



Памяти Михаила Борисовича Шнеерсона посвящается

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕАЛЬНЫХ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ОСЛОЖНЕННЫХ ГАРМОНИЧЕСКИМИ ПОМЕХАМИ

М.С. Денисов, А.А. Зыков

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

e-mail: denisovms@gmail.com

Исследуются особенности сигнала толкающего усилия, осложненного гармониками. Показано, что фильтры адаптации, позволяющие в соответствующем диапазоне частот привести к единой форме амплитудно- и фазочастотные характеристики гармоник, имеют простую форму. Обсуждается проблема фокусировки сигнала, содержащего гармоники, при помощи корреляции и деконволюции. Показан пример использования гармоник для расширения спектра сигнала.

Вибросейс, гармоники, фильтрация, адаптация

STUDY OF PROPERTIES OF REAL VIBROSEIS SIGNALS CONTAMINATED BY HARMONIC NOISE

M.S. Denisov, A.A. Zykov

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

e-mail: denisovms@gmail.com

Properties of the ground force signal complicated by harmonics are studied. It is shown that the adaptation filters, that enable matching the amplitude- and phase- frequency characteristics of harmonics in the corresponding frequency range, have a simple form. The problem of focusing a signal containing harmonics using correlation and deconvolution is discussed. An example of using harmonics to expand the signal spectrum is given.

Vibroiseis, harmonics, filtering, adaptation

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа продолжает цикл статей, посвященных вопросам, связанным с гармоническими искажениями сигналов в методе Вибросейс. Исследования были инициированы известным специалистом по невзрывной сейсморазведке доктором технических наук М.Б. Шнеерсоном. Михаила Борисовича всегда интересовала возможность не просто удаления гармоник с целью устранения так называемых «нелинейных» искажений сигнала, а их использования для расширения спектра импульса и, как следствие, повышения разрешенности сейсмических трасс. Поэтому в качестве цели намечено не вычитание из реального искаженного сигнала его гармоник, а их разделение с дальнейшим использованием последних. Первый наш (т. е. полученный при участии одного из соавторов настоящей

работы) опыт решения такой задачи описан в статьях [Денисов, Шнеерсон, 2017, 2018], а более совершенная методика, успешно опробованная на полевых сейсмограммах и основанная на построении оптимальных фильтров адаптации, изложена в публикациях [Денисов и др., 2019; Denisov et al., 2019, 2021]. Алгоритм получил название *оптимизационной рекурсивной фильтрации* (ОРФ). Он представляет собой двухэтапную процедуру, на первом шаге которой реализуется прогнозирование поля помех. На втором шаге это поле адаптивно вычитается из коррелограммы.

В процессе тестирования алгоритма выяснилось, что используемый в нем функционал требует совершенствования. На это мы обращали внимание читателей публикации [Денисов, Егоров, 2019б], обещая продолжение работ в этом направлении. Как оказалось, возможность улучшения статистических свойств функционала зависит от некоторых особенностей гармоник. В настоящем исследовании изучаются эти особенности, а наша следующая работа, посвященная совершенствованию функционала, будет опираться на полученные здесь результаты.

Также мы изучим вопросы, связанные с переходом от виброграммы к коррелограмме в ситуации наличия гармонических искажений. Известно, что фокусировку вибросейсмического сигнала можно производить как при помощи корреляционного преобразования, так и при помощи обратной фильтрации. Если для этого используется теоретический свип-сигнал, то способы оказываются тождественными. При наличии интенсивных гармонических помех они приводят к неудовлетворительному результату. Если сигнал толкающего усилия (в англоязычной литературе – ground force) тем или иным способом регистрируется в процессе проведения полевых работ, то можно пытаться достичь лучшего качества фокусировки. Тем не менее, и в этом случае артефакты оказываются весьма значительными, что вынуждает нас использовать альтернативные методики перехода от виброграммы к коррелограмме.

