



РАЗДЕЛЕНИЕ СИГНАЛА И ГАРМОНИК В НЕВЗРЫВНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ С АМПЛИТУДНО И НЕЛИНЕЙНО ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫМИ СИГНАЛАМИ

М.С. Денисов, А.А. Зыков

ООО «ГЕОЛАБ», 119071, Москва, ул. Орджоникидзе, 12/4, Россия,

e-mail: denisovms@gmail.com

При возбуждении колебаний в вибрационной сейсморазведке наряду с основным сигналом порождаются гармоники, которые проходят в глубь среды и, как и основной сигнал, взаимодействуют с целевыми границами. Гармоники характеризуются более широким, чем у основного сигнала, частотным диапазоном, поэтому они могут быть использованы для повышения разрешенности сейсмической записи. Для этого следует предварительно отделить запись, связанную с сигналом, от записей, связанных с гармониками. Эту задачу успешно решает предложенный ранее алгоритм оптимизационной рекурсивной фильтрации, который, однако, был разработан только для линейно частотно-модулированных сигналов. В работе алгоритм обобщен на случай амплитудной модуляции и нелинейной частотной модуляции. Показаны примеры использования методики для повышения разрешенности реальных вибросейсмических волновых полей.

Вибросейс, гармоники, спектр импульса, модуляция

SEPARATION OF SIGNAL AND HARMONICS IN NON-EXPLOSIVE SEISMIC PROSPECTING WITH AMPLITUDE AND NONLINEAR FREQUENCY-MODULATED SIGNALS

M.S. Denisov, A.A. Zykov

GEOLAB Ltd, Ordzhonikidze Str., 12/4, Moscow, 119071, Russia,

e-mail: denisovms@gmail.com

When vibroseis oscillations are excited, along with the main signal, harmonics are generated. They travel into the Earth and, like the main signal, interact with the target reflectors. Harmonics have a wider than that of the main signal frequency band, so they can be used to increase the resolution of the seismic data. To do this, the signal-related data should be separated from the harmonic-related data. This problem can be successfully solved by the previously proposed optimization recursive filtering algorithm, which, however, was developed only for linearly frequency-modulated signals. In this work, the algorithm is generalized to the case of amplitude modulation and nonlinear frequency modulation. Examples of application of the technique to increase the resolution of real vibroseis data are given.

Vibroseis, harmonics, wavelet spectrum, modulation

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известной проблемой вибросейсмического метода дистанционного зондирования земной коры является искажение сигнала за счет появления гармоник [Ведерников и др., 2001]. Ранее, при участии одного из соавторов настоящего исследования, была построена модель реального искаженного сигнала [Денисов, Егоров, 2019а], и на ее основании был разработан алгоритм отделения сигнала от гармоник, а также разделения гармоник различного порядка [Денисов, Егоров, 2019б]. Алгоритм получил название

оптимизационной рекурсивной фильтрации (ОРФ). Однако, как в модели, так и в алгоритме предполагалось, что вибрационная установка возбуждает линейно частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал, и это накладывает известные ограничения.

С целью преодоления ограничений модель искаженного гармониками сигнала была обобщена на сигналы с одновременной амплитудной и нелинейной частотной модуляцией (АНЛЧМ) [Денисов, Зыков, 2023], частным случаем которых оказываются нелинейно частотно-модулированные сигналы (НЛЧМ). Естественным продолжением исследований является обобщение алгоритма ОРФ на такие сигналы, и именно эта задача здесь будет решена.

Наши предыдущие работы [Денисов, Егоров, 2019б; Denisov et al., 2021] содержат достаточно полные литературные обзоры, в которых охарактеризованы известные на тот момент алгоритмы. С тех пор появилось несколько новых публикаций как в русскоязычных, так и в англоязычных источниках, что позволяет нам расширить обзорную часть, не повторяя ее. В напечатанной в журнале «Геофизика» статье [Ягудин и др., 2022] изучается влияние гармонических искажений на волновые поля коррелограмм. Демонстрируется, что они очень малы на интервале полезной записи, т. е. после корреляции с основным свипом основная энергия корреляционных шумов, обусловленных гармониками, оказывается сосредоточенной в области выше первых вступлений, поэтому можно просто их игнорировать. Такие выводы вполне справедливы, если требуется обработать результаты наблюдений, полученные с использованием традиционной вибросейсмической методики. Если же применяются современные высокопроизводительные схемы «непрерывного возбуждения» с перекрывающимися записями от соседних источников (в том числе, slip-sweep), то в области выше первых вступлений будет находиться целевой интервал записи от предыдущего источника. Интенсивные корреляционные шумы наложатся на слабый сигнал (ослабленный за счет эффекта геометрического расхождения) в целевом интервале, тем самым замаскируют его, делая невозможным дальнейшее разделение волновых полей, связанных с разными источниками. Поэтому задача разделения сигнала и гармоник своей актуальности не теряет. Кроме того, целью наших работ является не просто устранение гармоник, а их использование для расширения спектра сигнала. Необходимо решить задачу не удаления гармоник, а отделения их от сигнала для дальнейшей обработки. Первые результаты использования гармоник были показаны нами в цитированной выше работе [Denisov et al., 2021], а ниже будут продемонстрированы новые результаты. Наконец, нужно отметить, что корреляционный шум формируется не в области выше первых вступлений, а в области выше каждого сигнала на трассе. Иначе говоря, он предшествует вступлению каждого импульса, сфокусированного вследствие корреляционного преобразования. Тем самым загрязненной оказывается вся коррелограмма, хотя, разумеется, наиболее интенсивная помеха связана с наиболее интенсивными сигналами, т. е. теми сигналами, которые претерпели отражение от границ раздела в верхней части разреза. Следовательно, очистить волновое поле мьютингом или простым обнулением области выше первых вступлений не получится.

