



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАРМОНИК ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА КОРРЕЛОГРАММ И РАЗРЕЗОВ В ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

Михаил Сергеевич Денисов^{1,✉}, Андрей Александрович Зыков²

^{1,2}ООО «ГЕОЛАБ», 119071, Москва, ул. Орджоникидзе, 12/4, Россия

¹denisovms@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1532-8457>

²zyrokin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3458-3577>

Аннотация. Введенный ранее алгоритм оптимизационной рекурсивной фильтрации позволяет разделять сигнал и гармоники на записях невзрывной сейсморазведки. Это открывает возможность построения коррелограмм или разрезов как по основному свип-сигналу, так и по его гармоникам различного порядка. Оказалось, что накапливание результатов в перекрывающихся диапазонах частот не только не имеет смысла, но и может привести к появлению специфических артефактов. Производится построение коррелограмм и разрезов в неперекрывающихся частотных диапазонах с последующей их сшивкой при помощи методики аналитического продолжения спектра.

Ключевые слова: вибросейс, гармоники, авторегрессия, импульс

Для цитирования: Денисов М.С., Зыков А.А. Использование гармоник для расширения спектра коррелограмм и разрезов в вибрационной сейсморазведке // Геофизические технологии. 2025. № 2. С. 4–25. doi:10.18303/2619-1563-2025-2-4.

UTILIZATION OF HARMONICS FOR CORRELOGRAM AND STACK SPECTRUM BROADENING IN VIBROSEIS

Mikhail S. Denisov^{1,✉}, Andrey A. Zykov²

^{1,2}GEOLAB Ltd, Ordzhonikidze Str., 12/4, Moscow, 119071, Russia,

¹denisovms@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1532-8457>

²zyrokin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3458-3577>

Abstract. The previously introduced algorithm of optimization recursive filtering allows separation of the signal and the harmonics in non-explosive seismic data. This opens up the possibility of separately constructing correlograms or stacks based on the main sweep signal and its harmonics of different orders. It turned out that summation of results in overlapping frequency ranges not only does not make sense, but can also lead to the appearance of specific artifacts. Correlograms and sections are constructed in non-overlapping frequency ranges with their subsequent stitching using the analytical spectrum extrapolation technique.

Keywords: vibroseis, harmonics, autoregression, wavelet

For citation: Denisov M.S., Zykov A.A. Utilization of harmonics for correlogram and stack spectrum broadening in vibroseis // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 2. P. 4–25. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-2-4.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее исследование продолжает цикл работ, инициированный М.Б. Шнеерсоном. Статьи, входящие в этот цикл, посвящены различным аспектам проблемы гармоник в невзрывной

сейсморазведке. В первую очередь, возможности использования гармоник для расширения спектра сигнала. В работе [Денисов, Зыков, 2023б] на модельных и реальных данных был опробован алгоритм, позволяющий отделить сигнал от гармоник, а также разделить поля гармоник различного порядка. При этом возбуждаемый свип-сигнал может иметь нелинейную частотную модуляцию, а также амплитудную модуляцию. На следующем этапе производится построение коррелограмм и разрезов отдельно по основному сигналу и по гармоникам. В результате такой обработки геофизик получает и совместно интерпретирует набор разрезов, отличающихся шириной спектра импульса и разрешенностью. Открытым остался вопрос об оптимальном суммировании разрезов с целью получения единого волнового поля, характеризуемого максимально расширенным спектром. Казалось бы, для всего расширенного частотного диапазона имеет смысл накапливать разрезы с целью выделения сигнала и ослабления шума. Например, в диапазоне частот возбуждения основного свипа (он же – первая гармоника) можно к полученному по нему разрезу добавить разрез второй гармоники, тем самым синфазно накопить сигнал, ослабив при этом нерегулярную помеху. Однако, как показало недавнее исследование [Денисов, 2024], такое накопление не имеет смысла, а разрезы гармоник различного порядка в перекрывающихся частотных диапазонах совпадают. В том числе, реализация помехи оказывается одинаковой, что лишает смысла накопление. В настоящей работе нам предстоит ответить на вопрос о том, какой способ построения единого разреза оказывается предпочтительным.

Достаточно полный обзор литературы, посвященной проблеме разделения сигнала и гармоник с возможным последующим использованием последних, приведен в статье [Denisov et al., 2021], а в работе [Денисов, 2024] он дополнен свежими публикациями, в которых предлагается не просто устранять гармоники, а извлекать содержащуюся в них полезную информацию.

МОДЕЛЬ

Введенная ранее модель дискретного вибросейсмического сигнала $q(t)$ [Денисов, Егоров, 2019а] записывается в виде

$$q(t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) * q_m(t), \quad (1)$$

где $q_m(t)$ – гармоника m -го порядка, $a_m(t)$ – фильтры, M – общее число гармоник, t – индекс дискретного времени. Звездочка обозначает свертку. Фактически выражение (1) описывает разложение сигнала $q(t)$ по системе базисных функций. Функцию $q_1(t)$ называем сигналом основного тона, опорным свипом или первой гармоникой, при этом $a_1(t) \equiv \delta(t)$ – дискретная дельта-функция. Основной свип может характеризоваться нелинейной частотной модуляцией (НЛЧМ), а также совместно амплитудной и нелинейной частотной модуляцией (АНЛЧМ). Методика расчета гармоник m -го порядка по АНЛЧМ свип-сигналу предложена в работе [Денисов, Зыков, 2023а].

Гармоники имеют более широкую, чем у опорного свипа, спектральную характеристику. Если сигнал основного тона возбуждается в пределах частотного диапазона $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$, где ω – циклическая частота, то m -я гармоника занимает диапазон частот $(m\omega_1, m\omega_2)$. Пусть, например, опорный свип имеет верхнюю частоту 90 Гц, тогда верхняя частота второй гармоники равна 180 Гц, что теоретически позволяет

расширить спектр сигнала, насытив его высокими частотами до этого значения. Для описания исходной виброграммы $v(t)$ используем традиционную статистическую сверточную модель

$$v(t) = r(t) * p(t) * q(t), \quad (2)$$

где $r(t)$ – последовательность коэффициентов отражения, $p(t)$ – оператор, описывающий влияние на сигнал эффектов при прохождении им верхней части разреза (ВЧР), где поглощающие свойства среды могут приводить к ослаблению высокочастотных компонент импульса. Считаем, что $r(t)$ является реализацией случайного процесса типа белого шума. Этот процесс нестационарный, его дисперсия уменьшается с ростом t , что обусловлено эффектом геометрического расхождения.

Переход к коррелограмме $z_1(t)$ осуществляется при помощи корреляции функций $v(t)$ и $q_1(t)$. Или, что то же самое, – свертки с оператором, заданным в обращенном времени,

$$z_1(t) = v(t) * q_1(-t). \quad (3)$$

В последнем выражении использование в условном обозначении коррелограммы нижнего индекса 1 подчеркивает, что она может быть получена не только в результате корреляции по первой гармонике.

АЛГОРИТМ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАРМОНИК

Предложенный в работе [Денисов, Егоров, 2019б] алгоритм, получивший название оптимизационной рекурсивной фильтрации (ОРФ), позволяет отделить ЛЧМ сигнал основного свипа от гармоник, а также отделить друг от друга гармоники различных порядков. Позже этот алгоритм был обобщен на случай АНЛЧМ сигналов [Денисов, Зыков, 2023б]. Реализуется следующая последовательность вычислительных процедур.

1. Переход к коррелограмме от виброграммы путем корреляции последней с сигналом первой гармоники.

2. Прогнозирование гармоник с последующим их адаптивным вычитанием. В результате будет получена коррелограмма, связанная только с основным свипом.

3. Преобразование посчитанной на предыдущем шаге коррелограммы в виброграмму, связанную только с основным свипом (назовем такую процедуру *декорреляцией*, а ее особенности изучим ниже).

4. Вычитание посчитанной виброграммы основного свипа из исходной виброграммы. В результате получим виброграмму, связанную только с гармониками. Повторяя описанные вычисления, можно разделить эту виброграмму на виброграммы, связанные с каждой гармоникой.

5. Корреляция виброграмм гармоник с соответствующими им свипами. По полученным коррелограммам реализуется построение разрезов или к ним применяется миграция до суммирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На основании имеющегося в распоряжении набора коррелограмм (или полученных по ним разрезов) гармоник различных порядков требуется построить единую коррелограмму (или разрез), характеризующую расширенным за счет использования энергии гармоник спектром импульса.

СЛОЖНОСТИ КОРРЕКЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО РАСХОЖДЕНИЯ

Исходные полевые виброграммы всегда характеризуются ослаблением амплитуды сигнала за счет эффекта геометрического расхождения. Как правило, его компенсация производится путем умножения сейсмической записи на гладкую возрастающую степенную функцию t^α , где α – параметр, задаваемый пользователем. Понятно, что такая обработка имеет смысл только для импульса минимальной протяженности, когда на всей своей длине он умножается на одно число, т. е. в идеальном случае импульс должен быть дискретной дельта-функцией. Иначе нарушается стационарная сверточная модель (2), а сигнал становится переменным по временной оси. На виброграмме вместо коротких сфокусированных импульсов наблюдаются протяженные сигналы, поэтому компенсировать по ней расхождение некорректно. Обычно эту процедуру применяют к коррелограмме, однако в нашем случае такой подход тоже неприменим. Дело в том, что при традиционной обработке, когда игнорируется наличие гармоник, при коррекции расхождения восстанавливаются амплитуды сфокусированных после корреляции импульсов Клаудера. Наличие в данных гармоник означает, что в результате корреляции с основным свипом на фоне импульсов Клаудера (они же – автокорреляционные функции (АКФ) первой гармоники) также будут получены функции взаимной корреляции (ФВК) старших гармоник с первой. (В данной ситуации имеются в виду АКФ и ФВК, введенные для детерминированных сигналов [Гоноровский, 1977].) Как показано в работе [Денисов, Шнеерсон, 2017], если основной свип является ЛЧМ сигналом, то с некоторыми несущественными допущениями эти ФВК можно считать протяженными ЛЧМ сигналами. Таким образом, на коррелограмме имеются протяженные сигналы, поэтому компенсировать расхождение, умножая на возрастающую функцию, некорректно. Итак, мы не имеем возможности компенсировать расхождение ни по виброграмме, ни по коррелограмме. Такая возможность появится только после разделения сигнала и гармоник, когда будут получены коррелограммы отдельно по каждой гармонике, на которых не будут наблюдаться эффекты интерференции гармоник различных порядков.

