синтетических и реальных данных. Эффективность и работоспособность гомоморфных методов анализировались при сравнении с традиционными методиками.

Электронная почта авторов для переписки:

Матвеев Никита Михайлович, e-mail: nikita.matveev@ptgeos.com
Степанов Павел Юрьевич, e-mail: seismic310@mail.ru



<https://elibrary.ru/xgqpwa>

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

2. ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КЕПСТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

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

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

где $C_p(\tau)$ – энергетический кепстр, τ – кьюфренси, независимая переменная в кепстральной области, имеющая единицы измерения времени, FT – прямое преобразование Фурье, $x(t)$ – функция сигнала [Bogert et al., 1963].

Позднее было предложено понятие комплексного кепстра:

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

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

Дополнительно была получена формула для так называемого действительного кепстра, которая получается из уравнения (2) путем исключения члена, содержащего фазовый спектр сигнала:

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

Все вышеупомянутые формулы кепстрального анализа основаны на теории Фурье и обладают свойством обратимости. Однако только комплексный кепстр позволяет вернуться в исходную область сигнала с учетом фазовой информации. По этой причине его практическое применение является наиболее предпочтительным при обработке сейсмических данных. Далее, необходимо рассмотреть основные свойства комплексного кепстра [Randall, 2017; Randall, 1981; Randall et al., 2019; Stakenborg, 1984].

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:

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

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.

3. КЕПСТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НА ПРИМЕРЕ 1D МОДЕЛИ СРЕДЫ

В данном разделе проводится кепстральный анализ элементарной сверточной модели сейсмической трассы для заданного 1D скоростного и плотностного распределения и импульса источника (аддитивный шум считается равным нулю). Для достижения поставленных задач

необходимо использовать такой упрощенный пример и самостоятельно разрабатывать алгоритмы, например, на языке MATLAB, который является достаточно оперативным инструментом.

Для целей моделирования был выбран импульс Берлаге, задаваемый формулой [Rabinovich et al., 2014]:

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

где f_0 – несущая частота сигнала, n , b – дополнительные коэффициенты, определяющие вид огибающей импульса и его затухание, соответственно.

Основные параметры импульса и шаг дискретизации (dt) были заданы характерными значениями для нефтегазовой сейсморазведки: $f_0 = 20$ Гц, $n = 0$, $b = 50 \text{ с}^{-1}$, $dt = 2$ мс. Далее, полученная сигнатура источника была приведена к минимально-фазовому виду для возможности использования преимуществ кепстров подобных импульсов и в качестве стандартного предположения деконволюции относительно фазы сигнала.

Были рассчитаны комплексный и действительный кепстры сигнатуры источника (рис. 1) и проанализировано их соответствие свойствам, перечисленным в предыдущем разделе. Из рисунка 1А видно, что входная последовательность действительно является минимально-фазовой, так как ее комплексный кепстр существует только для неотрицательных значений кьюфренси и равен нулю для отрицательных (**свойство 3**).

Также на основе действительного кепстра посредством выражения из **свойства 4** для минимально-фазовых сигналов был рассчитан аналог комплексного кепстра (рис. 1В), который, очевидно, совпадает с оригиналом (рис. 1Г). Таким образом, данное свойство позволяет строить минимально-фазовый эквивалент сигнатуры с известным действительным кепстром (амплитудным спектром) и, как следствие, проводить оценку импульса (при условии, что он минимально-фазовый) при гомоморфной деконволюции. С другой стороны, *возникает перспектива для эксплуатации действительного кепстра сигнала при построении фильтра приведения смешанно- или максимально-фазовых последовательностей к минимально-фазовому виду в кепстральной области.*