Наконец, нам предстоит продолжить изучение возможности расширения спектра сигнала за счет привлечения информации, содержащейся в гармониках. Разделив сигнал и гармоники при помощи алгоритма ОРФ, мы получаем несколько сейсмических трасс, отличающихся друг от друга формой импульса. Точнее говоря, импульсы будут иметь различные частотные диапазоны. Отдельно решается задача построения оптимальных фильтров, позволяющих наилучшим образом объединить эти трассы в одну.

МОДЕЛЬ

В работе [Денисов, Егоров, 2019а] предложена модель вибросейсмического сигнала $q(t)$ 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. Мы условились, что первая гармоника $q_1(t)$ является основным свипом (или сигналом основного тона), и $a_1(t) = \delta(t)$ – «дискретная дельта-функция» [Корн, Корн, 1974]. Свип-сигнал, так же как и его гармоники, является линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом. Определив безразмерную переменную t как индекс дискретного времени, будем также рассуждать о ее размерном эквиваленте, измеряемом в миллисекундах, который мы для простоты тоже обозначим через t , не оговаривая всякий раз то, что они связаны умножением на шаг дискретизации Δt .

Сигнал проходит верхнюю часть разреза (ВЧР), в которой претерпевает искажения, зависящие от особенностей ее геологического строения. Поэтому в глубь среды распространяется уже не $q(t)$, а импульс

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

где оператор $p(t)$ описывает влияние ВЧР, которое очень часто сводится к эффекту неупругого поглощения, т. е. к тому, что высокочастотные компоненты затухают сильнее низкочастотных. Здесь мы также условимся включать в форму фильтра $p(t)$ искажения, связанные с отклонением основного тона вибрационного импульса от желаемого теоретического ЛЧМ-сигнала. Как правило, современные вибрационные установки отличаются невысоким уровнем таких искажений, по крайней мере, в достаточно широком частотном диапазоне, что мы проиллюстрируем ниже. Поэтому вклад этого фактора в фильтр $p(t)$ обычно оказывается малым по сравнению с вкладом, обусловленным влиянием ВЧР, и добавка к фильтру описывается простой функцией.

Сигнал толкающего усилия, записываемый в полевых условиях, обычно регистрируется при помощи датчика, расположенного на плите вибрационной установки. Это означает, что его форма не зависит от сейсмогеологических условий в ВЧР, а в глубь среды распространяется другой импульс. Поэтому при изучении полевой записи сигнала толкающего усилия оператор $p(t)$, фигурирующий в (2), будет описывать только отличия формы реального основного тона колебаний от ЛЧМ-сигнала и не будет содержать информации о влиянии ВЧР.

СВОЙСТВА ФИЛЬТРОВ АДАПТАЦИИ

Нам требуется, в первую очередь, изучить свойства функций $a_m(t)$, что важно для понимания особенностей алгоритма ОРФ, где оптимальные оценки этих функций являются фильтрами адаптивного вычитания спрогнозированных полей гармоник из коррелограммы. С этой целью мы опишем алгоритм разделения сигнала и гармоник, который в дальнейшем применим к импульсу толкающего усилия, записанному в процессе проведения полевого сейсмического эксперимента. Известно, что ЛЧМ-сигнал имеет мгновенную частоту, изменение которой по временной координате подчиняется линейному закону [Гоноровский, 1986]. В каждый фиксированный момент времени гармоники, интерферирующие с сигналом, имеют мгновенные частоты, кратные частоте основного свипа. Иначе говоря, если в некоторый момент времени свип основного тона характеризуется мгновенной циклической частотой $\hat{\omega}$, то гармоника второго порядка имеет частоту $2\hat{\omega}$, а гармоника третьего порядка – $3\hat{\omega}$. (В дальнейшем, там, где это будет удобно, будем параллельно использовать как циклическую частоту ω , измеряемую в радианах, так и линейную частоту f , измеряемую в герцах, при этом каждый раз не оговаривая такой переход, т. к. он будет ясен из контекста.) Поэтому для свободного от интерференции изолированного импульса толкающего усилия можно добиться разделения основного тона колебаний и каждой гармоники путем применения нестационарной полосовой фильтрации. Частоты среза такого фильтра принимают свои значения для каждого отсчета: полоса пропускания центрируется на текущем значении мгновенной частоты функции, которую требуется пропустить, а его действие соответствует процедуре свертки сигнала