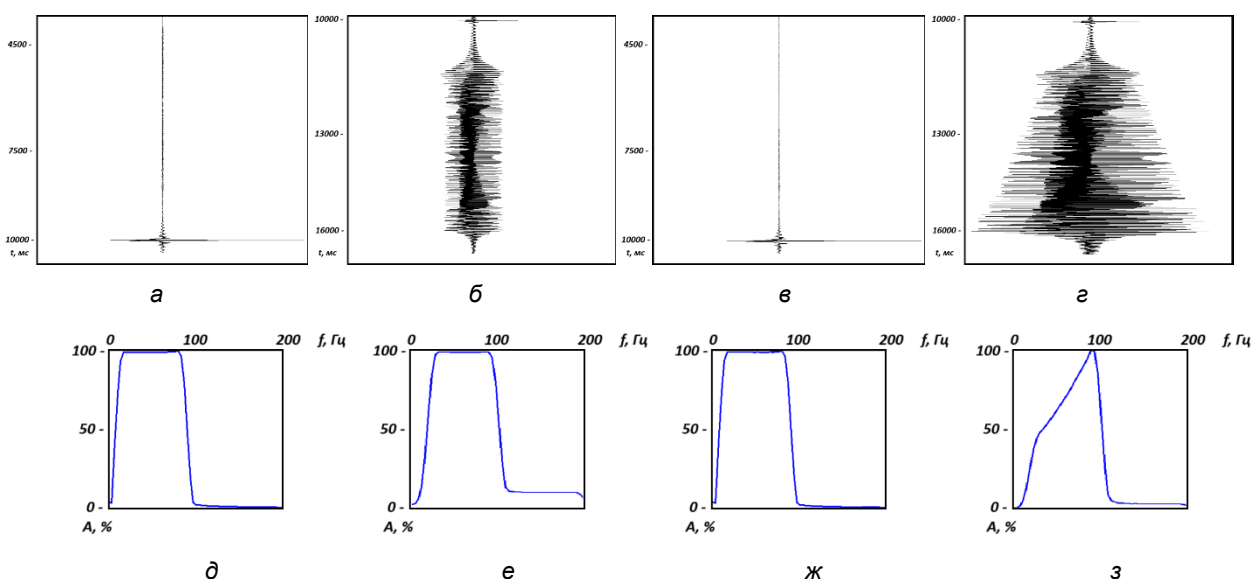


Рис. 1. Взаимное расположения АКФ и ФВК гармоник, а также особенности, связанные с коррекцией геометрического расхождения по коррелограмме; а – коррелограмма по первой гармонике; б – коррелограмма по второй гармонике; в – коррекция расхождения, примененная к коррелограмме по первой гармонике; г – коррекция расхождения, примененная к коррелограмме по второй гармонике; д – амплитудный спектр сигнала, показанного на рис. 1, а; е – амплитудный спектр сигнала, показанного на рис. 1, б; ж – амплитудный спектр сигнала, показанного на рис. 1, в; з – амплитудный спектр сигнала, показанного на рис. 1, г.

Иная ситуация возникает, если применяется корреляция по второй гармонике. На коррелограмме наблюдаем сфокусированный импульс АКФ второй гармоники и на его фоне ЛЧМ сигнал ФВК первой и второй гармоник, который на временной оси следует за АКФ (рис. 1, б). Амплитудный спектр такого сигнала представлен на рис. 1, е. Применение коррекции геометрического расхождения значительно искажает как саму коррелограмму (рис. 1, з), так и ее спектральную характеристику (рис. 1, з). Так как у ЛЧМ сигнала высокочастотная часть расположена в его хвосте, и именно там функция коррекции расхождения достигает своего максимального значения, спектр оказывается перегруженным высокочастотными компонентами. (На рисунке 1, а и б показаны разные временные интервалы, так как импульс АКФ первой и второй гармоник фокусируется на одном и том же времени 10 с, а их артефакты расположены по разные стороны этого импульса.)

Итак, к каким проблемам приводит невозможность корректной компенсации геометрического расхождения? При традиционной методике обработки вибросейсмических данных (если не иметь в виду технологию slip-sweeper), когда корреляция применяется до этапа коррекции расхождения, артефакты, связанные с гармониками, предшествуют сфокусированному сигналу, как это показано на рис. 1, а. Иначе говоря, в интерференционной записи помеха от слабого сигнала (ослабленного за счет геометрического расхождения) накладывается на сильный сигнал и на его фоне почти незаметна. После этого можно корректировать затухание амплитуд за счет расхождения. Проблема возникает, когда требуется выделить гармоники, для чего применяется корреляция по сигналу гармоники старшего порядка (шаг 5). Артефакт от сильного сигнала (в нашем случае, как будет показано ниже, обусловлен неточностью удаления первой гармоники на шаге 4) расположен в его хвостовой части (рис. 1, б), т. е. в интерференционной записи наложится на слабые импульсы, маскируя их.

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ЕДИНОЙ КОРРЕЛОГРАММЫ (РАЗРЕЗА)

В работе [Денисов, 2024] утверждается, что в перекрывающихся диапазонах частот коррелограммы разных гармоник, получаемые при помощи ОРФ, совпадают. Например, если получить трассу первой и второй гармоник, они окажутся тождественными в диапазоне частот $(2\omega_1, \omega_2)$. Поэтому, казалось бы, коррелограмму или разрез можно получать сразу по второй гармонике в расширенном диапазоне частот, добавив затем в него низкие частоты $(\omega_1, 2\omega_1)$ от первой гармоники. При практической реализации такой процедуры мы столкнулись с эффектом появления артефактов, который необходимо было объяснить.

Выяснилось, что посчитанная на шаге 3 виброграмма неточно вычитается из исходной виброграммы, и в получаемом результате все еще остается достаточно энергии первой гармоники, в то время как ее там быть уже не должно. Этот эффект демонстрируется на рис. 2, где в качестве свипа использован тот же ЛЧМ сигнал, что и на рис. 1. Последовательность коэффициентов отражения является реализацией пуассоновского потока импульсов с гауссовским распределением амплитуд. Волновое поле представлено в виде фрагмента разреза, смоделированного путем копирования одной синтетической трассы коррелограммы. Фрагменты записей, полученных в результате разделения гармоник по методу ОРФ, изображены на рис. 2, а и б, а амплитудные спектры полных трасс на рис. 2, в и г соответственно. Показан именно фрагмент, что связано со сложностью визуализации протяженных осциллирующих функций. На спектральной характеристике трассы второй гармоники выделяются компоненты, связанные с граничными частотами свипа первой гармоники: 10 Гц (рис. 2, д, где изображен амплитудный спектр

фрагмента разреза) и 100 Гц (рис. 2, з). К объяснению этого явления мы вернемся позже. Модель импульсной трассы была посчитана с учетом нестационарности, связанной с затуханием амплитуд, обусловленным геометрическим расхождением. После получения коррелограмм первой и второй гармоник затухание амплитуд было скомпенсировано. Очевидно, что волновое поле второй гармоники содержит интенсивные артефакты. Если бы мы имели дело со стационарной трассой, то этот эффект был бы едва заметен.

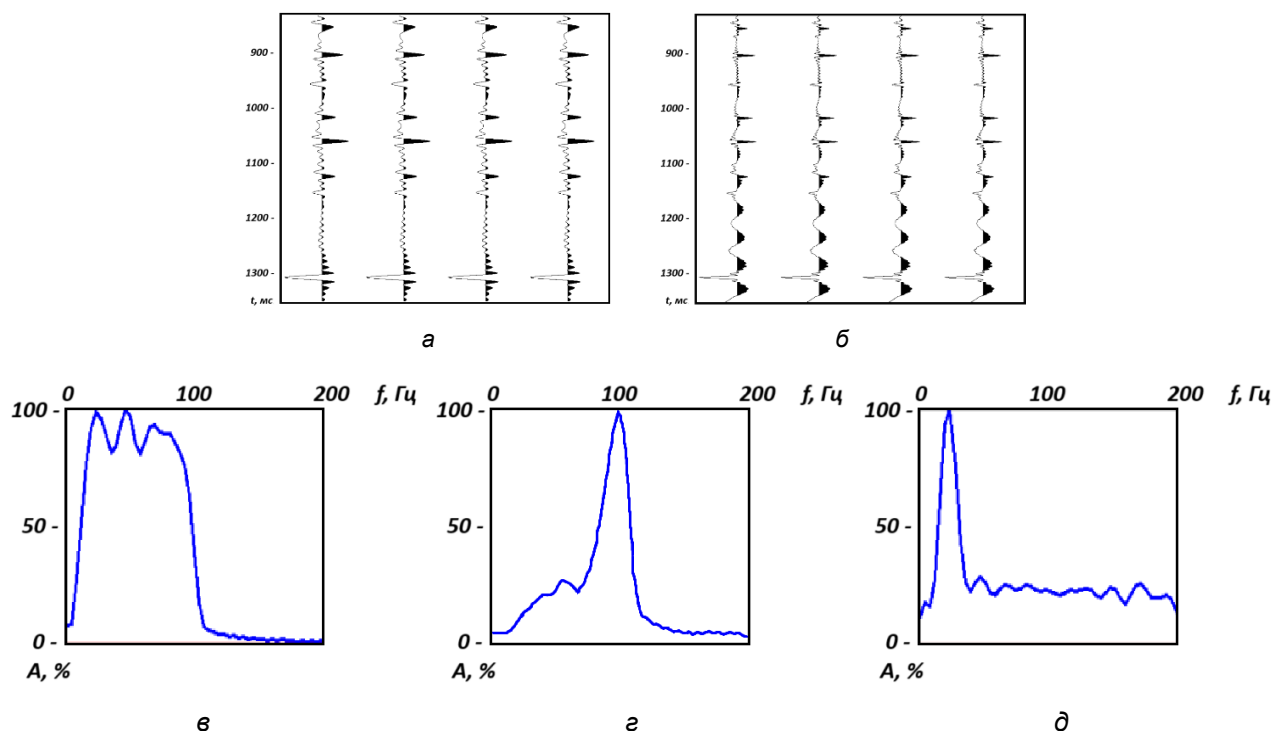


Рис. 2. Артефакты, связанные с неточностью вычитания виброграммы первой гармоники из исходной виброграммы; а – фрагмент модельного разреза первой гармоники; б – фрагмент модельного разреза второй гармоники; в – амплитудный спектр разреза, измеренный по полной длине трассы на рис. 2, а; з – амплитудный спектр разреза, измеренный по полной длине трассы на рис. 2, б; д – амплитудный спектр разреза, измеренный по фрагменту, показанному на рис. 2, б.