В журнале «Geophysics» недавно напечатана статья [Liu et al., 2022] (являющаяся, в свою очередь, продолжением исследования [Wang et al., 2018]), в которой разработан алгоритм удаления гармоник по коррелограмме. В этой же статье приводится полный обзор зарубежной литературы, связанной с проблемой гармоник. Алгоритм удаления гармонических шумов основан на вейвлет-разложении трассы, а в качестве базисов используются два набора вейвлет-функций: для сфокусированного сигнала и для частотно-модулированного ЛЧМ сигнала. При подавлении помехи привлекается требование импульсности трассы. Алгоритм наследует известные проблемы, связанные с

неортогональными вейвлет-разложениями, в данном случае – с взаимной зависимостью базисных функций и, как следствие, неоднозначностью разложения. Кроме того, критическим оказывается вероятное отклонение сигнала от ЛЧМ структуры, т. е. невозможность работы с НЛЧМ и АНЛЧМ свипами. Понятно, что вейвлет-алгоритм не делает различия между гармониками и помехами иной природы. Следовательно, он может рассматриваться как еще один метод удаления помех любой природы, а не способ отделения сигнала от гармоник, и неприменим в задаче расширения спектра сигнала. Отметим также, что алгоритм, основанный на максимизации критерия импульсности, был нами ранее опробован (см. [Денисов, Егоров, 2019б]), однако его работоспособность в задаче подавления гармоник оказалась заведомо хуже метода ОРФ.

В статье [Gürel, 2021], также имеющей обширную обзорную часть, предлагается расширять спектр сигнала за счет комбинирования записей, полученных для двух различных свипов. Методика последовательного возбуждения двух свипов, отличающихся поворотом фазы на 180° , была предложена в начале 70-х годов прошлого века. На сумме соответствующих виброграмм подавляются все нечетные гармоники (включая и сигнал основного свипа), а четные удваиваются. Аналогично, на разности виброграмм подавляются четные гармоники, в то время как нечетные удваиваются. Предлагается использовать виброграмму нечетных гармоник для расширения спектра сигнала. С этой целью ее коррелируют с теоретическим свипом второй гармоники. Разделение свипа и гармоник не производится, а возникающие вследствие такого корреляционного преобразования артефакты, обусловленные взаимным влиянием гармоник, игнорируются.

Влияние эффекта нелинейных искажений на качество сигнала исследуется в работе [Tellier, Ollivrin, 2019], причем авторов интересует только низкочастотная часть спектра. Проблема подавления гармоник или их применения не обсуждается, а гармонические помехи, выделяемые на записи сигнала толкающего усилия (ground force), используются для контроля качества источника и излучаемого им вибросигнала.

Авторы исследования [Vedanti et al., 2021] справедливо отмечают, что запись реального толкающего усилия всегда осложнена гармониками. Поэтому, если использовать ее для корреляции, то на коррелограмме появятся гармоники. Отсюда делается вывод, что корреляцию виброграммы всегда следует производить с теоретическим свип-сигналом. Такая рекомендация игнорирует тот факт, что исходная виброграмма уже насыщена гармониками, и выбор того или иного свипа для корреляции их не устранил.

МОДЕЛЬ

Введенная ранее модель дискретного вибросейсмического сигнала $q(t)$ записывается в виде

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

где $q_m(t)$ – m -я гармоника, $a_m(t)$ – фильтры, M – общее число гармоник, t – индекс дискретного времени. Звездочка обозначает свертку. Функцию $q_1(t)$ (она же – теоретический или опорный свип) мы называем сигналом основного тона или 1-й гармоникой, при этом $a_1(t) \equiv \delta(t)$ – дискретная дельта

функция. Выражение (1) описывает разложение сигнала $q(t)$ по системе базисных функций, в роли которых выступают гармоники $q_m(t)$.

Все сигналы, с которыми мы имеем дело при решении практических задач, являются так называемыми квазигармоническими функциями, описываемыми как

$$q_1(t) = g(t) \sin(tf(t)), \quad (2)$$

где $f(t)$ – мгновенная частота, $g(t)$ – огибающая. Эффект амплитудной модуляции, задаваемый огибающей, может быть связан не только со сглаживанием сигнала на краях (так называемые конусы), но и с усилением тех или иных его частотных компонент – см., например, [Жуков и др., 2021]. Выражение (2) оказывается наиболее общим описанием АНЛЧМ сигналов, классу которых принадлежат как ЛЧМ, так и НЛЧМ функции. В нашей предыдущей работе [Денисов, Зыков, 2023] получен способ расчета гармоник для произвольного АНЛЧМ сигнала даже в ситуации, когда функции $g(t)$ и $f(t)$ неизвестны. Также показано, что общее выражение для гармоник АНЛЧМ сигналов принимает вид

$$q_m(t) = g(t) \sin(tm f(t)).$$

Алгоритм ОРФ представляет собой двухэтапную процедуру, на первом шаге которой реализуется прогнозирование коррелограмм, содержащих только гармоники. На втором этапе полученный набор коррелограмм адаптивно вычитается из исходной коррелограммы. Принципы, на которых базируется оценивание фильтров адаптации, требуют соблюдения определенных условий, к их числу относится малость эффективной длины этих фильтров [Денисов, Зыков, 2022]. Поэтому следует построить насколько возможно точный базис (1), чтобы на этап оценивания оптимальных фильтров алгоритма ОРФ отнести только неизбежные и заранее неизвестные погрешности, учет которых производят операторы $a_m(t)$.

АЛГОРИТМ ОТДЕЛЕНИЯ АНЛЧМ СИГНАЛА ОТ ГАРМОНИК

Здесь мы отчасти повторяем вывод алгоритма ОРФ, однако в процессе рассуждений избегаем тех упрощений, которые были связаны с ЛЧМ структурой сигнала. По этой причине опустим некоторые детали, с которыми можно более подробно ознакомиться в цитированном выше источнике [Денисов, Егоров, 20196].

Для описания исходной виброграммы $v(t)$ используем традиционную статистическую одномерную 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 $q(t)$ эффектов при прохождении им верхней части разреза (ВЧР), когда преимущественное затухание претерпевают высокочастотные компоненты. Относительно $p(t)$ естественно предположить,

что это финитный каузальный оператор малой длины, который близок к минимально-фазовому оператору или является таковым. Считаем, что $r(t)$ является реализацией случайного процесса типа белого шума.