с нестационарным по временной координате оператором. В результате такого преобразования имеем набор сигналов $s_m(t)$, которые, на основании равенств (1) и (2), описываются выражениями

$$s_m(t) = a_m(t) * q_m(t) * p(t).$$

Отличия полученных сигналов друг от друга заключаются не только в том, что в них фигурируют различные функции $a_m(t)$ (а именно к этому мы стремились, и этим свойством мы планируем воспользоваться), но и в том, что они отличаются сверточными компонентами $q_m(t)$. Последняя особенность затрудняет извлечение информации об интересующих нас операторах $a_m(t)$.

Мы, однако, можем учесть свойство ЛЧМ-сигналов, согласно которому их амплитудный спектр равен константе в соответствующем диапазоне частот. Для нашей задачи величина этой константы не существенна, т. к. она является лишь масштабирующим коэффициентом функции $a_m(t)$ и не влияет на форму этой функции. Поэтому в дальнейшем для простоты будем полагать все такие константы равными условной единице.

Если основной свип-сигнал возбуждается в диапазоне частот $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$, то m -я гармоника имеет частотный диапазон $\omega \in (m\omega_1, m\omega_2)$, в пределах которого ее амплитудный спектр равен постоянной величине. Как следует из (1), каждая функция $a_m(t)$ также однозначно определена только в пределах этого диапазона. Нас интересует разделение сигнала и гармоник, поэтому решать эту задачу имеет смысл в пределах частотного диапазона, где сигнал перекрывается с гармониками. Так, например, если иметь в виду разделение сигнала и второй гармоники, то это диапазон $\omega \in (2\omega_1, \omega_2)$.

Обозначим процедуру так называемой ретросвертки или вычисления функции взаимной корреляции (ФВК), определенной для детерминированных сигналов $q_m(t)$ и $q_l(t)$, через $q_m(t) * q_l(-t)$. Аналогичную процедуру вычисления функции автокорреляции (АКФ), определенной для детерминированного сигнала, обозначим через $q_m(t) * q_m(-t)$.

Очевидно, что АКФ m -й гармоники должна представлять собой полосовой фильтр с частотами среза $(m\omega_1, m\omega_2)$, для которого введем обозначение $\Pi^{(m\omega_1, m\omega_2)}(t)$. Применим к $s_1(t)$ ретросвертку с $q_1(t)$:

$$\tilde{s}_1(t) = s_1(t) * q_1(-t),$$

а к $s_2(t)$ ретросвертку с $q_2(t)$:

$$\tilde{s}_2(t) = s_2(t) * q_2(-t).$$

Тогда получим соответственно

$$\tilde{s}_1(t) = \Pi^{(\omega_1, \omega_2)}(t) * p(t) \quad \text{и} \quad \tilde{s}_2(t) = a_2(t) * \Pi^{(2\omega_1, 2\omega_2)}(t) * p(t).$$

Спектральные характеристики функций $\tilde{s}_1(t)$ и $\tilde{s}_2(t)$ перекрываются только при $\omega \in (2\omega_1, \omega_2)$. Поэтому для получения оценок фильтров адаптации предварительно ограничим функции этим диапазоном частот, применив к ним полосовую фильтрацию:

$$\tilde{\tilde{s}}_1(t) = \Pi^{(\omega_1, \omega_2)}(t) * \Pi^{(2\omega_1, \omega_2)}(t) * p(t).$$