В реальных данных всегда присутствует геометрическое расхождение, поэтому импульсная трасса оказывается нестационарной, и обработчику приходится расхождение компенсировать, тем самым усиливая артефакты. Иными словами, после удаления из исходной виброграммы первой гармоники и корреляции полученного результата по второй гармонике появляется протяженный артефакт в виде ФВК остатка первой гармоники со второй гармоникой. Как мы видели на рис. 1, б, эта ФВК расположена в хвосте сигнала, тем самым на коррелограмме она накладывается на слабые отражения. Высокочастотная часть артефакта смещается на большие времена коррелограммы, а низкочастотная часть локализована на малых временах. Коррекция геометрического расхождения усиливает амплитуду записи на больших временах, поэтому в спектре трассы начинают доминировать высокочастотные компоненты (рис. 2, з), и это мы уже наблюдали на рис. 1, з и 3. Спектр оценивался в интервале 8–10 с. Если же в качестве окна спектрального оценивания выбрать верхнюю часть трассы (0–2 с), то в АЧХ этого фрагмента будет доминировать низкая частота, обусловленная артефактом (рис. 2, д). Нам, однако, нужно ответить на вопрос, с чем связано появление артефакта. Сам собой напрашивающийся ответ, что он обусловлен неточностью прогнозирования модели помехи или адаптивного вычитания этой модели (шаг 2)

оказывается неверным. Как показали результаты экспериментов, даже если не прибегать к процедуре адаптивного оценивания и вычитания, а выбрать истинные значения фильтров $a_m(t)$, что исключает эффект недочитания или перевычитания, артефакт все равно появится.

После тщательного исследования мы пришли к заключению, что описанное явление связано с необратимостью корреляции. Иначе говоря, последовательное применение к некоторому импульсу, сосредоточенному в диапазоне частот основного свипа, процедур корреляции и декорреляции по основному свипу не приведет к получению исходного импульса. Здесь уместно расшифровать введенный выше термин. Под декорреляцией для ЛЧМ сигнала мы понимаем свертку с этим сигналом. В самом деле, предполагается, что ЛЧМ сигнал имеет равную единице равномерную в заданном диапазоне частот амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Поэтому свертка с ним устранил фазо-частотную характеристику (ФЧХ), которую импульс приобрел при корреляции с ЛЧМ сигналом, а амплитудный спектр импульса в результате корреляции и декорреляции дважды умножится на единицу, не претерпев изменений.

Однако, как мы это видели на результатах обработки на рис. 2, такая логика не вполне соответствует экспериментальным данным. Мы объясняем это тем, что на самом деле использованные нами ЛЧМ сигналы имеют неравномерную АЧХ. Действительно, вывод АЧХ ЛЧМ сигнала [Вакман, 1965; Гольдин, 1974; Гоноровский, 1977] производится для непрерывных, а не для дискретных сигналов (в указанных источниках предложены различные способы вывода). К тому же, результат является асимптотическим, а именно, он получен в предположении, что глубина фазовой модуляции намного больше единицы. Если обозначить через $Q_1(\omega)$ спектр функции $q_1(t)$, то описанная особенность записывается как $Q_1(\omega)\bar{Q}_1(\omega) \neq 1$ при $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$, где горизонтальная черта над буквой обозначает комплексное сопряжение. Причина, почему неравномерность АЧХ имеет наибольшую интенсивность на краях частотного диапазона, поясняется в книге [Баскаков, 2000].

Рассуждения иллюстрируются модельным примером. Результат применения к дискретной дельта-функции процедур корреляции и декорреляции с ЛЧМ свип-сигналом, заданным в диапазоне частот 10–100 Гц и имеющим длительность 10 с, показан на рис. 3, б. Ожидалось, что полученный сигнал будет совпадать с оператором полосовой фильтрации, который изображен на рис. 3, а, однако это не так. Была посчитана разность между сигналом на рис. 3, а и полосовым фильтром, она представлена на рис. 3, в. На рисунке 3, г–е показаны соответствующие амплитудные спектры. Общий уровень энергии разности составляет примерно 2 % энергии исходного импульса. Как следует из рисунка, осложнения, связанные с необратимостью оператора корреляции, сказываются, в первую очередь, на краях его частотной характеристики. Однако и в пределах рабочего диапазона частот наблюдается отличие реального от предполагаемого сигнала. Можно утверждать, что такие отличия, включая артефакты на краях частотного диапазона, невелики, и это действительно так. Они становятся заметными после применения процедуры коррекции расхождения, когда, поднимая амплитуды сигналов на больших временах регистрации, мы вместе с сигналами усилим наложенные на них артефакты, связанные с интенсивными отражениями в верхней части разреза.

В результате сравнения рис. 3, г и д может создаться впечатление, что проблема заключается в краевых осцилляциях АЧХ, которые обычно связывают с эффектом Гиббса [Хемминг, 1980], и это отчасти верно. Известно, что они обусловлены усечением фильтра во временной области. При этом увеличение длины фильтра слабо сказывается на интенсивности осцилляций, которые, медленно затухая,

концентрируются ближе к области разрыва АЧХ. Для ослабления эффекта Гиббса обычно используют весовые окна, их применение приводит к сглаживанию АЧХ. Это, однако, в нашей задаче приводит к необходимости применения деконволюции, так как после разделения сигнала и гармоник на коррелограмме потребуется обратный переход к виброграмме, что приведет к необходимости коррекции записи за влияние ранее примененной фильтрации с оператором, имеющим неравномерную АЧХ.

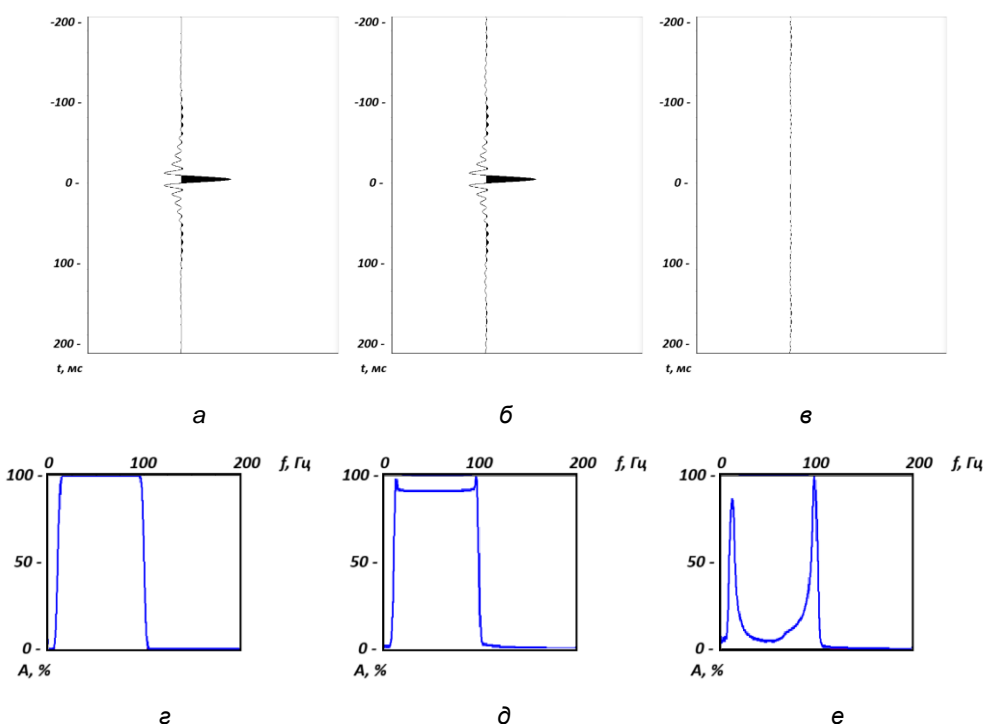


Рис. 3. Результат применения корреляции и декорреляции к дельта-функции; а – идеальный полосовой фильтр; б – полученный сигнал; в – разность между полученным и идеальным сигналами; г – амплитудный спектр полосового фильтра; д – амплитудный спектр полученного сигнала; е – амплитудный спектр разности, нормированный по уровню к спектру сигнала.

С учетом вышесказанного было принято решение реализовать декорреляцию в виде идеальной обратной цифровой фильтрации, что, в том числе, должно позволить устранить неточности, связанные с переходом от непрерывных к дискретным сигналам, а также погрешности асимптотических допущений. Был построен фильтр с частотной характеристикой $1/\bar{Q}_1(\omega)$. Ожидается, что последовательное применение корреляции и декорреляции соответственно с операторами, имеющими частотные характеристики $\bar{Q}_1(\omega)$ и $1/\bar{Q}_1(\omega)$, приведет к более уверенному восстановлению исходного импульса. Однако, как оказалось, хотя погрешность снижается по сравнению с предыдущим подходом (рис. 4 – энергия разности между идеальным полосовым фильтром и результатом корреляции и деконволюции примерно в два раза меньше энергии разности между идеальным полосовым фильтром и результатом корреляции и свертки), эта методика также не обеспечивает требуемого результата. Проблема связана с ограниченностью диапазона частот свипа. Финитного идеального обратного к нему фильтра не существует. Требуется использовать регуляризацию, что искажает решение, в первую очередь, в окрестности граничных частот сигнального диапазона. Если в качестве опорного свипа использован АНЛЧМ сигнал, то возврат от коррелограммы к виброграмме возможен только при помощи деконволюции.

Понятно, что на этом пути мы столкнемся с теми же проблемами. Таким образом, обеспечение обратимости корреляции представляет собой задачу повышенной сложности.

В процессе развития алгоритма ОРФ нам не приходилось преодолевать подобные трудности, так как не было необходимости последовательного применения корреляции и декорреляции. Когда перед нами стоит задача устранения гармонических искажений сигнала, достаточно перейти от виброграммы к коррелограмме, обработка которой позволяет удалить энергию гармоник. Обратный переход к виброграмме не производится.