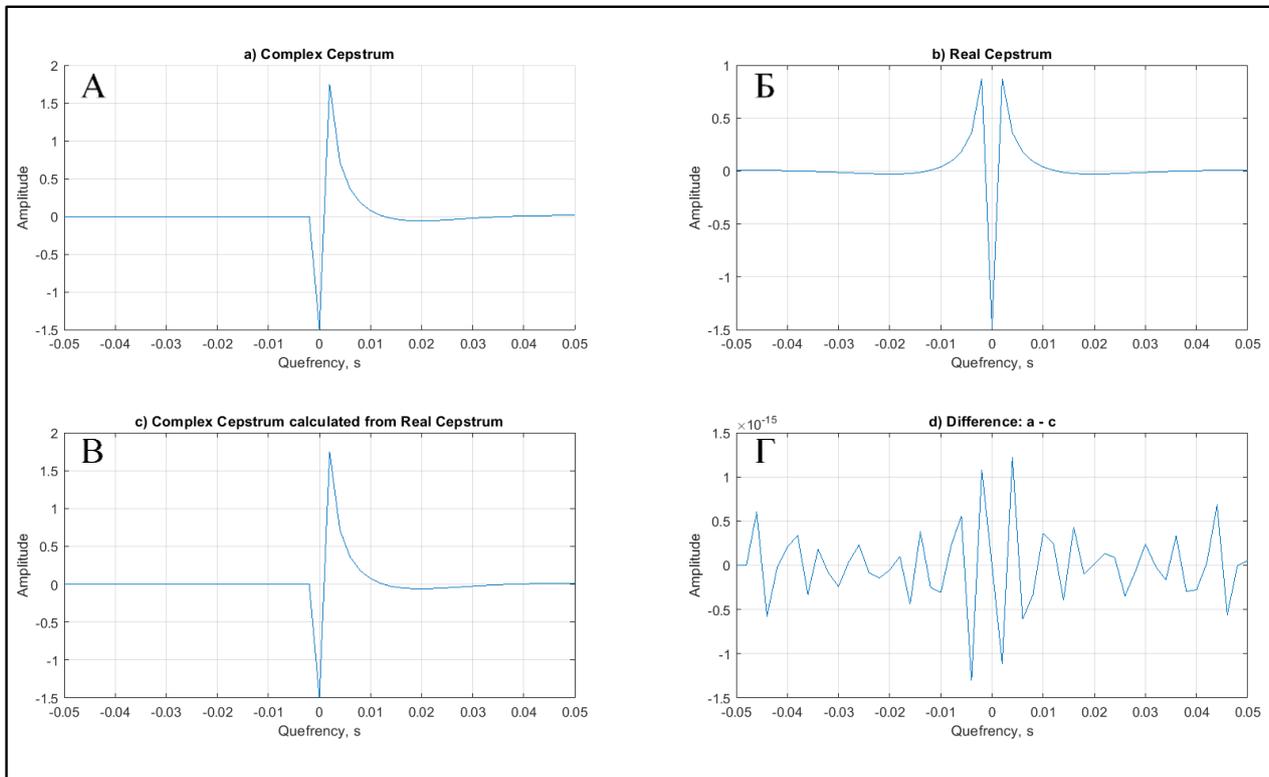


Рис. 1. Кепстры входного минимально-фазового импульса: комплексный кепстр (А), действительный кепстр (Б), комплексный кепстр, вычисленный на основании действительного кепстра (В), разница между А и В (Г)

После задания импульса была создана простая модель среды, состоящая из 10 слоев. На этом этапе исследования модель не привязывалась к конкретной геологической обстановке. Импульсная характеристика среды была рассчитана для случая нормального падения плоской продольной волны на границу слоя.

Как и ожидалось, в действительном кепстре трассы (рис. 2В) четко выделяется область времен около начала координат с преобладающим влиянием импульса. В заключение раздела можно сделать промежуточный вывод: *конфигурация действительного кепстра трассы делает его более перспективным для прямой оценки амплитудного отклика источника по сравнению с комплексным кепстром. Вопрос оценки фазовой характеристики сигнала остается открытым, так как действительный кепстр не содержит фазовую информацию. По этой причине необходимо предполагать фазу импульса и на основе этого рассчитывать его комплексный кепстр, исходя из действительного.* Напомним, что для однозначного восстановления последовательности во временной области требуется комплексный кепстр.