Очевидно, что $\Pi^{(\omega_1, \omega_2)}(t) * \Pi^{(2\omega_1, \omega_2)}(t) = \Pi^{(2\omega_1, \omega_2)}(t)$. Поэтому

$$\tilde{s}_1(t) = \Pi^{(2\omega_1, \omega_2)}(t) * p(t). \quad (3)$$

Аналогично

$$\tilde{s}_2(t) = a_2(t) * \Pi^{(2\omega_1, \omega_2)}(t) * p(t). \quad (4)$$

Преобразованные таким образом сигналы отличаются только сверточной компонентой $a_2(t)$, которая и является искомой. Точнее говоря, в ОРФ изучению подлежит не сама функция $a_2(t)$, а фильтр адаптации $\hat{a}_2(t)$, являющийся решением оптимизационной задачи метода наименьших квадратов:

$$\hat{a}_2(t) = \arg \min_{\tilde{a}_2(t)} \sum_t (\tilde{s}_2(t) - \tilde{a}_2(t) * \tilde{s}_1(t))^2. \quad (5)$$

Минимизация функционала сводится к решению хорошо известной системы линейных алгебраических уравнений, также называемой системой нормальных уравнений [Кондратьев, 1976].

В диапазоне частот $(2\omega_1, \omega_2)$ амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) функций $a_2(t)$ и $\hat{a}_2(t)$ совпадают. В принципе, нам этого достаточно для дальнейшего анализа особенностей методики ОРФ. Но можно также ставить задачу получения функции в полном диапазоне ее частот, т. е. для $\omega \in (2\omega_1, 2\omega_2)$. Такая оценка получается с привлечением гармоник старшего порядка подобно тому, как мы это сделали, придя к выражениям (3) и (4) и сформировав функционал (5). Аналогичные рассуждения и вычисления можно провести для получения $a_m(t)$ и $\hat{a}_m(t)$, $m > 2$.

Применим описанную процедуру к сигналу толкающего усилия, зарегистрированному при проведении полевых наблюдений, который любезно предоставил нам известный специалист по невзрывной сейсморазведке Zhouhong Wei (США) в личном сообщении. Мы не показываем исходный сигнал, т. к. подобная иллюстрация оказалась бы неинформативной. Нам пришлось бы столкнуться либо с непреодолимыми проблемами, связанными с визуализацией протяженных быстроосциллирующих функций, либо демонстрировать лишь небольшой фрагмент. Кроме того, гармоники всегда наблюдаются в интерференции как с сигналом основного тона, так и друг с другом, что крайне затрудняет интерпретацию волновой картины. Поэтому традиционным способом иллюстрирования эффектов, связанных с гармониками, является показ колонок спектрально-временного анализа (СВАН) [Боганик, Гурвич, 2006], где, как известно, гармоники приобретают вид прямых линий, что является следствием применения линейной частотной модуляции. Наклон линий и диапазон частот вдоль линии зависят от номера гармоники. Они не пересекаются (точнее говоря, имеют точку пересечения на нулевой частоте, что ситуацию не меняет, т. к. столь низкие частоты не возбуждаются и в полевых виброграммах не регистрируются), поэтому эффект интерференции разрешается.

На рисунке 1, а показана СВАН-колонка исходного толкающего усилия. Выделяются линии, которые соответствуют сигналу основного тона и нескольким гармоникам. Рисунок 1, б повторяет рис. 1, а, но для удобства интерпретации основной свип и гармоники второго и третьего порядков выделены путем наложения на них линий разного цвета. Параметры использованного свип-сигнала: нижняя частота 10 Гц, верхняя частота 120 Гц, длительность записи 18000 мс, возбуждение сигнала проводилось во временном интервале 9000–18000 мс. На СВАН-колонке заметны значительные отклонения реальных фазовых характеристик от теоретических значений для частот выше 80 Гц: траектории перестают быть линейными

и приобретают заметную кривизну. На рисунке 1, б зеленая линия в области низких и средних частот выбрана так, что она проходит почти точно по середине красной полосы. Однако в области высоких частот она смещается к нижнему краю полосы, после чего вообще выходит за ее пределы. Это свидетельствует о том, что сигнал основного тона отличается от желаемого ЛЧМ-сигнала. Этот эффект обусловлен некорректной работой вибратора на высоких частотах.