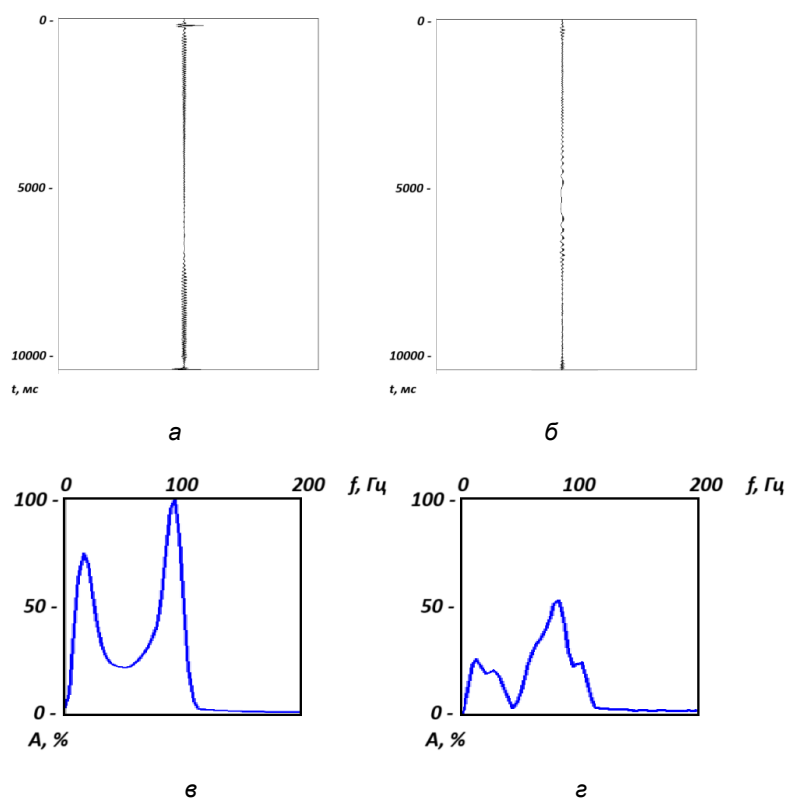


Рис. 4. Разность между идеальным полосовым фильтром и результатом последовательного применения к дискретной дельта-функции процедур корреляции и декорреляции (здесь амплитудные спектры не нормированы на условную единицу, а имеют один и тот же масштаб, что позволяет лучше оценить различие их энергий); а – разность между корреляцией и сверткой со свипом; б – разность между корреляцией и деконволюцией со свипом; в – амплитудный спектр трассы на рис. 4, а; г – амплитудный спектр трассы на рис. 4, б.

ПРОБЛЕМА РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛА И ГАРМОНИК НА ВИБРОГРАММЕ

Традиционная реализация алгоритма ОРФ использует оптимизационную процедуру разделения сигнала и гармоник на коррелограммах. Это связано с тем, что при корреляции происходит фокусировка основного свипа, а все артефакты, связанные с гармониками, не интерферируют с ним. Следовательно, появляется возможность использования критерия минимума энергии при адаптивном вычитании. Однако такая реализация требует использования процедур корреляции и декорреляции, которые, как мы видели, искажают интересующее нас поле гармоник. В этой ситуации логично было бы изменить алгоритм так, чтобы избежать применения необратимой процедуры, и разделять сигнал и гармоники непосредственно на виброграмме. Действительно, такая возможность имеется, и она имеет свое теоретическое обоснование.

Нетрудно убедиться в том, что задача адаптивного вычитания одного волнового поля из другого на основании критерия минимума энергии инвариантна относительно линейного преобразования этих полей. Иными словами, если применить к обоим волновым полям свертку с одним и тем же оператором, то оптимальный фильтр адаптации не изменится. В нашем случае, когда настройка оператора производится по коррелограммам, это означает, что то же самое решение может быть получено и по виброграммам. В самом деле, как исходная коррелограмма, так и все коррелограммы спрогнозированных помех, подвергались корреляции с одним и тем же сигналом основного свипа. Тогда алгоритм разделения сигнала и гармоник на виброграмме подразумевает предварительное прогнозирование помех (используются те же самые фильтры, которые применялись к коррелограммам) и их последующее адаптивное вычитание. Методика была нами опробована, однако и такой способ построения волновых полей гармоник старшего порядка приводит к появлению специфических артефактов.

Была смоделирована виброграмма, содержащая помимо основного свипа колебание второй гармоники. В результате отделения свипа от гармоники получены две виброграммы, которые здесь не показаны ввиду малой информативности таких иллюстраций. На рисунке 5 представлены фрагменты построенных по ним коррелограмм. На коррелограмме второй гармоники (рис. 5, б) наблюдается интенсивный протяженный артефакт, похожий на монохромный сигнал. Его видимая частота соответствует верхней частоте возбуждения основного свипа.

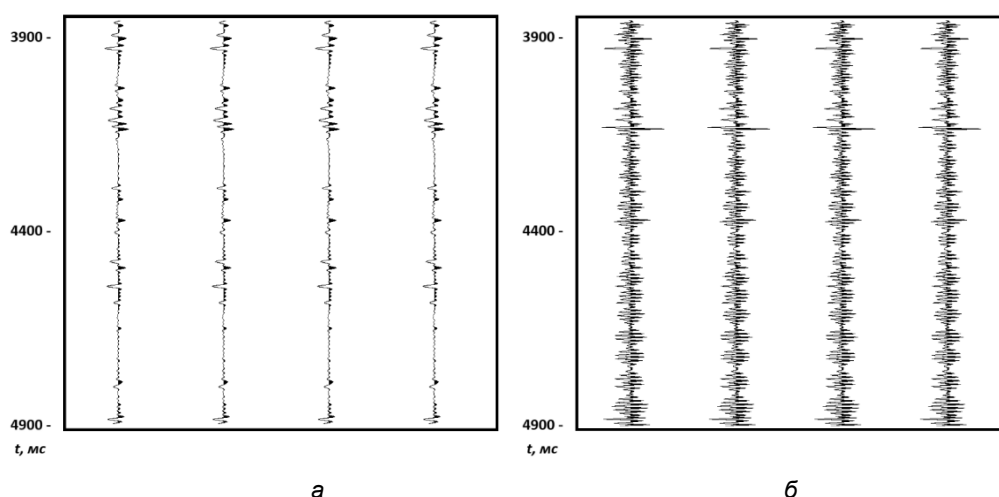


Рис. 5. Фрагменты коррелограмм, полученных после отделения основного свипа от второй гармоники по модельным виброграммам; а – основной сигнал; б – вторая гармоника.

В результате анализа алгоритма и интерпретации волновых полей мы пришли к выводу, что помеха возникает при вычитании полученной виброграммы первой гармоники из исходной виброграммы, когда производится построение виброграммы, связанной только со старшими гармониками. Прогнозирование поля гармоник производится путем корреляции виброграммы с сигналом первой гармоники с последующей сверткой результата с сигналом старшей гармоники. Это означает, что гармоника прогнозируется только в диапазоне частот основного свипа. При вычитании из исходной виброграммы, имеющей расширенный спектр, спрогнозированных компонент, связанных со старшими гармониками, данные вне диапазона частот основного свипа сохраняются в неизменном виде. Если такое волновое поле вычесть из исходной виброграммы, интересующая нас высокочастотная часть поля будет утрачена. Чтобы избежать этого применяется полосовая фильтрация, устраняющая на полученной

виброграмме основного свипа все частоты вне полосы его возбуждения. Полосовой фильтр, имеющий ограниченную крутизну склона частотной характеристики, неспособен полностью устранить энергию, связанную с основным свипом. Кроме того, тот факт, что вибрационный сигнал имеет АЧХ, целиком сосредоточенную в некотором диапазоне частот, как мы видели выше, не соответствует действительности. Поэтому часть его «утекает» и не пропадает после полосовой фильтрации. Этот остаток настолько интенсивен по сравнению со второй гармоникой, что он существенно искажает ее.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ЕДИНОЙ КОРРЕЛОГРАММЫ (РАЗРЕЗА)

В связи с указанными трудностями нами было принято решение отказаться от описанной выше методики и производить построение трасс в неперекрывающихся частотных диапазонах. Действительно, алгоритм ОРФ использует только линейные преобразования. Это означает, что как сама первая гармоника, так и все связанные с ней артефакты сконцентрированы в пределах частотного диапазона (ω_1, ω_2) . Такое свойство открывает возможность надежно избавиться от артефактов при помощи частотной селекции. Указанный диапазон устраняется из виброграммы второй гармоники, полученной на шаге 4, при помощи полосовой фильтрации. Так как полосовые фильтры не могут обеспечить идеальной частотной селекции (хотя бы в силу ограниченности крутизны склонов их АЧХ), а также ввиду того, что гипотеза об ограниченности частотной характеристики вибрационного сигнала связана с асимптотическими ограничениями, целесообразно выбирать диапазон для удаления первой гармоники из трассы второй гармоники с запасом, устраняя частоты ниже $\omega_2 + \varepsilon$, где ε – параметр, выбираемый в зависимости от качества полосового фильтра. Аналогичные рассуждения применяем для гармоник старших порядков.

Рисунок 6 иллюстрирует необходимость обеспечения зазора (это особенно заметно на больших временах) между частотными диапазонами построения трасс первой (рис. 6, а) и второй (рис. 6, б) гармоник. Их амплитудные спектры представлены на рис. 6, д и е соответственно. К коррелограммам применялся цифровой полосовой фильтр с весовой функцией Хемминга [Хемминг, 1980], длина фильтра 501 отсчет. Если суммировать коррелограммы, не обеспечив ε -зазора частотных характеристик, получим результат, показанный на рис. 6, в. Его спектральная характеристика (рис. 6, ж) содержит выброс на частоте 100 Гц. Этот эффект мы уже наблюдали на рис. 2–4, когда основная энергия артефактов концентрировалась в окрестности частот среза АЧХ ЛЧМ сигнала. Именно поэтому надо выбирать полосу частот пропускания полосового фильтра уже, чем предписывается по теории.

Таким образом, описанная последовательность вычислений приводит к получению двух сейсмических трасс в неперекрывающихся частотных диапазонах. Для их объединения следует заполнить интервал $(\omega_2 - \varepsilon, \omega_2 + \varepsilon)$, в котором энергия сигнала стремится к нулю. Известно множество алгоритмов, позволяющих решить эту задачу, они сводятся к методике аналитического продолжения спектра [Василенко, Тараторин, 1986]. Мы, однако, предпочли методику, которая в полной мере учитывает специфику сейсмической трассы как последовательности импульсов и которая основана на авторегрессионной (АР) модели [Oldenburg et al., 1983; Walker, Ulrych, 1983; Шнеерсон и др., 1990]. Ее суть заключается в следующем. Пусть последовательность коэффициентов отражения $r(t)$ состоит из N импульсов с произвольными неизвестными амплитудами и временами вступления. Можно показать [Марпл, 1990], что ее спектр описывается моделью комплексной авторегрессии-скользящего среднего

(АРСС) порядка N, N : $APCC(N, N)$. Требуется оценить параметры модели, иначе говоря, произвести ее идентификацию. Для упрощения вычислений модель АРСС аппроксимируется моделью АР более высокого порядка. Известно, что экстраполяция спектра вне сигнального диапазона на протяженный частотный интервал – неустойчивая задача. В нашем случае, однако, мы заполняем лишь узкий интервал. К тому же, такое заполнение производится как со стороны низких, так и высоких частот, что делает нашу задачу аналогичной задаче интерполяции, следовательно, наша процедура устойчива.