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 с 1-й гармоникой. Подставив (1) и (2) в (3), приходим к

$$z_1(t) = r(t) * p(t) * \left(c_{11}(t) + \sum_{m=2}^M a_m(t) * c_{m1}(t) \right), \quad (4)$$

где введены обозначения $c_{m1}(t)$ – функция взаимной корреляции (ФВК), определенная для детерминированных сигналов $q_1(t)$ и $q_m(t)$:

$$c_{m1}(t) = q_m(t) * q_1(-t),$$

а $c_{11}(t)$ – функция автокорреляции (АКФ), определенная для детерминированного сигнала $q_1(t)$:

$$c_{11}(t) = q_1(t) * q_1(-t).$$

Идеальной коррелограммой, очищенной от гармоник, является

$$z_1^{(id)}(t) = r(t) * p(t) * c_{11}(t). \quad (5)$$

Во введенном условном обозначении использован верхний индекс id , т. е. *ideal*. Частотными аналогами выражений (4) и (5) соответственно являются

$$Z_1(\omega) = R(\omega)P(\omega) \left(C_{11}(\omega) + \sum_{m=2}^M A_m(\omega)C_{m1}(\omega) \right) \quad (6)$$

и

$$Z_1^{(id)}(\omega) = R(\omega)P(\omega)C_{11}(\omega). \quad (7)$$

Для обозначения частотных характеристик функций используем заглавные буквы.

Для преобразования $z_1(t)$ в $z_1^{(id)}(t)$ потребуется фильтр с такой спектральной характеристикой $D(\omega)$, что

$$D(\omega)Z_1(\omega) = Z_1^{(id)}(\omega). \quad (8)$$

Разделив обе части последнего равенства на $Z_1(\omega)$ и подставив в него выражения (6) и (7),
имеем

$$D(\omega) = \frac{C_{11}(\omega)}{C_{11}(\omega) + \sum_{m=2}^M A_m(\omega) C_{m1}(\omega)}.$$

Разделив числитель и знаменатель на $C_{11}(\omega)$, приходим к

$$D(\omega) = \frac{1}{1 + \sum_{m=2}^M A_m(\omega) \frac{C_{m1}(\omega)}{C_{11}(\omega)}}.$$

Так как частотная характеристика фильтра имеет знаменатель, то во временной области фильтр оказывается рекурсивным [Рабинер, Гоулд, 1978]. Эта особенность обусловила название ОРФ, которое получил алгоритм.

Последнее выражение на каждой частоте представляет собой сумму геометрической прогрессии (для такого представления требуется выполнение определенных условий, которые, впрочем, всегда соблюдаются при решении практических задач [Денисов, Егоров, 20196]):

$$D(\omega) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[- \sum_{m=2}^M A_m(\omega) \frac{C_{m1}(\omega)}{C_{11}(\omega)} \right]^k.$$

Так как гармоники имеют малую по сравнению с основным тоном интенсивность, то ряд по индексу k быстро сходится, и можно ограничиться K членами разложения (число K будем называть порядком фильтра)

$$D(\omega) = 1 + \sum_{k=1}^K \left[- \sum_{m=2}^M A_m(\omega) \frac{C_{m1}(\omega)}{C_{11}(\omega)} \right]^k. \quad (9)$$

Кроме того, полученный фильтр удаляет из коррелограммы гармоники всех порядков. Очень часто гармоники старших (4-го и выше) порядков почти незаметны на фоне младших, поэтому для получения приемлемого результата достаточно ограничиться удалением только нескольких первых гармоник. Наш опыт применения процедуры свидетельствует о том, что на реальных сейсмограммах даже простой фильтр первого порядка ($K = 1$) успешно справляется с задачей удаления гармоник 2-го и 3-го порядков ($M = 3$). Как следует из (9), этот фильтр имеет частотную характеристику

$$D(\omega) = 1 - A_2(\omega) \frac{C_{21}(\omega)}{C_{11}(\omega)} + A_3(\omega) \frac{C_{31}(\omega)}{C_{11}(\omega)}, \quad (10)$$

и если бы функции $A_2(\omega)$ и $A_3(\omega)$ были известны, можно было бы его применить. Разумеется, частотные характеристики $A_m(\omega)$ неизвестны, и для их оценивания разработана специальная оптимизационная процедура, которая нас здесь не интересует, т. к. она не опирается на предположение

о том, что мы работаем с ЛЧМ сигналами и может быть использована после того, как мы укажем способ прогнозирования гармоник АНЛЧМ сигналов.

Подставив (10) в (8), получим

$$Z_1^{(id)}(\omega) = Z_1(\omega) - A_2(\omega) \frac{C_{21}(\omega)}{C_{11}(\omega)} Z_1(\omega) + A_3(\omega) \frac{C_{31}(\omega)}{C_{11}(\omega)} Z_1(\omega). \quad (11)$$

Фактически, умножение $\frac{C_{21}(\omega)}{C_{11}(\omega)} Z_1(\omega)$ означает прогнозирование 2-й гармоники, а $\frac{C_{31}(\omega)}{C_{11}(\omega)} Z_1(\omega)$

– 3-й гармоники. Во временной области прогнозирование осуществляется как свертка коррелограммы $z_1(t)$ соответственно с ФВК $c_{21}(t)$ и $c_{31}(t)$ с последующей деконволюцией, реализуемой в виде свертки с обратным оператором $c_{11}^{-1}(t)$, где

$$c_{11}^{-1}(t) * c_{11}(t) = \Pi(\omega_1, \omega_2, t), \quad (12)$$

$\Pi(\omega_1, \omega_2, t)$ – сигнал с равномерным амплитудным и нулевым фазовым спектром, заданными в диапазоне частот возбуждения основного тона колебаний $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$.

Если сигнал ЛЧМ, то в АКФ $c_{11}(t)$ представляет собой нуль-фазовый оператор с равномерным амплитудным спектром, сосредоточенным в диапазоне частот возбуждения колебаний основного тона, т. е. полосовой фильтр. Поэтому его действие на функции $c_{m1}(t)$ их не изменяет ($c_{m1}(t) * c_{11}(t) = c_{m1}(t)$), и обратный оператор можно игнорировать, деконволюцию не применять. Именно так мы поступали при разработке ранней версии алгоритма ОРФ.

Если сигнал НЛЧМ, то $c_{11}^{-1}(t)$ остается нуль-фазовым, и его амплитудный спектр равномерный. А если сигнал АНЛЧМ, то $c_{11}^{-1}(t)$ – нуль-фазовый с неравномерным амплитудным спектром, и его влияние на процесс прогнозирования гармоник приходится учитывать. Удобный и устойчивый метод расчета оператора деконволюции, учитывающий специфику сигналов с амплитудной модуляцией, предложен в Приложении.