В результате применения нестационарной полосовой фильтрации из интерференционной записи выделены: сигнал основного тона (рис. 1, в), вторая гармоника (рис. 1, г) и третья гармоника (рис. 1, д). Нестационарная полосовая фильтрация успешно справилась с поставленной перед ней задачей.

Как следует из рисунков, амплитуда каждой гармоники является функцией частоты (что лишний раз подтверждает высказанное нами в предыдущих публикациях утверждение о том, что гармоники отличаются от свип-сигнала основного тона не коэффициентом, а фильтром). Относительная интенсивность гармоники в зависимости от частоты колебаний определяется амплитудой соответствующей спектральной компоненты, находящейся на линейной траектории СВАН-колонки. Иначе говоря, амплитудный спектр m -й гармоники «размазан» вдоль своей наклонной линии на СВАН. Заметим, что спектры гармоник имеют характерные разрастания и затухания энергии (такие разрастания наблюдаются в виде локальных увеличений и уменьшений амплитудных спектров вдоль наклонных линий на СВАН – см. рис. 1, г, д), что хорошо согласуется с многочисленными экспериментальными данными, демонстрируемыми в работе [Ведерников и др., 2001].

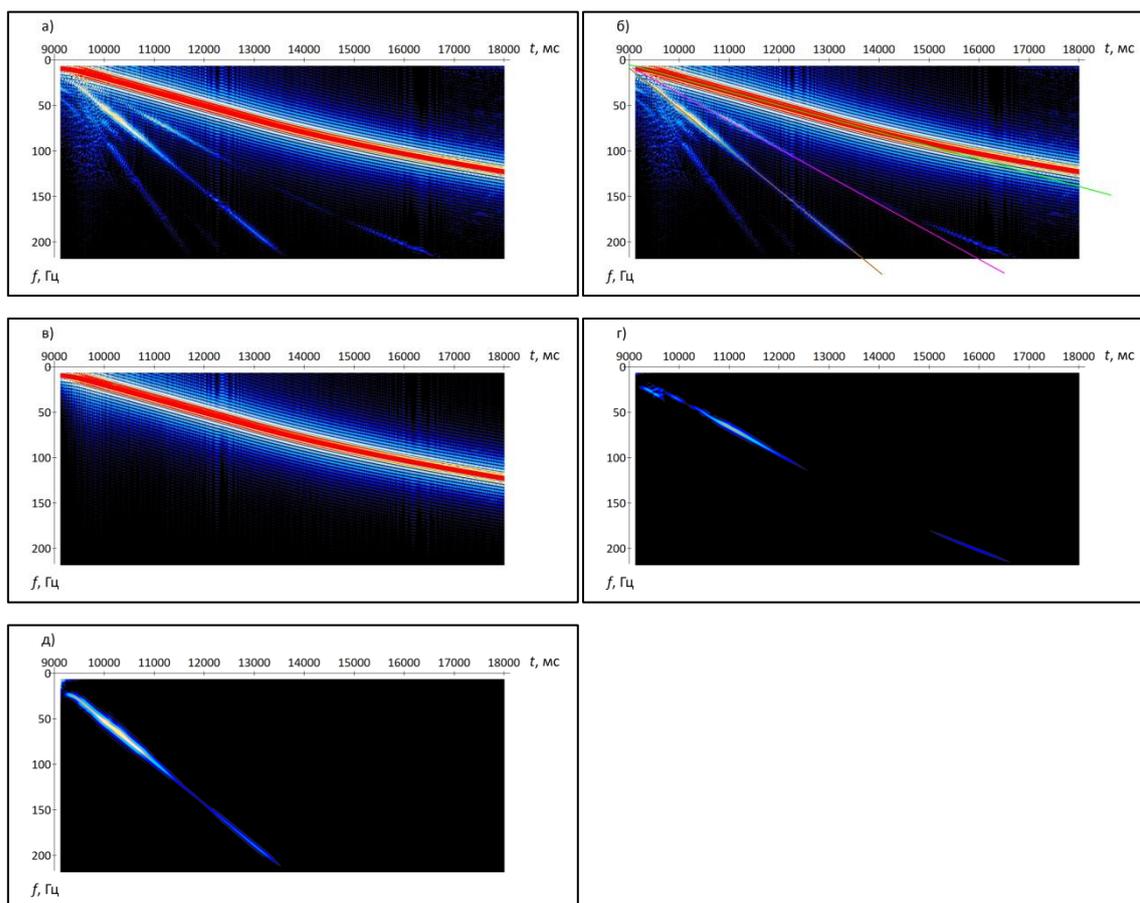