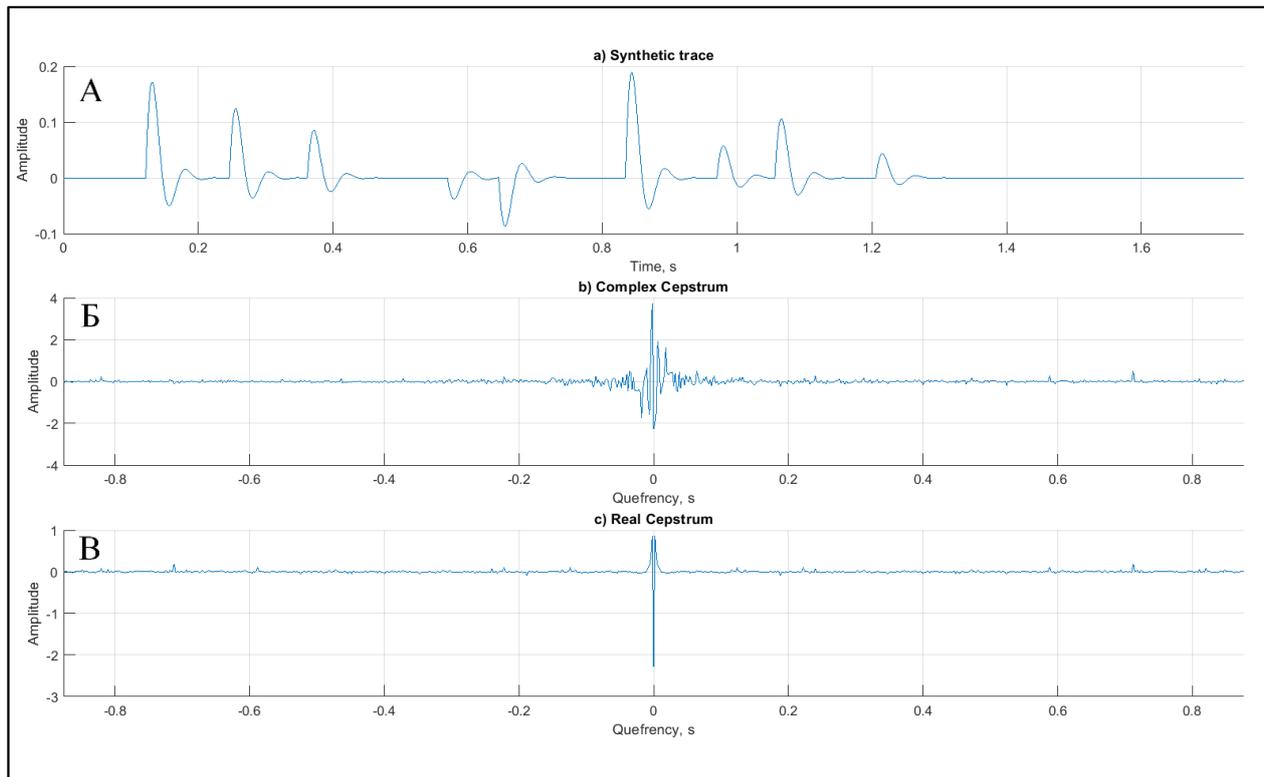


Рис. 2. Синтетическая сейсмическая трасса (А) и соответствующие ей комплексный (Б) и действительный (В) кепстры

4. АЛГОРИТМ ГОМОРФНОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ

По результатам проведения эксперимента и дальнейшего анализа полученных результатов были сделаны следующие выводы:

В ходе эксперимента первоначальное тестирование выбранного алгоритма гомоморфной деконволюции (*оценка сигнатуры источника по реальному кепстру и ее извлечение в кепстральной области*) проводилось на примере рассмотренной выше синтетической трассы с минимально-фазовым импульсом. В этом контексте было целесообразно сравнивать метод гомоморфной деконволюции с результатами деконволюции сжатия или предсказующей деконволюции с малыми задержками предсказания, так как они решают схожие задачи.

Для рационального сравнения различных техник по исходной синтетической трассе была выполнена деконволюция сжатия в статистической модификации. Были использованы следующие параметры процедуры: длина оператора (n) – 100 мс, окно расчета АКФ (W) – вся длина записи, уровень белого шума (ϵ) – 1%.

Результаты тестирования (рис. 3) показали, что *изучаемый вид гомоморфной деконволюции демонстрирует схожее функционирование с деконволюцией сжатия. Это означает, что первый алгоритм может успешно применяться в обработке реальных сейсмических наборов данных.*