Итак, прогнозирование гармоник в выражении (11) сводится к свертке коррелограммы с ФВК и применению оператора деконволюции:

$$z_1^{(n_i)}(t) = c_{i1}(t) * c_{11}^{-1}(t) * z_1(t),$$

где $z_1^{(n_i)}(t)$ – прогнозная трасса (верхний индекс n означает *noise*, а i – порядковый номер модели помехи), переменная i в данном случае принимает значения 1 и 2.

Затем набор спрогнозированных помех поступает на вход процедуры адаптивного оценивания фильтров $a_i(t)$, которая здесь нас не интересует потому, что не имеет особенностей реализации для АНЛЧМ сигналов.

Описав процесс удаления гармоник на простом примере фильтра первого порядка, вернемся к выражению (9) и увидим, что обобщение методики на общий случай трудностей не вызывает.

Действительно, фигурирующие в нем спектральные характеристики $\frac{C_{m1}(\omega)}{C_{11}(\omega)}$ означают применение во

временной области к исходной коррелограмме последовательности фильтраций $c_{m1}(t) * c_{11}^{-1}(t)$. При $K > 1$ такие фильтрации применяются последовательно несколько раз.

После вычитания гармоник посчитаем разность между исходной коррелограммой и результатом вычитания, т. е. получим поле гармоник. Используя описанные принципы, можно выделить из него трассу младшей (в данном случае 2-й) гармоники. В остаточной трассе будут находиться гармоники 3-го и более высоких порядков, и вновь можно выделить поле младшей, т. е. 3-й гармоники. Таким образом, трассы, связанные с гармониками разных порядков, будут разделены. После этого сейсмограммы гармоник подвергаются всем традиционным процедурам обработки и формируются разрезы, связанные по отдельности с каждой гармоникой.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В последнее время вновь возрождается интерес к задаче расширения спектра сигнала. Укажем на результаты только трех исследований [Zhang, Castagna, 2011; Архипов и др., 2021; Попов, 2023], хотя общее их число оказывается значительным. Достаточно полный библиографический обзор зарубежной литературы содержится в последней из указанных публикаций.

В этих работах используется принцип продолжения спектра в область вне частотного диапазона, который был зарегистрирован в процессе записи колебаний. Точнее говоря, частотная характеристика трассы из зарегистрированного сигнального диапазона математически экстраполируется вне этого диапазона на низкие и высокие частоты. Понятно, что решение такой задачи неединственно, и для того, чтобы получить некоторое решение, используют ту или иную априорную информацию о свойствах импульса и последовательности коэффициентов отражения. Соответствующие методики давно применяются при обработке сейсмических сигналов, а их обзор (применительно к более общей задаче обработки изображений) можно найти, например, в книге [Василенко, Тараторин, 1986]. Недостатки методик также хорошо известны.

Важно иметь в виду, что получаемые при помощи алгоритмов продолжения спектра частоты не были зарегистрированы в процессе наблюдений. Принято называть их «фантомными». Понятно, что если применить два разных алгоритма, то и результаты будут разными. Принцип расширения спектра, которого мы здесь придерживаемся, основан на использовании только тех частот, которые были реально получены в процессе регистрации, и наш алгоритм решает задачу их выделения.

Для тестирования алгоритма использовались полевые виброграммы, которые здесь не показаны по причине их малой информативности. Результаты разделения сигнала и гармоник, а также использования гармоник для расширения спектра демонстрируются на суммарных разрезах.

После разделения, были получены отдельные наборы данных, относящиеся к 1-й и 2-й гармоникам. К каждому из них применена корреляция со свипом соответствующей гармоники. Для обработки использовался один и тот же граф (полосовая фильтрация, выравнивание амплитуд, коррекция статических поправок, скоростной анализ, деконволюция сжатия сигнала).

На рисунке 1 сравниваются временные разрезы 1-й и 2-й гармоник. Заметно существенное увеличение разрешенности волновой картины на разрезе, полученном по 2-й гармонике. Наиболее явно

это проявляется там, где на разрезе 1-й гармоники на времени 200 мс видно только одно отражение, а на 2-й гармонике видна сложная слоистая структура со складками и разломами. Напомним, что разрешающая способность сигнала пропорциональна ширине частотного диапазона, в котором сконцентрирована его спектральная характеристика. Наблюдаемый эффект похож на эффект деконволюции, однако понятно, что средствами обратной фильтрации не удастся так расширить спектр сигнала 1-й гармоники, как мы это видим на разрезе 2-й гармоники (соответствующие оценки спектров приведены на рис. 2). Действительно, верхняя частота диапазона возбуждения основного свипа равна 90 Гц, поэтому никакие линейные преобразования сигнала не смогут добавить к его спектральной характеристике более высокочастотные компоненты. Иначе говоря, применение деконволюции может расширить спектр трассы, но только за счет повышения уровня помехи. Чтобы продемонстрировать, что разрез 2-й гармоники в своей высокочастотной части содержит именно сигнальную компоненту, можно было бы применить полосовую фильтрацию, устранив из него все частоты ниже 90 Гц, после чего убедиться, что высокочастотные компоненты представляют собой регулярное по латерали волновое поле. Такую обработку мы применили, однако результат оказался неинформативным, с трудом поддающимся интерпретации. Более содержательным доказательством того, что на разрезе 2-й гармоники спектр расширен за счет сигнала, является применение к этому разрезу низкочастотного полосового фильтра, верхняя частота среза которого равна 90 Гц. Результат фильтрации сравнивается с разрезом 1-й гармоники на рис. 3. Очевидно, что волновые поля очень похожи как по кинематике, так и по динамике. Если иметь в виду то, что широкополосный разрез 2-й гармоники (рис. 1) содержит информативную высокочастотную компоненту, обуславливающую его повышенную разрешающую способность, становится понятным, что высокочастотная часть волнового поля, отличающая разрез 2-й гармоники на рис. 1, содержит именно полезную сигнальную информацию.