Рис. 1. СВАН-колонки: а – исходный сигнал толкающего усилия; б – исходный сигнал с наложенными на него цветными линиями, соответствующими основному тону (зеленая), второй гармонике (фиолетовая), третьей гармонике (коричневая); в – первая гармоника, выделенная из исходного сигнала; г – вторая гармоника, выделенная из исходного сигнала; д – третья гармоника, выделенная из исходного сигнала. По вертикальной оси отложены значения линейной частоты в герцах, по горизонтали – время в миллисекундах.

В результате применения ретросвертки и полосовой фильтрации получим импульсы $\tilde{s}_1(t)$, $\tilde{s}_2(t)$ и $\tilde{s}_3(t)$. Они уже не являются ЛЧМ-сигналами, поэтому могут быть изображены на рисунке (рис. 2). Масштабирующие коэффициенты не влияют на форму импульсов (а именно она нас будет интересовать) и выбраны так, чтобы обеспечить оптимальное качество визуализации в смысле удобства сопоставления графиков. АЧХ этих импульсов представлены на рис. 3. Перед применением процедур обработки мы подвергли все сигналы полосовой фильтрации в диапазоне 10–70 Гц, чтобы избежать влияния частотной области, где фазовые искажения оказывают существенное влияние на форму импульсов.