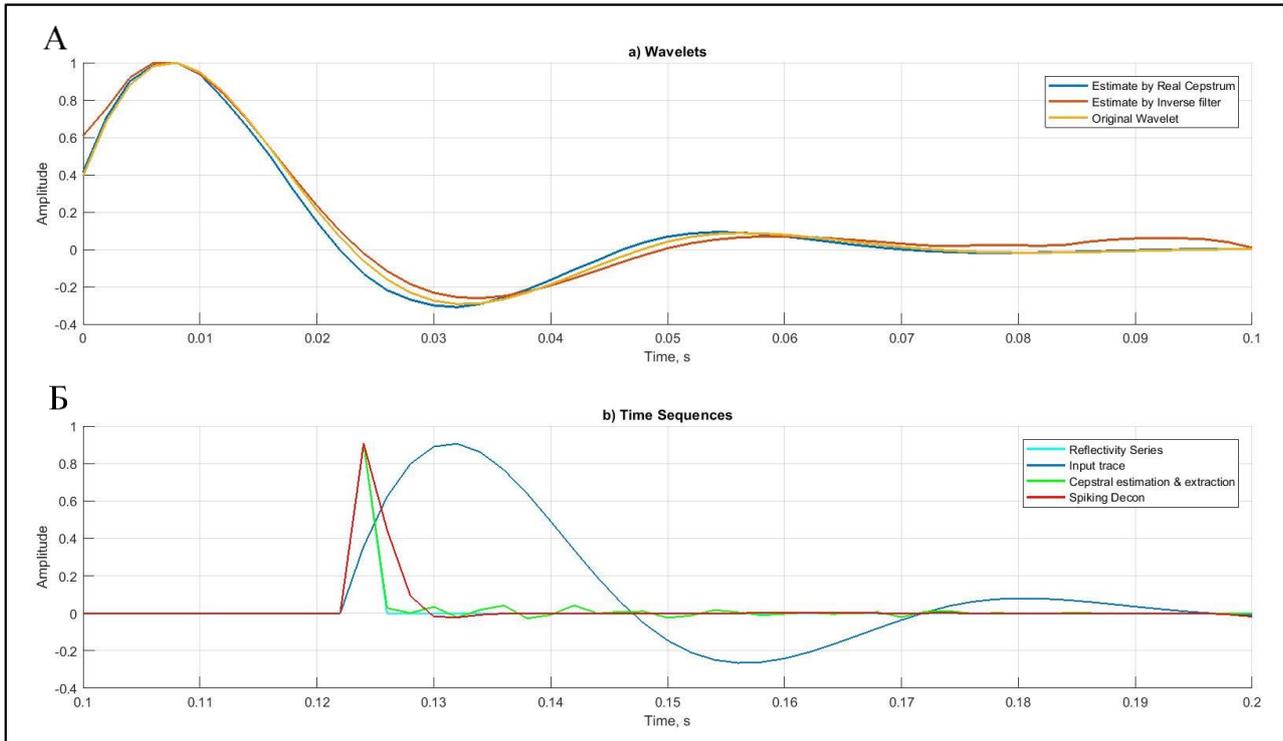


Рис. 3. Сравнение различных алгоритма гомоморфной деконволюции и деконволюции сжатия по Винеру (все временные ряды нормированы): оценки импульсов (А); последовательность коэффициентов отражения, исходная трасса и результаты работы алгоритмов деконволюции (Б)

Оценка сигнатуры источника по действительному кепстру и ее извлечение в кепстральной области. Рассматриваемый в настоящей работе алгоритм гомоморфной деконволюции, описанный здесь, основан на оценке комплексного кепстра сигнатуры источника, определенного по действительному кепстру трассы, и последующем вычитании первого из комплексного кепстра трассы. Как было отмечено выше, для восстановления комплексного кепстра импульса из действительного кепстра трассы требуется предположение о фазе сигнала. *Следовательно, данный алгоритм может быть использован напрямую для извлечения импульса любой фазы, в том числе нулевой, если она известна или может быть оценена.*

Основным параметром алгоритма является *размер окна анализа*, который иначе можно назвать *длиной оператора (фильтра) деконволюции в кепстральной области*. В случае минимально-фазового импульса размер окна анализа будет в 2 раза больше длины оператора, поскольку действительный кепстр – четная функция, а комплексный кепстр минимально-фазового сигнала существует только для неотрицательных кьюфренси; для нуль-фазового импульса окно анализа и длина оператора совпадают [Ulrych, 1971].

5. ГОМОМОРФНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ НУЛЬ-ФАЗОВЫХ СИГНАЛОВ НА ПРИМЕРЕ РЕАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ 2D

Рассматриваемый в настоящей работе алгоритм гомоморфной фильтрации был опробован на реальном полевом материале, полученном на одном из нефтяных месторождений Исламской Республики Иран в северо-восточной части Абаданской равнины. В качестве основных коллекторских пород здесь выступают преимущественно карбонатные образования, имеющие меловой возраст [Alsharhan and Nairn, 1986; Alsharhan and Nairn, 1988; Alsharhan and Nairn, 1990].

Полевая съемка была проведена по методике МОВ-ОГТ с номинальной кратностью 110, с

расстановкой из 650 каналов и распределением по удалениям от 10 до 6490 м. В качестве источника был использован вибросейс. Шаг по ПВ – 60 м, по ПП – 20 м. Длина записи – 7 сек, шаг дискретизации – 2 мс.