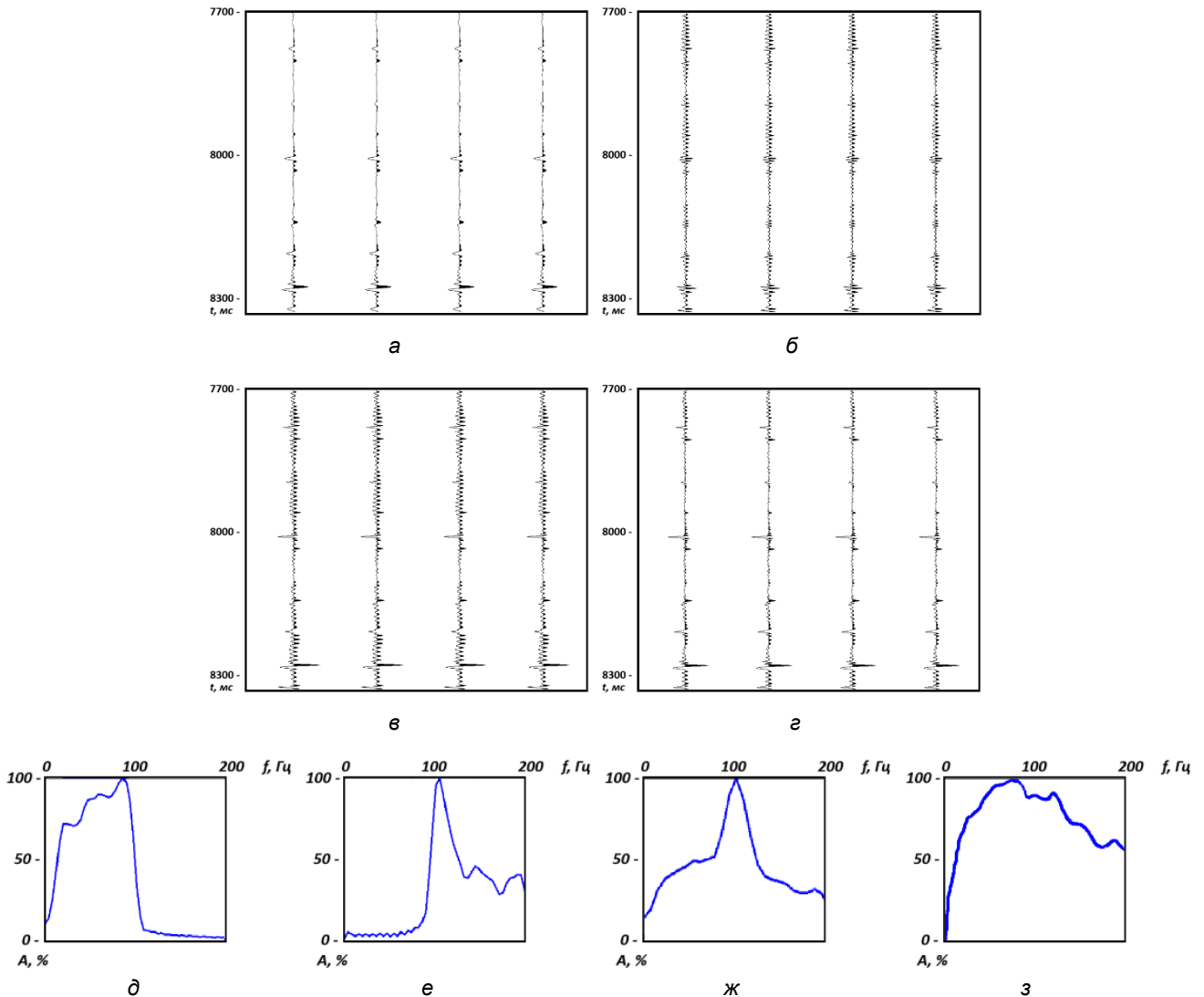


Рис. 6. Суммирование коррелограмм, полученных в неперекрывающихся частотных диапазонах; а – фрагмент коррелограммы первой гармоники в диапазоне частот (ω_1, ω_2) ; б – фрагмент коррелограммы второй гармоники в диапазоне частот $(\omega_2, 2\omega_2)$; в – сумма волновых полей на рис. 6, а и б; г – трасса, полученная при помощи АР спектральной экстраполяции; д – амплитудный спектр фрагмента на рис. 6, а; е – амплитудный спектр фрагмента на рис. 6, б; ж – амплитудный спектр фрагмента на рис. 6, в; з – амплитудный спектр фрагмента на рис. 6, г.

Обозначим через $S(k)$ k -й отсчет комплексной дискретной спектральной характеристики коррелограммы (неважно первой, второй или любой другой гармоники), $\omega \in (-\pi, \pi)$, $\omega = k\Delta\omega$, $\Delta\omega$ – шаг дискретизации спектра. Пусть коррелограмма задана в некотором диапазоне частот $\omega \in (\omega_l, \omega_h)$, и этому диапазону соответствуют отсчеты с номерами $k \in (k_l, k_h)$, где $k_l = \omega_l/\Delta\omega$, $k_h = \omega_h/\Delta\omega$. Тогда формируется настраиваемая модель [Льюнг, 1991] в виде оператора прогнозирования

$$\tilde{S}(k) = \sum_{i=1}^L d(i)S(k-i), \quad (4)$$

где $\tilde{S}(k)$ – прогнозное значение k -го отсчета спектра, $d(i)$ – комплексные коэффициенты предсказания. Так как истинная величина $S(k)$ известна, также известна и ошибка прогнозирования $\xi(k) = S(k) - \tilde{S}(k)$. Для получения оценки оптимальных коэффициентов предсказания формируется функционал $J(d)$ в виде суммарной энергии ошибок прогнозирования для всего частотного диапазона:

$$J(d) = \sum_{k=k_l}^{k_h} \xi(k)\bar{\xi}(k).$$

Продифференцировав функционал по искомым параметрам и приравняв производную к нулю, приходим к системе комплексных линейных уравнений, решив которую получим оптимальный оператор прогнозирования и затем используем его для предсказания отсчетов спектра в диапазоне $k > k_h$, т. е. для его экстраполяции. Так обрабатывается спектральная характеристика коррелограммы первой гармоники, где $k_l = \omega_1/\Delta\omega$, $k_h = (\omega_2 - \varepsilon)/\Delta\omega$, а спектр продолжается на диапазон индексов $k = k_h + 1, \dots, k_\varepsilon$, где $k_\varepsilon = (\omega_2 + \varepsilon)/\Delta\omega$.

Для второй гармоники, в коррелограмме которой после полосовой фильтрации отсутствуют низкие частоты, следует вместо предсказания (4) использовать ретроспекцию:

$$\tilde{S}(k) = \sum_{i=1}^L d(i)S(k+i),$$

предсказывая спектральную характеристику в обратном направлении. Тогда посчитанный оптимальный оператор используется для вычисления отсчетов в том же частотном диапазоне $(\omega_2 - \varepsilon, \omega_2 + \varepsilon)$. Результат заполнения вырезанного спектрального интервала получается в виде весовой (веса определяются треугольной убывающей функцией, сумма весов для каждого отсчета k равна единице) суммы отсчетов, полученных при помощи прогнозирования и ретроспекции.

Так как алгоритм предназначен для продолжения спектра импульсной трассы вне заданного диапазона частот, то, во-первых, требуется предварительно устранить влияние сейсмического импульса в этом диапазоне, что достигается средствами деконволюции. Во-вторых, следует привести спектральную характеристику трассы второй гармоники по уровню средней энергии к трассе первой гармоники. Такая нормировка нужна для того, чтобы при суммировании трасс гармоник была получена единая частотная характеристика импульсной трассы в расширенном диапазоне частот, но имеющая провал в окрестности частоты ω_2 . Так как импульсная трасса является реализацией белого шума, то она имеет равномерный энергетический спектр. Это свойство объясняет используемое нами выравнивание энергетических характеристик именно по уровню средней энергии спектра. Детали методики авторегрессионного продолжения спектра, а также рекомендации по выбору параметров процедуры приводятся в цитированных выше источниках. Разрез, построенный по описанной методике, в дальнейшем для краткости будем называть AP-суммой.

Показанное на рис. 6, z волновое поле является AP-суммой. Очевидно, что трассы первой и второй гармоник успешно объединены в одну трассу, характеризующую расширенным спектром и повышенной разрешенностью, а ее амплитудный спектр (рис. 6, z) не содержит выбросов.

ПРИМЕРЫ

В качестве примеров разделения гармоник и их последующего AP-суммирования рассмотрим два набора данных с разных площадей. Первый набор – коррелограммы, второй – разрезы.