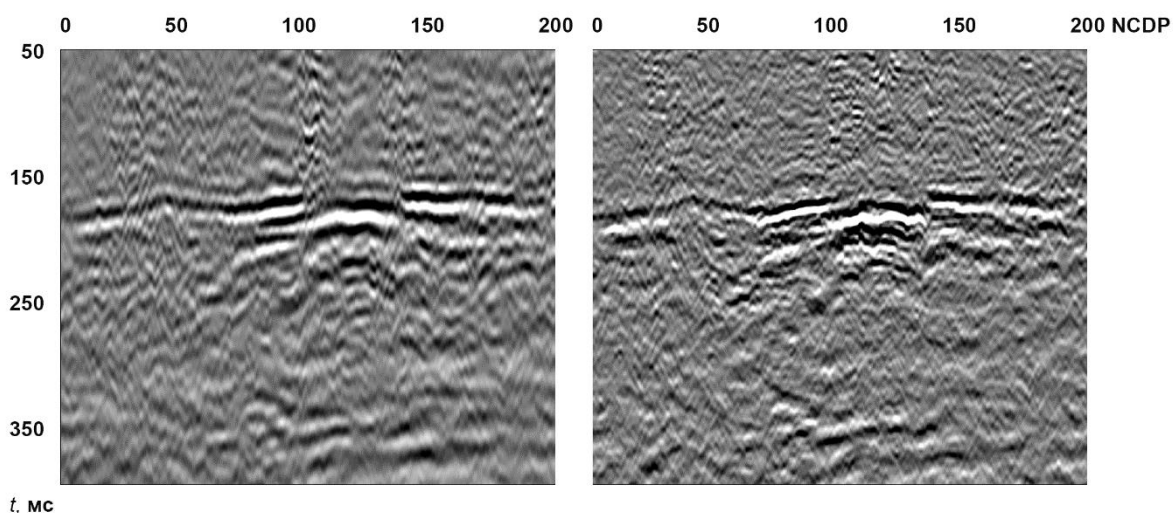


Рис. 1. Фрагменты временных разрезов: слева по 1-й гармонике, справа по 2-й гармонике

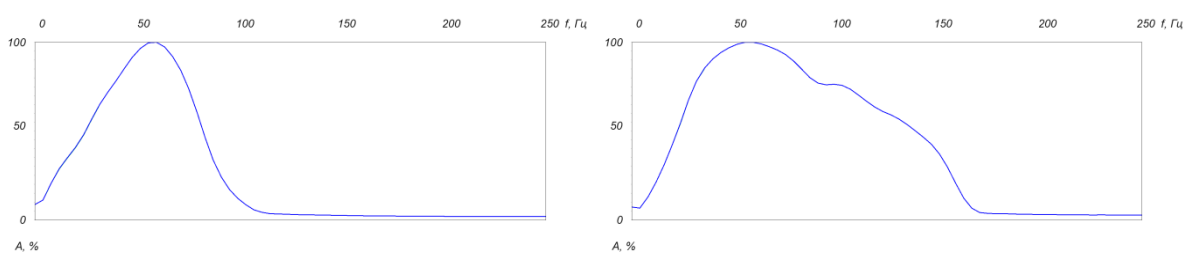


Рис. 2. Сглаженные амплитудные спектры фрагментов разрезов, показанных на рис. 1: слева по 1-й гармонике, справа по 2-й гармонике. По вертикальной оси отложены относительные амплитуды

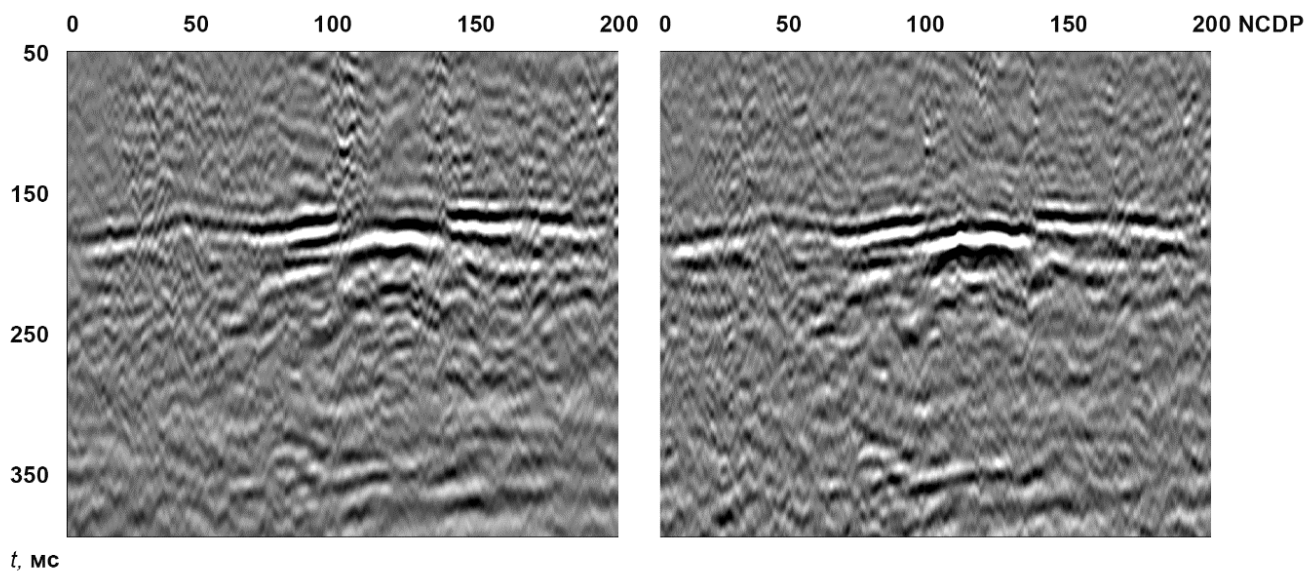


Рис. 3. Фрагменты временных разрезов: слева по 1-й гармонике, справа по 2-й гармонике в полосе частот 1-й гармонике