Непосредственно перед тестированием алгоритмов фильтрации и деконволюции данные прошли предварительную обработку и подготовку в программном пакете Paradigm, в составе которого используется обрабатывающий комплекс Echos.

Построение фильтра приведения к минимально-фазовому виду. По причинам вариативности типов источников в рассматриваемой съемке, требовалось привести записи вибросейса к минимально-фазовому виду для правильности и удобства обработки. В этом контексте, авторам работы показалось целесообразным опробовать работоспособность гомоморфного подхода при построении фазовых фильтров и сравнить полученные результаты со стандартной реализацией.

Построение фазового фильтра в кепстральной области начиналось с анализа действительных кепстров для выбора длины оператора. Делая предположение о нулевой фазе вибросейсмического импульса, можно использовать действительный кепстр записи на малых временах как аналог комплексного кепстра сигнатуры. Напомним, что действительный и комплексный кепстры нуль-фазового сигнала совпадают. Далее, повторно прибегая к действительному кепстру трассы для малых значений кьюфренси, вычисляется комплексный кепстр его минимально-фазового эквивалента. Итак, имея оценки комплексных кепстров нуль-фазовой сигнатуры и ее минимально-фазового аналога, можно реализовать фазовый поворот: из комплексного кепстра трассы вычесть первый и прибавить второй. Для устойчивости работы алгоритма рассчитывался единый фазовый фильтр для каждой сейсмограммы ОПВ, то есть производилось кепстральное осреднение; была выбрана длина оператора 100 мс (200 мс для оценки кепстров нуль-фазовой сигнатуры в силу их четности).

Общепринятый метод основан на оценке по ансамблю трасс амплитудного спектра (для каждой трассы или осредненного по всему ансамблю) в некотором временном окне, вычислении его минимально-фазового эквивалента с помощью преобразования Гильберта и построении фазового фильтра. При повороте фазы конкретных данных были выбраны следующие параметры: форма и размер окна анализа – от мьютинга первых вступлений до 4000 мс, процент белого шума – 0.1 %, для каждой сейсмограммы ОПВ строился единый фазовый фильтр.

Результаты в виде фрагментов временных разрезов до и после применения процедуры изображены на рисунке 4, соответственно; красным графиком выводится положение источника относительно дневной поверхности. Анализируя полученные данные, в целом можно заметить сильное сходство действия кепстральной и стандартной техник: улучшается фазовая корреляция виброданных с взрывными. При более детальном рассмотрении обработанных наборов довольно трудно выделить преимущества того или иного алгоритма: на суммах лучшую когерентность разных горизонтов и событий обеспечивают разные методы.

Таким образом, исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о работоспособности и эффективности кепстрального подхода при построении фазовых фильтров, сопоставимыми с производственными модулями. Составление заключения о превосходстве определенного алгоритма требует дальнейшего тестирования гомоморфной фильтрации.

Нуль-фазовая деконволюция представляет собой метод улучшения временного разрешения вибрационных данных, который является альтернативой последовательности операций фазового поворота и минимально-фазовой деконволюции Винера-Левинсона. Особенность этого метода заключается в том, что он сохраняет нулевой фазовый спектр сигнатуры на протяжении всего процесса обработки, что впоследствии облегчает интерпретацию результатов.

По тестовому профилю, полностью отработанному виброисточниками, были определены следующие параметры стандартного подхода нуль-фазовой деконволюции, реализуемого в спектральной области: размер и форма временного окна – от мьютинга первых вступлений до 4000 мс, частотная база сглаживания – 9 Гц, уровень белого шума – 0.1 %, диапазон частот для скалирования искомого амплитудного спектра обратного оператора – 10 – 60 Гц.

Предлагаемый авторами гомоморфный алгоритм базируется на оценке комплексного кепстра нуль-фазовой сигнатуры как действительного кепстра записи вблизи начала координат, а затем на извлечении вклада источника в кепстральной области путем его вычитания. Для этого выбрана длина оператора в 200 мс, то есть окно анализа от -100 до 100 мс.