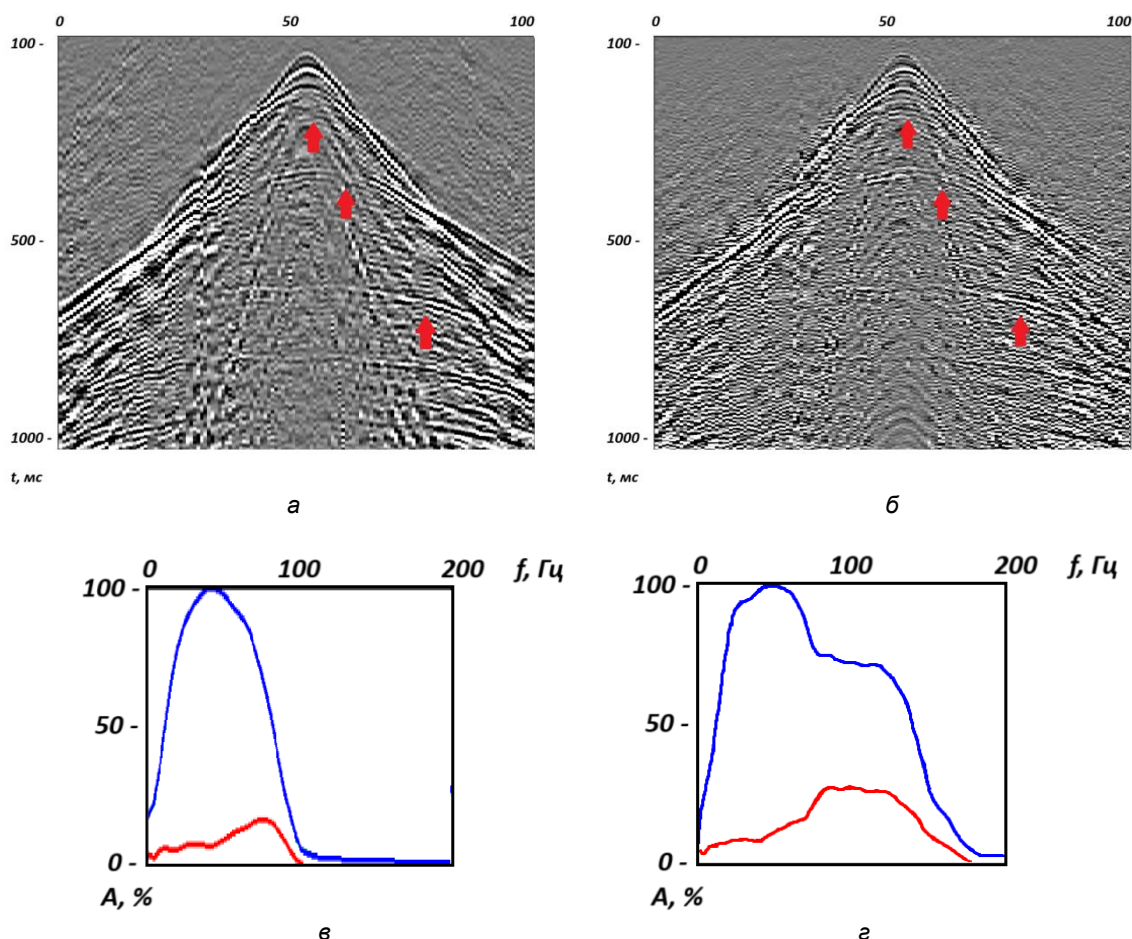


Рис. 7. Повышение разрешенности коррелограммы за счет привлечения второй гармоники. На графиках спектральных характеристик: синяя кривая – оценка спектра сигнала, красная кривая – оценка спектра шума; a – коррелограмма первой гармоники, по горизонтальной оси отложены порядковые номера трасс; b – AP-коррелограмма; v – амплитудный спектр коррелограммы на рис. 7, a ; z – амплитудный спектр коррелограммы на рис. 7, b . Частота Найквиста равна 500 Гц, а спектр изображается до 200 Гц. Области улучшений на сейсмограммах показаны красными стрелками.

На рисунке 7, a показана посчитанная при помощи ОРФ коррелограмма первой гармоники, а на рис. 7, v – ее амплитудный спектр. После разделения гармоник к сейсмограммам были применены коррекция геометрического расхождения и обратная фильтрация. Полученная AP-сумма коррелограмм представлена на рис. 7, b , а ее амплитудный спектр – на рис. 7, z . Если верхняя частота коррелограммы основного свипа примерно равна 90 Гц, то за счет привлечения второй гармоники удалось расширить спектр до 180 Гц. Однако вместе с расширением спектра сигнала наблюдается эффект увеличения уровня помех, особенно на высоких частотах. Оценки спектров сигнала и помехи на рис. 7, v и z получены по алгоритму [Никитин, 1979]. На высоких частотах заметно ухудшение отношения сигнал/шум. Важно

отметить, что здесь спектр сигнала расширен по всей длине сейсмической трассы, и, как следствие, повышается разрешенность всей волновой картины. Это свидетельствует о том, что в исходных виброграммах вторая гармоника характеризуется достаточно высокой интенсивностью.

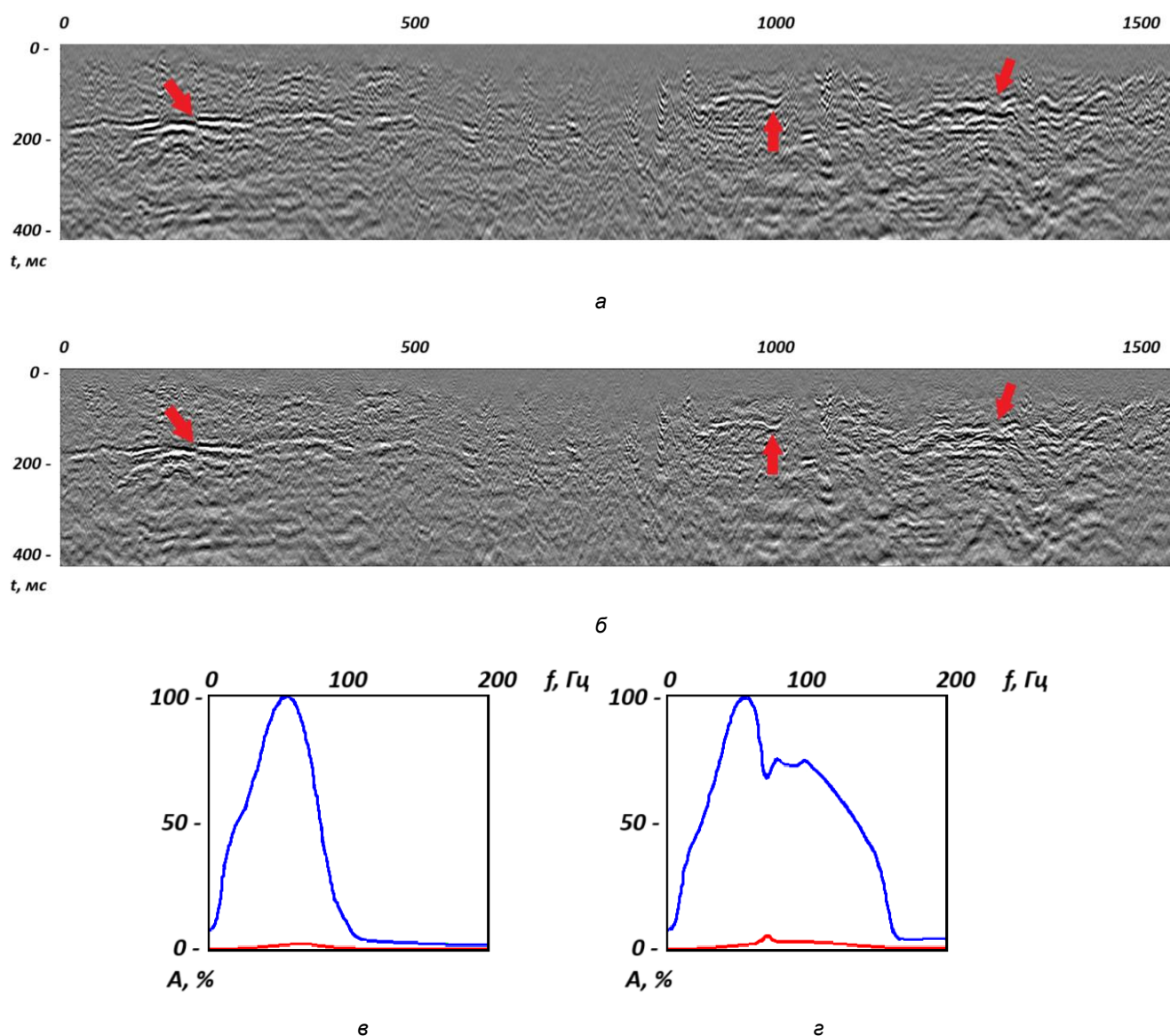


Рис. 8. Временные разрезы ОСТ и их амплитудные спектры. Частота Найквиста равна 250 Гц, а спектр изображается до 200 Гц. а – разрез первой гармоники, по горизонтальной оси отложены условные номера пикетов ОСТ; б – АР-сумма первой и второй гармоник; в – амплитудный спектр разреза на рис. 8, а; з – амплитудный спектр разреза на рис. 8, б. Области улучшений на разрезах показаны красными стрелками. Усл. обозн. см. на рис. 7.

Также укажем на следующую особенность процедур обработки, связанных с корреляцией и декорреляцией. Чтобы избежать краевого эффекта, исходные данные должны быть дополнены нулевыми отсчетами на величину, равную длине свип-сигнала, в область отрицательных времен. Так как свипы имеют большую протяженность, пренебрежение краевыми эффектами всегда значительно искажает волновую картину и влияет на весь интервал записи. При несоблюдении этого условия на коррелограмме будут присутствовать дополнительные артефакты.

Иная ситуация складывается при анализе второго полевого материала, обработанного нами до уровня разреза общей средней точки (ОСТ), где расширение спектра сигнала заметно только в ВЧР, что

является следствием малого уровня гармоник. По-видимому, ВЧР характеризуется повышенными частотно-зависимыми поглощающими свойствами, что существенно ослабляет высокочастотную компоненту волнового поля. На рисунке 8 сравниваются временной разрез первой гармоники и AP-сумма разрезов первой и второй гармоник. Слип задан в полосе частот 5–90 Гц. Первый разрез имеет низкое разрешение, что проявляется в размытости деталей и менее четких границах. AP-сумма обладает более высоким разрешением, благодаря чему все элементы, складки и разломы выглядят четко и более детализированно. Это особенно заметно на тех участках, где на разрезе первой гармоники видно лишь одно отражение, а на AP-сумме выявляется сложная слоистая структура со складками и разломами. Амплитудные спектры разрезов показаны на рис. 8, в и г. Заметно значительное расширение спектра AP-суммы по сравнению с разрезом первой гармоники.