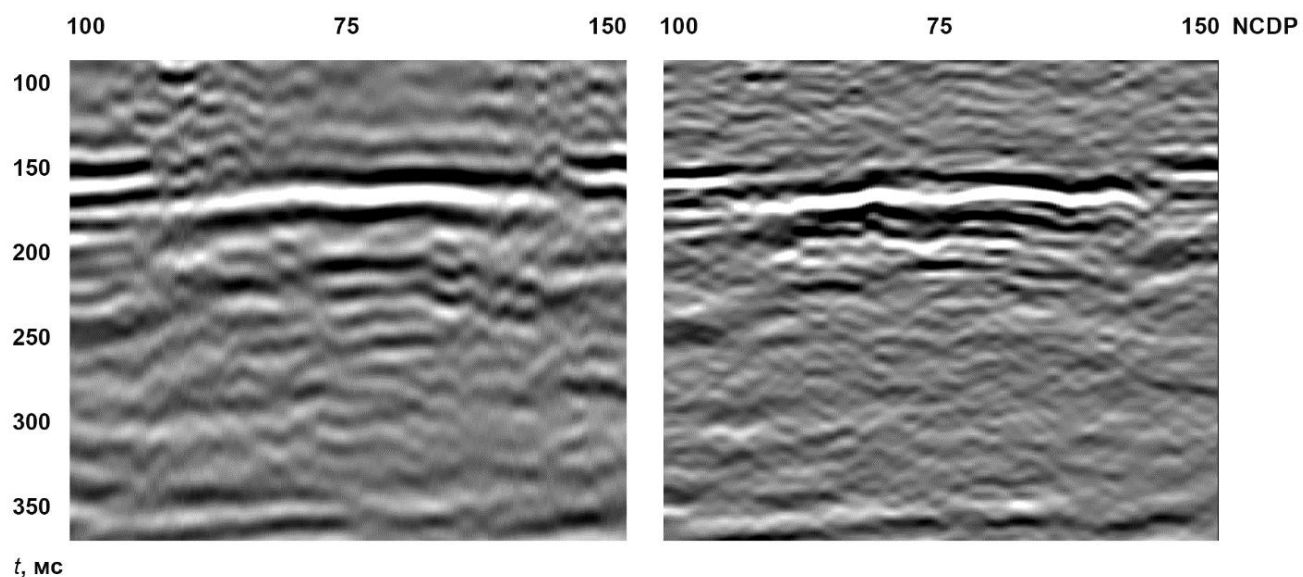


Рис. 4. Увеличенные фрагменты разрезов: слева по 1-й гармонике, справа по 2-й гармонике

На рис. 4 показан увеличенный фрагмент разреза, изображенного ранее на рис. 1. В отличие от разреза 1-й гармоники, на разрезе 2-й гармоники можно детально рассмотреть тонкую слоистость отражающей пачки, различные складки, а также дизъюнктивные нарушения по краям объекта.

Мы демонстрировали фрагменты, относящиеся только к ВЧР. При анализе отражений от более глубоких горизонтов разность волновых картин 1-й и 2-й гармоник менее заметна. Вероятно, причиной этого является эффект частотно-зависимого неупругого поглощения энергии сейсмических волн в ВЧР, что приводит к быстрому затуханию высокочастотных компонент сигнала. Кроме того, исходные виброграммы характеризуются малым уровнем гармонических искажений. Энергия 2-й гармоники составляет лишь 4–5 % энергии основного свипа, в то время как в менее благоприятных ситуациях она может достигать 25–30 % [Ведерников и др., 2001].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в предыдущих публикациях алгоритм оптимизационной рекурсивной фильтрации был получен в предположении, что вибрационная установка излучает линейно частотно-модулированный сигнал. Однако, как показывает практика, это допущение зачастую нарушается. Мы обобщили алгоритм, позволив корректно учитывать как амплитудную модуляцию, так и нелинейную частотную модуляцию. Алгоритм отделяет сейсмограмму, связанную с сигналом основного тона, от сейсмограмм, связанных с гармониками, а также отделяет сейсмограммы гармоник различного порядка друг от друга.

Работоспособность алгоритма подтверждается примерами обработки полевых виброграмм. Удалось почти вдвое расширить спектр импульса, и, как следствие, значительно повысить разрешенность записи.

Пока мы остановились на совместной интерпретации разрезов основного тона и гармоник. В дальнейшем планируется решить задачу их суммирования с использованием критерия оптимальности, добиваясь наибольшего расширения спектра сигнала с учетом требования максимизации отношения сигнал/шум.

Полевые виброграммы, осложненные гармониками, которые использовались для тестирования алгоритмов, предоставлены ООО «НПП Спецгеофизика».

ЛИТЕРАТУРА

- Архипов А.А., Кобзарев Г.Ю., Хромова И.Ю.** Теоретические основы и практика применения технологии расширения спектра сейсмической записи нового поколения «nSeis» // *Геофизика*. – 2021. – № 4. – С. 71–80.
- Василенко Г.И., Тараторин А.М.** Восстановление изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
- Ведерников Г.В., Максимов Л.А., Жарков А.В.** Исследование кратных гармоник вибросигналов // *Геофизика. Спецвыпуск к 30-летию «Сибнефтегеофизики»*. – 2001. – С. 33–38.
- Гольдин С. В.** Линейные преобразования сейсмических сигналов. – М.: Недра, 1974. – 352 с.
- 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.** Исследование особенностей реальных виброрейсмических сигналов, осложненных гармоническими помехами // Геофизические технологии. – 2022. – № 1. – С. 30–48, doi: 10.18303/2619-1563-2022-1-30.
- Денисов М.С., Зыков А.А.** Моделирование гармоник амплитудно и нелинейно частотно-модулированных сигналов // Геофизические технологии. – 2023. – № 3. – С. 58–68, doi: 10.18303/2619-1563-2023-3-58.
- Жуков А.П., Коротков И.П., Тищенко А.И.** Адаптивные технологии вибрационной сейсморазведки. Часть I // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2021. – № 1 (68). – С. 32–47.
- Попов М.М.** Расширение спектра экстраполяцией: применение, проверка, особенности результатов и требования к данным // Геомодель 2023: Сб. материалов конференции. – Геленджик, 2023. – С. 161–164.
- Рабинер Л., Гоулд Б.** Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
- Федорюк М.В.** Метод перевала. – М.: Наука, 1977. – 368 с.
- Ягудин И.Р., Гафаров Р.М., Сираев И.А., Ахтямов Р.А.** Влияние нелинейных искажений на качество полевых данных в вибрационной сейсморазведке // Геофизика. – 2022. – № 4. – С. 58–63.
- 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.
- Gürelı O.** Use of vibrator harmonics as a sweep signal // Journal of seismic exploration. – 2021. – Vol. 30 (6). – P. 505–528.
- Liu D., Li X., Wang W., Wang X., Shi Z., Chen W.** Eliminating harmonic noise in vibroseis data through sparsity-promoted waveform modeling // Geophysics. – 2022. – Vol. 87 (3) – P. V183–V191, doi: 10.1190/geo2021-0448.1.
- Tellier N., Ollivrin G.** Low-frequency Vibroseis: current achievements and the road ahead? // First Break. – 2019. – Vol. 37 (1). – P. 49–54, doi: 10.3997/1365-2397.n0011.
- Vedanti N., Gupta L., Singh V., Vadapalli U., Naik R.T.B., Vasudevan G.** Problems with the standard vibroseis deconvolution: some practical solutions // Exploration Geophysics. – 2021. – Vol. 52 (3). – P. 308–320, doi: 10.1080/08123985.2020.1825913.
- Wang H., Chen X., Zhou Y., Chen J., Chen W.** Harmonic noise suppression based on the classification of adaptive learning dictionary // CPS/SEG International Geophysical Conference. Expanded Abstracts. – 2018. – P. 449–452, doi: 10.1190/IGC2018-110.
- Zhang R., Castagna J.** Seismic sparse-layer reflectivity inversion using basis pursuit decomposition // Geophysics. – 2011. – Vol. 76 (6) – P. R147–R158, doi: 10.1190/geo2011-0103.1.