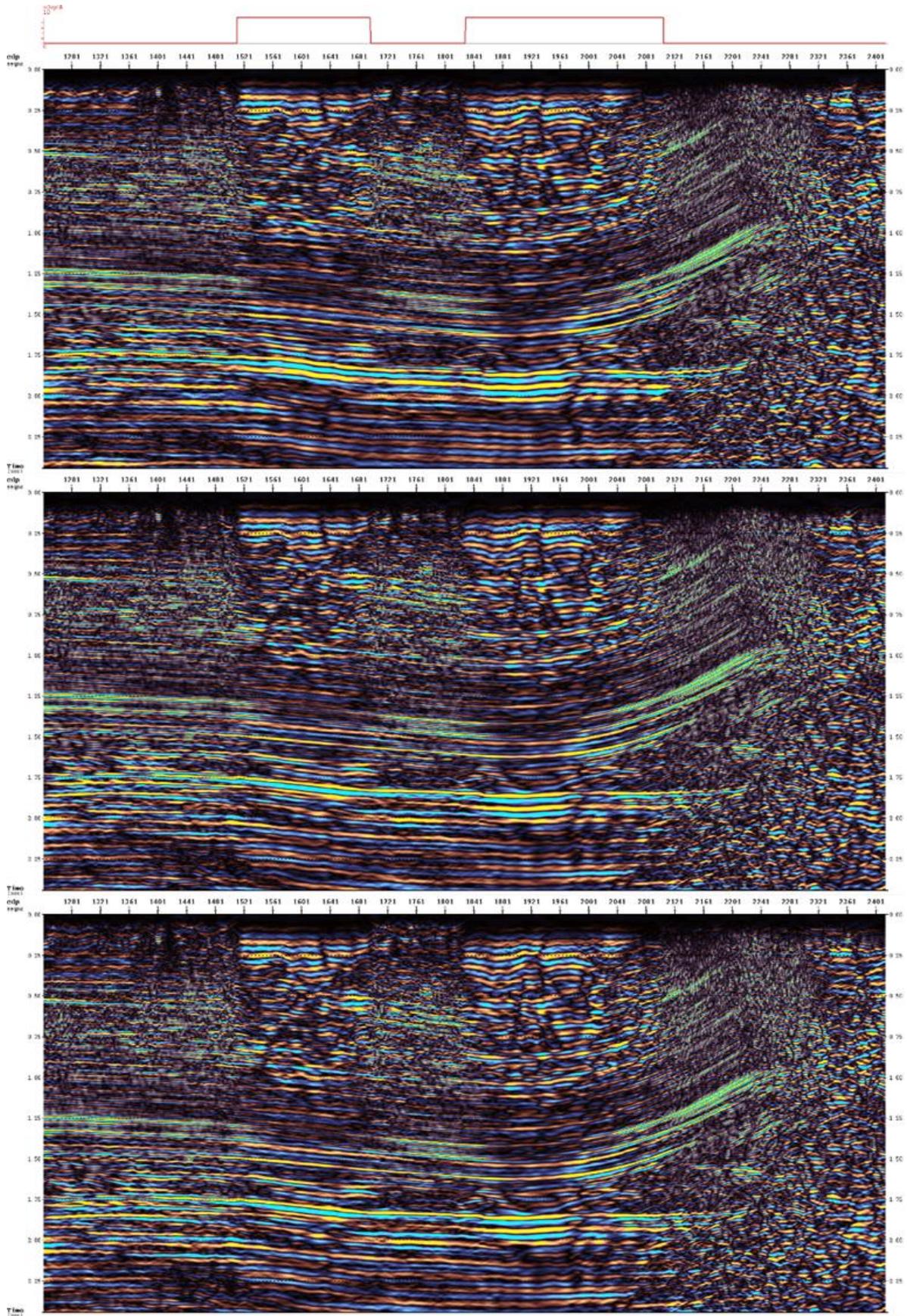


Рис. 4. Фрагменты разрезов ОСТ (сверху вниз): до фазового поворота, после фазового поворота стандартным способом и с помощью гомоморфного алгоритма. Красный график – положение источника относительно дневной поверхности

С точки зрения улучшения временного разрешения, результаты после нуль-фазовой деконволюции в спектральной и кепстральной областях схожи (рис. 5Б, В, 6Б, В). Тем не менее, можно выделить некоторые отличительные особенности действия алгоритмов:

- на сейсмограммах: ослабление высокоамплитудных участков в области малых удалений (в окне 0 – 250 мс), которое может быть избыточным и связано с не полностью подавленными поверхностными волнами; пространственная балансировка амплитуд для гомоморфной реализации;
- на АЧХ по сейсмограммам: лучшее спектральное отбеливание в кепстральном методе;
- на временных разрезах: пониженные амплитуды в верхней части разреза (до 250 мс) из-за ослабления высокоамплитудных участков (п. 1) и сохранение общего соотношения амплитуд относительно исходного разреза в случае применения гомоморфного алгоритма
- на АЧХ по разрезам: просадка амплитуд на частотах 15 – 25 Гц для нуль-фазовой спектральной деконволюции.