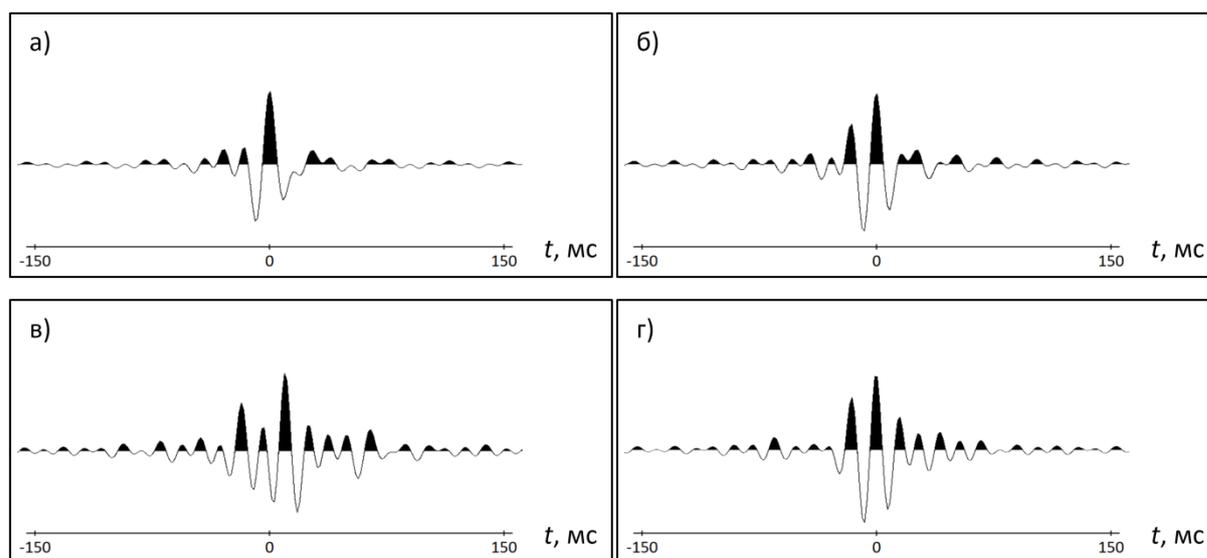


Рис. 2. Результаты применения ретросвертки: а – по сигналу основного тона после полосовой фильтрации в диапазоне частот 20–70 Гц; б – по сигналу основного тона после полосовой фильтрации в диапазоне частот 30–70 Гц; в – по второй гармонике в диапазоне частот 20–70 Гц; г – по третьей гармонике в диапазоне частот 30–70 Гц. Масштабирующие коэффициенты графиков выбраны так, чтобы обеспечить оптимальное качество визуализации.

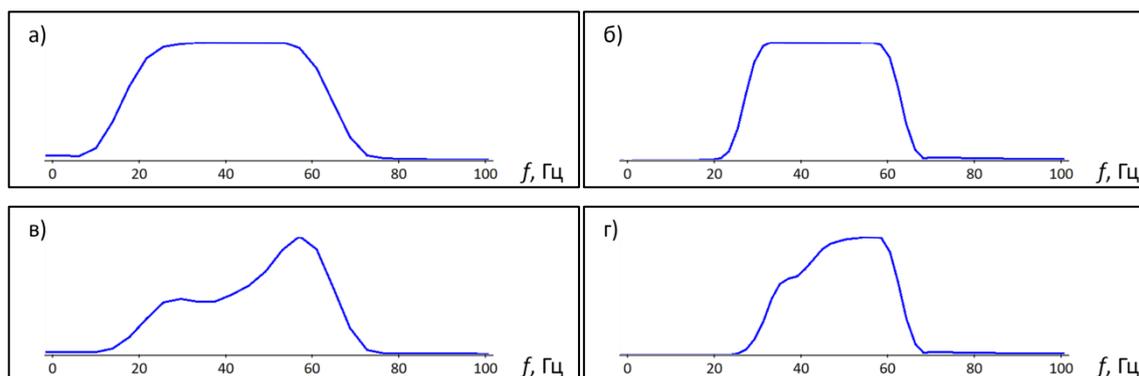


Рис. 3. АЧХ сигналов, показанных на рис. 2: а – сигнала основного тона после полосовой фильтрации в диапазоне частот 20–70 Гц; б – сигнала основного тона после полосовой фильтрации в диапазоне частот 30–70 Гц; в – второй гармоники в диапазоне частот 20–70 Гц; г – третьей гармоники в диапазоне частот 30–70 Гц. По вертикали отложены относительные амплитуды. По горизонтальной оси отложены значения линейной частоты в герцах.

Тем не менее, из рис. 2, а видно, что полученный сигнал слегка несимметричен, при этом его амплитудный спектр можно считать почти идеально плоским (см. рис. 3, а). На рисунке 4 показан фазовый спектр этого сигнала (он же – фазово-частотная характеристика, ФЧХ), и на нем заметно отличие фазы от

нуля в высокочастотной области, что обуславливает необходимость применения на последующих этапах обработки процедур коррекции фазового спектра.

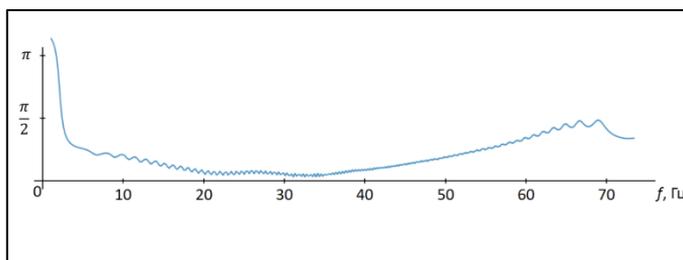


Рис. 4. Фазовый спектр сигнала, показанного на рис. 2, а. По горизонтальной оси отложены значения линейной частоты в герцах