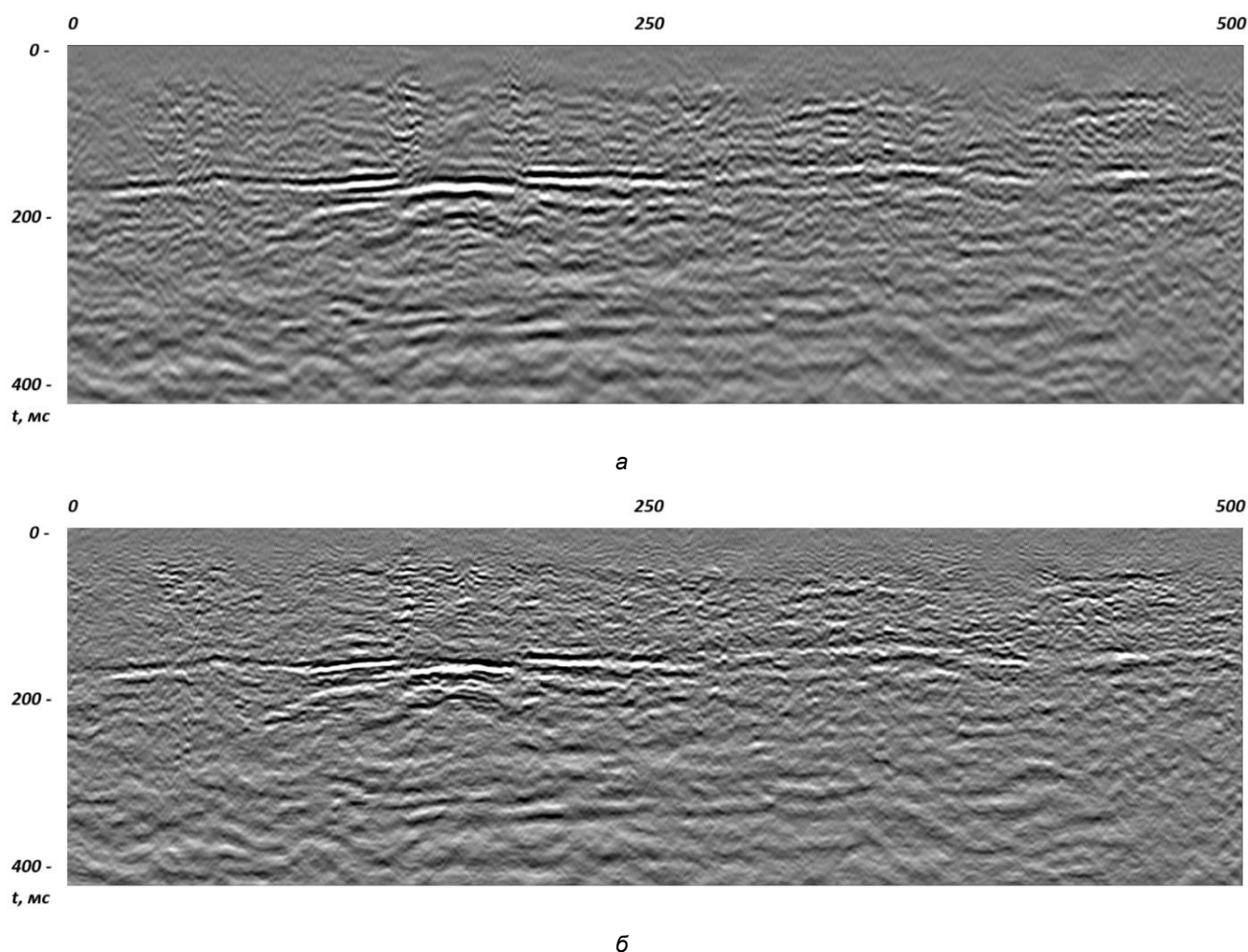


Рис. 9. Фрагмент разреза: а – первая гармоника, по горизонтальной оси отложены условные номера пикетов ОСТ; б – AP сумма первой и второй гармоник.

При увеличении изображения выявляются детали волновой картины. На рисунке 9 показан увеличенный фрагмент временных разрезов первой гармоники и AP-суммы. AP-сумма сохраняет четкость и ясность даже при масштабировании, а разрез по первой гармонике становится размытым и теряет качество.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Если решается задача обработки гармоник виброрейсмического метода, невозможно выровнять амплитуды сейсмической записи при помощи традиционной коррекции геометрического расхождения. Поэтому обработке подвергаются виброграммы и коррелограммы без коррекции амплитуд. Это означает, что любые артефакты, в том числе неточности корреляции–декорреляции, связанные с сильными сигналами в верхней части, накладываются на слабые сигналы в нижней части. При традиционной корреляционной обработке виброграмм (если речь не идет о данных slip-sweep) шумы, связанные с взаимной корреляцией гармоник, предшествуют сфокусированному сигналу, следовательно, слабые артефакты слабых сигналов накладываются на сильные сигналы. Именно по этой причине они оказываются малозаметными, их можно игнорировать и применять к коррелограмме коррекцию геометрического расхождения. В отличие от традиционной методики обработки, задачи, связанные с выделением гармоник, требуют последовательного применения процедур корреляции и декорреляции. Неточности, связанные с необратимостью корреляции, проявляются в виде артефактов, при этом они накладываются на слабые полезные волны в нижней части трассы, предварительно увеличить амплитуду которых при помощи коррекции расхождения невозможно. С аналогичными проблемами приходится сталкиваться и при работе с виброграммами, хотя их обработка не требует последовательного использования корреляции и декорреляции.

2. Мы сосредоточились на изучении первой и второй гармоник, игнорируя гармоники старших порядков. Причина этого заключается в том, что, если построить трассу второй гармоники в частотном диапазоне $(\omega_2 + \varepsilon, 2\omega_2)$, то использование гармоник старших порядков не приведет к получению дополнительной информации для этого диапазона. В то же время, расширить спектр импульса до частоты $2\omega_2$ обычно бывает достаточным. На высоких частотах помеха всегда доминирует над сигналом, поэтому привлечение более высоких частот смысла не имеет. Разумеется, при обработке чрезвычайно полезными оказываются процедуры подавления помех, они позволяют более уверенно усиливать энергию высокочастотных компонент сигнала.

3. Применение алгоритма AP-интерполяции спектра требует предварительного использования деконволюции. Обычно эта процедура входит в граф обработки, поэтому проблем не возникает. Если по каким-либо причинам ее применять не следует, можно запомнить операторы деконволюции, которые были применены, а после построения окончательной объединенной трассы вывести их из нее средствами обратной фильтрации.

4. Может возникнуть вопрос, почему в качестве граничной частоты построения коррелограмм или разрезов первой и второй гармоник использована именно ω_2 , а не иная частота, для которой погрешность корреляции–декорреляции минимальна. В самом деле, как мы видели на рис. 4, в, ω_2 неблагоприятна ввиду большой погрешности корреляции–декорреляции на этой частоте. Казалось бы, в роли граничной частоты может выступить любая ω в пределах диапазона $(2\omega_1, \omega_2)$ и отстоящая на значительное удаление от ω_2 . Затем разрезы или коррелограммы по первой и второй гармоникам объединяются с учетом перекрытия по частотам.

На самом деле такой подход не позволит избавиться от артефакта. Методика вычисления виброграммы второй гармоники предполагает вычитание из исходной виброграммы сигнала, связанного

с первой гармоникой (шаг 4). Последний, в свою очередь, уже искажен эффектами, связанными с неточностью корреляции–декорреляции в окрестности частоты ω_2 . Поэтому после вычитания искаженного сигнала из исходной виброграммы вторая гармоника будет содержать эти артефакты, а результат станет похожим на тот, что показан на рис. 6, в. Именно по этой причине ω_2 выбрана в качестве граничной частоты для получения коррелограмм первой и второй гармоник, а в ее окрестности спектры сейсмических трасс не вычисляются по описанной 5-шаговой методике, а восстанавливаются в результате AP-интерполяции.

5. Потенциальная неустойчивость алгоритма связана с элементами обратной фильтрации, которые в нем используются. В первую очередь это относится к выравниванию по среднему уровню энергии высокочастотной и низкочастотной компонент трассы. Выше верхней частоты возбуждения основного свипа находится только, вообще говоря, энергия гармоник и помех. Если по тем или иным причинам данные характеризуются низким уровнем гармоник, то на этих частотах будет доминировать шум. Выравнивание амплитудного спектра в таких условиях приведет к уменьшению отношения сигнал/шум, как это происходит при применении алгоритма деконволюции сжатия сигнала, который решает эту же задачу расширения спектра в заданной полосе частот [Денисов, 2025]. Поэтому после расширения спектра можно измерить отношение сигнал/шум на каждой частоте, после чего применить оптимальный фильтр выделения сигнала на фоне шума [Козлов и др., 1973]. Также полезным оказывается применение многоканальных процедур шумоподавления, например, f -х деконволюции [Боганик, Гурвич, 2006].

6. Нетрудно понять, что описанный алгоритм теряет энергию гармоник в перекрывающихся частотных диапазонах. К примеру, для $\omega \in (2\omega_1, \omega_2)$ можно было бы использовать не только свип основного тона, но и подсуммировать к нему коррелограмму или разрез второй гармоники. Мы, однако, так не поступаем. И дело не только в артефактах, изучению которых мы посвятили значительную часть этой работы, а в специфике самого алгоритма ОРФ. При выводе алгоритма не учитывалось влияние аддитивной помехи. Как следствие, в перекрывающихся частотных диапазонах получаемые с его помощью результаты совпадают для гармоник различных порядков. С позиции критерия, использованного при разработке алгоритма, можно сказать, что если нет помехи, то и нет смысла накапливать результаты обработки. В работе [Денисов, 2024] показано, что если в явном виде ввести в критерий оптимальности информацию о помехах, то алгоритм выглядит иначе и начинает стремиться максимизировать отношение сигнал/шум. Тогда наряду с первой гармоникой для построения итоговой коррелограммы в диапазоне $(2\omega_1, \omega_2)$, а также во всех других перекрывающихся диапазонах, он использует целиком энергию сигнала, включая гармоники всех порядков.

7. Проблема, которую нам необходимо было преодолеть в процессе разработки алгоритма, связана с осцилляцией Гиббса (рис. 3 и др.). Для ослабления такого эффекта обычно успешно используют гладкие функции усечения временной характеристики оператора. Это приводит к тому, что края АЧХ сглаживаются, а уровень осцилляций уменьшается. Специфика решаемой здесь задачи заключается в том, что после применения к сигналу такой фильтрации на следующих этапах обработки потребуется восстановить исходный сигнал: перейдя от виброграммы к коррелограмме и отделив в ней сигнал от гармоник, нужно будет восстановить виброграмму основного свипа. Затем выделенная таким способом виброграмма вычитается из исходной полевой виброграммы. Следовательно, использование фильтра со

сглаженной АЧХ потребует применения деконволюции для его компенсации. Даже в пределах сигнального диапазона частот сглаженная АЧХ имеет области сильного затухания, где она стремится к нулю. Поэтому оператор обратной фильтрации на этих частотах должен иметь неограниченно возрастающую АЧХ, что приводит к неустойчивости. Понятно, что любая погрешность обратной фильтрации крайне негативно скажется на результате восстановления виброграммы из коррелограммы, так как энергия гармоник значительно ниже энергии основного свипа. После вычитания, на посчитанной виброграмме гармоник сохраняются остатки первой гармоники, что может значительно исказить ее.