В связи с указанными положительными особенностями применения обратного нуль-фазового фильтра в кепстральной области следует рассмотреть возможность более широкого внедрения этого подхода на практике.

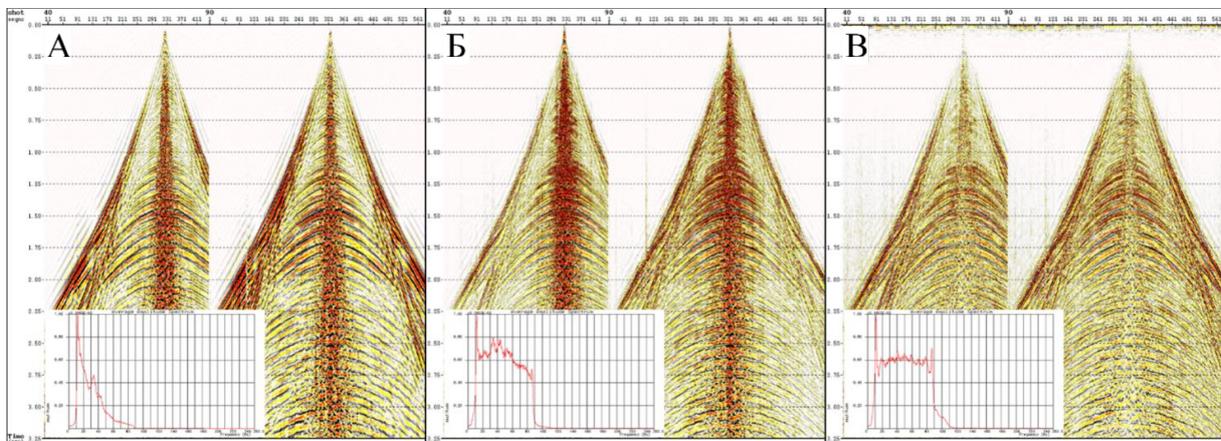


Рис. 5. Сейсмограммы ОПВ и соответствующие им амплитудные спектры: до нуль-фазовой деконволюции (А), после нуль-фазовой деконволюции стандартным методом (Б), после нуль-фазовой деконволюции по методу кепстральной оценки и извлечения сигнатуры источника (В)

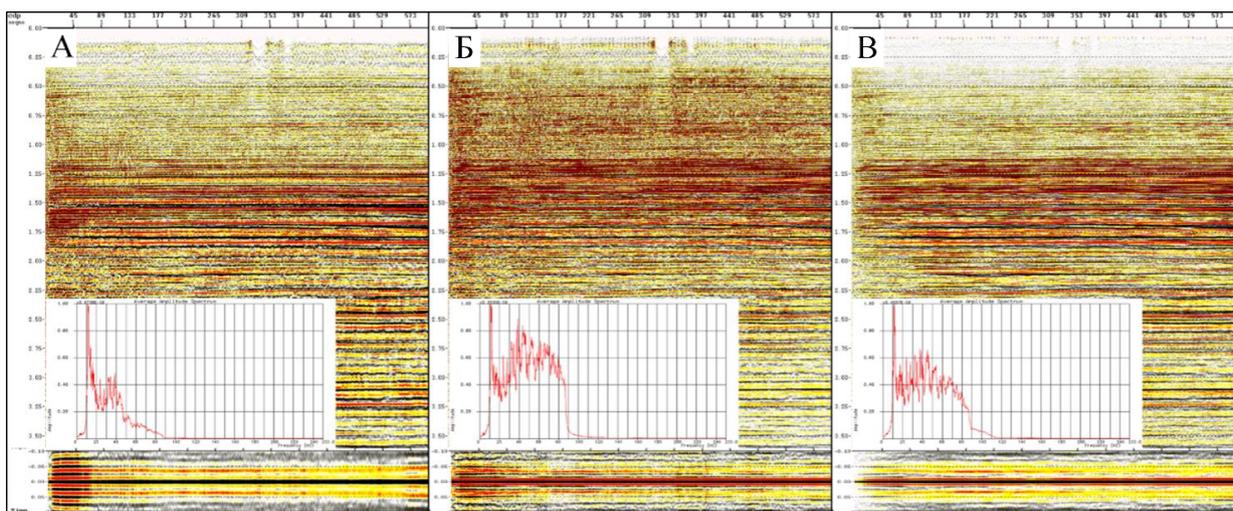


Рис. 6. Временной разрез, соответствующие ему амплитудный спектр и АКФ: до нуль-фазовой деконволюции (А), после нуль-фазовой деконволюции стандартным методом (Б), после гомоморфной нуль-фазовой деконволюции по методу кепстральной оценки и извлечения сигнатуры (В)