REFERENCES

- Arkhipov A.A., Kobzarev G.Y., Khromova I.Y.** Theoretical basis and usage practice of a new generation seismic spectrum extension technology «nSeis» // Geofizika. – 2021. – Vol. 4. – P. 71–80.
- Denisov M.S., Egorov A.A.** Constructing a model of vibroseis signal complicated by harmonics // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2019a. – Vol. 1. – P. 72–83, 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. – Vol. 2. – P. 23–53, doi: 10.18303/2619-1563-2019-2-23.
- 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.

- Denisov M.S., Zykov A.A.** Study of properties of real Vibroseis signals contaminated by harmonic noise // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2022. – Vol. 1. – P. 30–48, doi: 10.18303/2619-1563-2022-1-30.
- Denisov M.S., Zykov A.A.** Modeling of harmonics of amplitude and nonlinear frequency-modulated signals // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2023. – Vol. 3. – P. 58–68, doi: 10.18303/2619-1563-2023-3-58.
- Fedoruk M.V.** Method of pass. – Nauka, Moscow, 1977. – 368 p.
- Goldin S.V.** Linear transformations of seismic signals. – Nedra, Moscow, 1974. – 352 p.
- Gürel O.** Use of vibrator harmonics as a sweep signal // Journal of seismic exploration. – 2021. – Vol. 30 (6). – P. 505–528.
- Liu D., Li X., Wang W., Wang X., Shi Z., Chen W.** Eliminating harmonic noise in vibroseis data through sparsity-promoted waveform modeling // Geophysics. – 2022. – Vol. 87 (3) – P. V183–V191, doi: 10.1190/geo2021-0448.1.
- Popov M.M.** Expanding the spectrum by extrapolation: application, verification, features of the results and data requirements // Geomodel 2023. Expanded abstracts. – Gelendzhik, 2023. – P. 161-164.
- Rabiner L., Gold B.** Theory and application of digital signal processing. – Mir, Moscow, 1978. – 848 p.
- Tellier N., Ollivrin G.** Low-frequency Vibroseis: current achievements and the road ahead? // First Break. – 2019. – Vol. 37 (1). – P. 49–54, doi: 10.3997/1365-2397.n0011.
- Vasilenko G.I., Taratorin A.M.** Reconstruction of images. – Radio and Communication, Moscow, 1986. – 304 p.
- Vedanti N., Gupta L., Singh V., Vadapalli U., Naik R.T.B., Vasudevan G.** Problems with the standard vibroseis deconvolution: some practical solutions // Exploration Geophysics. – 2021. – Vol. 52 (3). – P. 308–320, doi: 10.1080/08123985.2020.1825913.
- Vedernikov G.V., Maksimov L.A., Zharkov A.V.** Study of multiple harmonics of vibroseis signals // Geofizika. – Special Issue to 30th Anniversary of “Sibneftegeofizika”. – 2001. – P. 33–38.
- Wang H., Chen X., Zhou Y., Chen J., Chen W.** Harmonic noise suppression based on the classification of adaptive learning dictionary // CPS/SEG International Geophysical Conference. Expanded Abstracts. – 2018. – P. 449–452, doi: 10.1190/IGC2018-110.
- Yagudin I.R., Gafarov R.M., Siraev I.A., Akhtyamov R.A.** Study of nonlinear transformations on the quality of field data in vibration seismic exploration // Geofizika. – 2022. – Vol. 4. – P. 58–63.
- Zhang R., Castagna J.** Seismic sparse-layer reflectivity inversion using basis pursuit decomposition // Geophysics. – 2011. – Vol. 76 (6) – P. R147–R158, doi: 10.1190/geo2011-0103.1.
- Zhukov A.P., Korotkov I.P., Tishchenko A.I.** Adaptive technologies of vibration seismic exploration. Part I // Instruments and Systems of Exploration Geophysics. – 2021. – Vol. 1 (68). – P. 32–47.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Утверждение. Пусть имеются непрерывные сигналы $x(t) = \sin uf(t)$ и $y(t) = g(t) \sin uf(t)$, где $g(t)$ – гладкая функция, определяющая огибающую ЧМ сигнала $y(t)$, u – параметр глубины модуляции, $u \gg 1$. Тогда для спектральных характеристик этих сигналов, которые обозначим соответственно как $X(\omega)$ и $Y(\omega)$, выполняется $Y(\omega) = B(\omega)X(\omega)$, где $B(\omega)$ и $g(t)$ – зависящие друг от друга функции, причем $B(\omega)$ имеет нулевой фазовый спектр.

Доказательство

Следуя логике рассуждений [Гольдин, 1974], представим $x(t)$ в виде мнимой части функции $\tilde{x}(t) = \exp(juf(t))$, где $j = \sqrt{-1}$. Аналогично, $y(t)$ – мнимая часть функции $\tilde{y}(t) = g(t) \exp(juf(t))$.

Тогда $x(t) = \frac{1}{2j} [\tilde{x}(t) - \tilde{x}^*(t)]$, $y(t) = \frac{1}{2j} [\tilde{y}(t) - \tilde{y}^*(t)]$, где звездочка обозначает комплексное сопряжение.