8. Проблемы, преодолению которых посвящено настоящее исследование, связаны исключительно со стремлением использовать информацию, содержащуюся в гармониках. Затруднений не возникает, если гармоники рассматриваются как помеха, и алгоритм ОРФ применяется только для их удаления, так как в таком случае нет необходимости последовательного применения процедур корреляции и декорреляции.

ВЫВОДЫ

Развивая алгоритм ОРФ, позволяющий использовать энергию гармоник, мы обнаружили, что его применение вызывает появление артефактов, наличие которых не следует из теоретических основ метода. В результате исследования их природы было установлено, что помехи обусловлены необратимостью процедуры корреляции. Ситуация усугубляется тем, что на трассе невозможно предварительно выровнять амплитуды сигналов, скомпенсировав эффект геометрического расхождения. В результате шумы корреляции–декорреляции, связанные с сильными сигналами в верхней части, накладываются на слабые сигналы в нижней части. Эта особенность обработки связана только с тем, что алгоритм пытается выделить гармоники из исходной виброграммы. При традиционной корреляционной обработке такие шумы тоже появляются, но они, как правило, малозаметны. (Впрочем, после коррекции геометрического расхождения по коррелограммам хорошо известен эффект разрастания уровня корреляционных шумов от сильных сигналов, когда этот шум интерферирует со слабыми сигналами на больших временах регистрации, и такая помеха не связана с гармониками, а обусловлена исключительно погрешностью самой корреляции.)

Наиболее надежным способом устранения помех оказалась частотная селекция. Артефакты, связанные, например, с первой гармоникой, сосредоточены в диапазоне частот основного свипа. Как следует из теоретических рассуждений, в перекрывающихся диапазонах результаты обработки для гармоник различного порядка совпадают. На практике, однако, когда мы сталкиваемся с артефактами корреляции–декорреляции, это свойство алгоритма нарушается. Поэтому было принято решение использовать энергию сигнала и гармоник только в неперекрывающихся частотных диапазонах. Более того, из-за интенсивных спектральных краевых эффектов оказалось целесообразно производить выделение частотных диапазонов с некоторым запасом. Тем самым спектральные характеристики трасс гармоник не могут сшиваться встык, и между ними образуются зазоры. Для восстановления энергии сигнала в пределах этих интервалов мы используем методику аналитического продолжения спектра, основанную на его АР экстраполяции. Эффективность предложенной методики использования гармоник для расширения спектра сигнала подтверждается результатами обработки модельных и полевых сейсмограмм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Баскаков С.И.** Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2000. 462 с.
- Боганик Г.Н., Гурвич И.И.** Сейсморазведка. Тверь: АИС, 2006. 744 с.
- Вакман Д.Е.** Сложные сигналы и принцип неопределенности в радиолокации. М.: Советское радио, 1965. 304 с.
- Василенко Г.И., Тараторин А.М.** Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 302 с.
- Гольдин С.В.** Линейные преобразования сейсмических сигналов. М.: Недра, 1974. 352 с.
- Гоноровский И.С.** Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио, 1977. 608 с.
- Денисов М.С.** О возможности увеличения отношения сигнал/шум за счет использования гармоник в невзрывной сейсморазведке // Геофизические технологии. 2024. № 4. С. 34–49. doi:10.18303/2619-1563-2024-4-34.
- Денисов М.С.** Какую задачу и как решает алгоритм предсказывающей деконволюции с единичным интервалом прогнозирования // Геофизические технологии. 2025. № 1. С. 23–42. doi:10.18303/2619-1563-2025-1-23.
- Денисов М.С., Шнеерсон М.Б.** Использование гармоник для расширения спектрального состава волн в вибрационной сейсморазведке. Часть 2 // Технологии сейсморазведки. № 3. 2017. С. 36–54. doi:10.18303/1813-4254-2017-3-36-54. EDN:XZJATR.
- Денисов М.С., Егоров А.А.** Построение модели вибросейсмического сигнала, осложненного гармониками // Геофизические технологии. 2019а. № 1. С. 72–83. doi:10.18303/2619-1563-2019-1-72.
- Денисов М.С., Егоров А.А.** Оптимизационная рекурсивная фильтрация как способ подавления гармоник в методе Вибросейс // Геофизические технологии. 2019б. № 2. С. 23–53. doi:10.18303/2619-1563-2019-2-23.
- Денисов М.С., Зыков А.А.** Моделирование гармоник амплитудно и нелинейно частотно-модулированных сигналов // Геофизические технологии. 2023а. № 3. С. 58–68. doi:10.18303/2619-1563-2023-3-58.
- Денисов М.С., Зыков А.А.** Разделение сигнала и гармоник в невзрывной сейсморазведке с амплитудно и нелинейно частотно-модулированными сигналами // Геофизические технологии. 2023б. № 3. С. 69–84. doi:10.18303/2619-1563-2023-3-69.
- Козлов Е.А., Гогоненков Г.Н., Лернер Б.Л., Мушин И.А., Мешбей В.И., Климович Н.И., Янковский И.И.** Цифровая обработка сейсмических данных. М.: Недра, 1973. 309 с.
- Льюнг Л.** Идентификация систем: Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.
- Марпл–мл. С.Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
- Никитин А.А.** Статистические методы выделения геофизических аномалий. М.: Недра, 1979. 280 с.
- Хемминг Р.В.** Цифровые фильтры. М.: Советское радио, 1980. 224 с.
- Шнеерсон М.Б., Потапов О.А., Гродзенский В.А., Иноземцев А.Н., Лев И.С., Жуков А.П.** Вибрационная сейсморазведка. М.: Недра, 1990. 240 с.
- Denisov M.S., Egorov A.A., Shneerson M.B.** Optimization-based recursive filtering for separation of signal from harmonics in Vibroseis // Geophysical Prospecting. 2021. Vol. 69 (4). P. 779–798. doi:10.1111/1365-2478.13084.
- Oldenburg D.W., Scheuer T., Levy S.** Recovery of the acoustic impedance from reflection seismograms // Geophysics. 1983. Vol. 48 (10). P. 1318–1337. doi:10.1190/1.1441413.
- Walker C., Ulrych T.J.** Autoregressive recovery of the acoustic impedance // Geophysics. 1983. Vol. 48 (10). P. 1338–1350. doi:10.1190/1.1441414.

REFERENCES

- Baskakov S.I.** Radio circuits and signals (In Russ.). Higher School, Moscow, 2000. 462 p.
- Boganik G.N., Gurvich I.I.** Seismic Exploration (In Russ.). AIS, Tver, 2006. 744 p.
- Denisov M.S.** On the possibility of increasing the signal-to-noise ratio by using the harmonics in non-explosive seismic exploration // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 4. P. 34–49. (In Russ.). doi: 10.18303/2619-1563-2024-4-34.
- Denisov M.S.** What problem and how does the spiking deconvolution algorithm solve // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 1. P. 23–42. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-1-23.
- Denisov M.S., Shneerson M.B.** Utilization of harmonics to broaden the bandwidth in vibroseismic. Part 2. // Seismic technologies. 2017. No. 3. P. 36–54. (In Russ.). doi:10.18303/1813-4254-2017-3-36-54.
- Denisov M.S., Egorov A.A.** Constructing a model of vibroseis signal complicated by harmonics // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2019a. No. 1. P. 72–83. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2019-1-72.
- Denisov M.S., Egorov A.A.** Optimization-based recursive filtering for Vibroseis harmonic noise elimination // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2019b. No. 2. P. 23–53. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2019-2-23.
- Denisov M.S., Zykov A.A.** Modeling of harmonics of amplitude and nonlinear frequency-modulated signals // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2023a. No. 3. P. 58–68. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2023-3-58.
- Denisov M.S., Zykov A.A.** Separation of signal and harmonics in non-explosive seismic prospecting with amplitude and nonlinear frequency-modulated signals // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2023b. No. 3. P. 69–84. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2023-3-69.
- Denisov M.S., Egorov A.A., Shneerson M.B.** Optimization-based recursive filtering for separation of signal from harmonics in Vibroseis // Geophysical Prospecting. 2021. Vol. 69 (4). P. 779–798. doi:10.1111/1365-2478.13084.
- Goldin S.V.** Linear transformations of seismic signals (In Russ.). Nedra, Moscow, 1974. 352 p.
- Gonorovsky I.S.** Radio circuits and signals. Mir, Moscow, 1981. 640 p.
- Hamming R.W.** Digital filters. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1977. 226 p.
- Kozlov E.A., Gogonenkov G.N., Lerner B.L., Mushin I.A., Meshbey V.I., Klimovich N.I., Yankovkij I.I.** Digital processing of seismic data (In Russ.). Nedra, Moscow, 1973. 309 p.
- Ljung L.** System identification: Theory for the user. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987. 384 p
- Marple S.L., Jr.** Digital spectral analysis with applications. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987. 495 p.
- Nikitin A.A.** Statistical methods for detecting geophysical anomalies (In Russ.). Nedra, Moscow, 1979. 280 p.
- Oldenburg D.W., Scheuer T., Levy S.** Recovery of the acoustic impedance from reflection seismograms // Geophysics. 1983. Vol. 48 (10). P. 1318–1337. doi:10.1190/1.1441413.
- Shneerson M.B., Potapov O.A., Grodzensky V.A., Inozemtsev A.N., Lev I.S., Zhukov A.P.** Vibration seismic exploration (In Russ.). Nedra, Moscow, 1990. 240 p.
- Vakman D.E.** Complex signals and the uncertainty principle in radiolocation (In Russ.). Soviet Radio, Moscow, 1965. 304 p.
- Vasilenko G.I., Taratorin A.M.** Reconstruction of images (In Russ.). Radio and communication, Moscow, 1986. 302 p.
- Walker C., Ulrych T.J.** Autoregressive recovery of the acoustic impedance // Geophysics. 1983. Vol. 48 (10). P. 1338–1350. doi:10.1190/1.1441414.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ДЕНИСОВ Михаил Сергеевич – доктор физико-математических наук, директор по науке ООО «ГЕОЛАБ». Основные научные интересы: разработка алгоритмов обработки геофизических сигналов.

ЗЫКОВ Андрей Александрович – геофизик ООО «ГЕОЛАБ». Основные научные интересы: обработка данных сейсморазведки, инженерная геофизика.

*Статья поступила в редакцию 27 августа 2025 г.,
одобрена после рецензирования 13 октября 2025 г.,
принята к публикации 15 октября 2025 г.*