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы было проведено изучение объекта исследований как с теоретической, так и с практической стороны. Основные итоги работы можно сформулировать в следующих пунктах:

- запрограммированы алгоритмы нуль-фазовой деконволюции и приведения к минимальной фазе в кепстральной области, базирующиеся на части работы о теоретических основах кепстрального анализа;
- были фактически опробованы 2 вида гомоморфной фильтрации с определением необходимых параметров;
- выполнено сравнение эффективности кепстральных подходов с методами, принятыми в производственной практике.

Несмотря на кажущуюся математическую сложность кепстральных преобразований, была продемонстрирована работоспособность и состоятельность гомоморфных реализаций, сравнимых со стандартными методами. В некоторых случаях гомоморфные подходы показали свои положительные отличительные качества.

Важными остаются вопросы стабилизации и выбора оптимальных параметров кепстральных методик, которые требуют детального рассмотрения.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников компании ООО «ПетроТрейс» Александра Евгеньевича Королёва и Алексея Александровича Шевченко за важные замечания и неоценимую помощь в подготовке публикации.

ЛИТЕРАТУРА

- Рабинович Е.В. и др. Модель сейсмического импульса, возникающего при гидравлическом разрыве пласта. Математические структуры и моделирование, №. 4 (32), 2014. 105 – 111 с.
- Alsharhan A.S., Nairn A.E. M. A review of the Cretaceous formations in the Arabian Peninsula and Gulf: Part I. Lower Cretaceous (Thamama Group) stratigraphy and paleogeography. Journal of Petroleum Geology, Volume 9, №. 4, 1986. 365 – 391 p.
- Alsharhan A.S., Nairn A.E. M. A review of the Cretaceous formations in the Arabian Peninsula and Gulf: Part II. Mid-Cretaceous (Wasia Group) stratigraphy and paleogeography. Journal of Petroleum Geology, Volume 11, №. 1, 1988. 89 – 112 p.
- Alsharhan A.S., Nairn A.E. M. A review of the Cretaceous formations in the Arabian Peninsula and Gulf: Part III. Upper Cretaceous (Aruma Group) stratigraphy and paleogeography. Journal of Petroleum Geology, Volume 13, №. 3, 1990. 247 – 266 p.
- Bogert B.P., Healy M.J.R., Tukey J.W. The Quefrency Analysis [sic] of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo Autocovariance, Cross-Cepstrum and Saphe Cracking. Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis (M. Rosenblatt, Ed) Chapter 15, 209-243. New York: Wiley, 1963.
- 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.
- Randall R.B. Cepstrum Analysis and Gearbox Fault Diagnosis. Technical Report 13-150. Brüel & Kjær Technical Review, 1981. 21 p.
- 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.
- 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.
- Ulrych T.J. Application of homomorphic deconvolution to seismology. Geophysics, Volume 36, № 4, 1971. 650 – 660 p.

APPLICATION OF CEPSTRAL ANALYSIS AND HOMOMORPHIC DECONVOLUTION IN PROCESSING OF ZERO-PHASE SEISMIC DATA

Matveev N.M., Stepanov P.Yu.

Zero-phase signals are widely used in the interpretation of seismic data, however, special approaches are required when processing the former, which form an established paradigm. First of all, this concerns vibro-seismic recordings at the stage of their conversion to a minimum-phase form, preceding the inverse filtering procedure, and deconvolution as such. Deconvolution plays a key role in the processing of seismic data as a tool to increase the time resolution. To date, the most widely spread algorithms are based on the Wiener-Levinson method. Nevertheless, the series of articles also describe non-standard methods, including deconvolution in the cepstral domain. Within the framework of this work, algorithms for homomorphic deconvolution and filtering were developed and tested on model and real seismic data. The effectiveness of these methods was evaluated in comparison with standard deconvolution approaches. The results showed that the cepstral techniques are comparable in efficiency with traditional approaches and have unique advantages in some cases.

KEYWORDS: INVERSE FILTERING, HOMOMORPHIC DECONVOLUTION, CEPSTRAL ANALYSIS