Функция $\tilde{x}(t)$ имеет спектральную характеристику $\tilde{X}(\omega)$, записываемую как

$$\tilde{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(j(uf(t) - \omega t)) dt, \quad (\text{П1})$$

а спектральная характеристика $\tilde{Y}(\omega)$ функции $\tilde{y}(t)$ равна

$$\tilde{Y}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(j(uf(t) - \omega t)) dt. \quad (\text{П2})$$

Перепишем (П2) в виде

$$\tilde{Y}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(ju(f(t) - \frac{\omega t}{u})) dt, \quad (\text{П3})$$

после чего обозначим через $\phi(t)$ функцию фазы: $\phi(t) = f(t) - \frac{\omega t}{u}$.

Согласно методу стационарной фазы [Федорюк, 1977], основной вклад в интеграл (П3) при $u \gg 1$ дадут значения переменной t , расположенные в окрестности точки стационарности фазы \hat{t} , которая определяется условием

$$\left. \frac{\partial \phi(t)}{\partial t} \right|_{t=\hat{t}} = 0. \quad (\text{П4})$$

Тогда интеграл приблизительно равен

$$\tilde{Y}(\omega) \approx g(\hat{t}) \sqrt{\frac{2\pi}{u|\phi''(\hat{t})|}} \exp(j(u\phi(\hat{t}) + \frac{\pi}{4})). \quad (\text{П5})$$

Аналогично получим

$$\tilde{X}(\omega) \approx \sqrt{\frac{2\pi}{u|\phi''(\hat{t})|}} \exp(j(u\phi(\hat{t}) + \frac{\pi}{4})). \quad (\text{П6})$$

В дальнейшем знак приближительного равенства заменим на знак равенства. С условиями такой аппроксимации интегралов можно ознакомиться в указанном литературном источнике. Здесь же заметим, что все необходимые условия точности аппроксимации в нашей задаче заведомо соблюдены.

Из принципа стационарности фазы следует, что спектральная характеристика сигнала на частоте ω определяется значением квазигармонического колебания в тот момент времени, когда его мгновенная частота совпадает с ω .

Для примера рассмотрим традиционный ЛЧМ сигнал. Тогда функция фазы записывается в виде

$$\phi(t) = t^2 - \frac{\omega t}{u}, \text{ откуда следует}$$

$$\hat{t} = \frac{\omega}{2u}. \quad (\text{П7})$$

Подставив последнее выражение в (П5) и учитывая (П6), получим

$$\hat{Y}(\omega) = g(\omega/2u)\hat{X}(\omega).$$

Вводя обозначение $B(\omega) = g(\omega/2u)$, приходим к $\hat{Y}(\omega) = B(\omega)\hat{X}(\omega)$.

Очевидно, что это же свойство выполняется и для комплексно-сопряженных функций: $\hat{Y}^*(\omega) = B(\omega)\hat{X}^*(\omega)$. Следовательно, $\hat{Y}(\omega) - \hat{Y}^*(\omega) = B(\omega)(\hat{X}^*(\omega) - \hat{X}(\omega))$. Вспомнив, что $x(t)$ записана в виде суммы функций $\tilde{x}(t)$ и $\tilde{x}^*(t)$, а $y(t)$ – в виде суммы функций $\tilde{y}(t)$ и $\tilde{y}^*(t)$, убедимся, что $x(t)$ и $y(t)$ оказываются связанными преобразованием вида свертки с оператором $b(t)$, имеющим спектральную характеристику $B(\omega)$: $y(t) = b(t) * x(t)$ (в этом выражении звездочка обозначает свертку).

Для НЛЧМ сигналов будет выполняться отличная от (П7) зависимость \hat{t} от ω , а для ее получения следует вновь воспользоваться выражением (П4).

Наконец, так как g является действительной функцией, ее умножение на $\hat{X}(\omega)$ не меняет фазовой характеристики последней. Поэтому $B(\omega)$ – частотная характеристика нуль-фазового фильтра.

Тем самым, утверждение доказано.

Мы провели рассуждения для непрерывных сигналов, что позволило нам получать компактные аналитические решения. Можно показать, что с заведомо достаточной точностью для интересующей нас задачи сделанные выводы переносятся на случай дискретных сигналов.

Следствие 1

Используемая в процессе прогнозирования гармоник АКФ $c_{11}(t)$ в случае амплитудно-модулированного сигнала является нуль-фазовой функцией с неравномерным амплитудным спектром, и требуется построить обратный оператор $c_{11}^{-1}(t)$ согласно равенству (12). Пользуясь доказанным Утверждением и зная функцию огибающей $g(t)$, можно получить такой фильтр $b(t)$, который, будучи дважды примененным к $c_{11}(t)$, скомпенсирует неравномерность ее амплитудного спектра. Таким образом, $c_{11}^{-1}(t) = b(t) * b(t)$. Здесь, вероятно, корректнее было бы рассуждать не о свертке, а о корреляции $c_{11}^{-1}(t) = b(t) * b(-t)$, но мы не делаем этого различия в силу нулевой фазы оператора $b(t)$. Такой способ расчета оператора деконволюции прост, нагляден и устойчив.

Следствие 2

На основании доказанного Утверждения можно получить универсальный метод обработки АНЛЧМ сигналов. Пусть требуется изменить форму огибающей элементарного сигнала, например, применить сглаживание конусами свип-сигнала непосредственно по исходной виброграмме, на которой сигналы присутствуют в виде интерференции без возможности выделения отдельных свипов. Тогда, как было доказано, умножение сигнала на функцию огибающей $g(t)$ может быть реализовано в виде свертки с фильтром $b(t)$. Применение этого фильтра к виброграмме означает, что он действует отдельно на

каждый свип-сигнал в интерференционном поле. В самом деле, так как искомое преобразование $x(t)$ в $y(t)$ реализуется как $y(t) = b(t) * x(t)$, то если $b(t)$ действует на виброграмму $\tilde{v}(t) = v(t) * b(t)$, где в данном случае $v(t) = r(t) * p(t) * x(t)$, имеем $\tilde{v}(t) = r(t) * p(t) * x(t) * b(t)$. В силу свойства ассоциативности оператора свертки приходим к $\tilde{v}(t) = r(t) * p(t) * (x(t) * b(t))$ или $\tilde{v}(t) = r(t) * p(t) * y(t)$, что и требовалось получить.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

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

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

*Статья поступила в редакцию 6 октября 2023 г.,
принята к публикации 29 ноября 2023 г.*