Отмеченные искажения включаются в оператор $p(t)$, а в полевых сейсмограммах в этот же оператор войдут и эффекты, связанные с распространением волн через ВЧР (двукратное прохождение: со стороны источника и со стороны приемника), что вызовет необходимость коррекции не только фазового, но и амплитудного спектров. И здесь оказывается недостаточным использование простой деконволюции сжатия, т. к. потребуются применение неминимально-фазового оператора (в то время как оператор деконволюции сжатия по построению минимально-фазовый [Сильвия, Робинсон, 1983]). Даже если принять гипотезу о том, что искажения за счет влияния ВЧР имеют минимально-фазовую характеристику, после свертки с импульсом на рис. 2, а, общий результат $p(t)$ станет смешанно-фазовым. В самом деле, полночастотный цифровой минимально-фазовый сигнал с постоянным амплитудным спектром совпадает с нуль-фазовым сигналом и является дискретной дельта-функцией. Полученный нами в результате корреляции сигнал имеет постоянный амплитудный спектр, но форма этого сигнала оказывается несимметричной. Поэтому в своем частотном диапазоне он не совпадает с минимально-фазовой функцией, и результат его свертки с минимально-фазовым фильтром окажется смешанно-фазовым.

В результате минимизации функционала (5) для функций, показанных на рис. 2, а и в, и аналогичного ему, записанного для функций, показанных на рис. 2, б и г, получим искомые фильтры адаптации $\hat{a}_2(t)$ и $\hat{a}_3(t)$. Они показаны на рис. 5, а их АЧХ и ФЧХ – соответственно на рис. 6 и 7. Изначально, т. е. при формировании функционала, мы выбрали заведомо завышенную длину фильтров (1000 мс и более), после чего, убедившись в том, что их временная характеристика затухает с ростом $|t|$, произвели усечение до длины, показанной на рисунке.

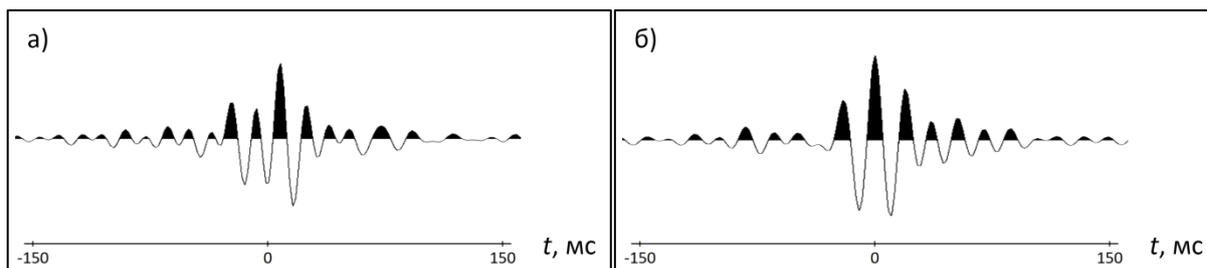


Рис. 5. Фильтры адаптации: а – $\hat{a}_2(t)$; б – $\hat{a}_3(t)$

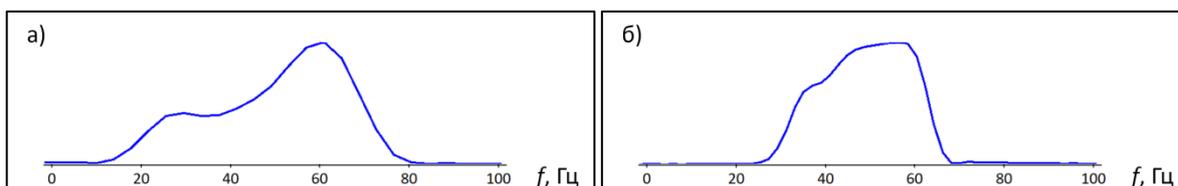


Рис. 6. АЧХ фильтров адаптации: а – $\hat{a}_2(t)$; б – $\hat{a}_3(t)$. По вертикали отложены относительные амплитуды. По горизонтальной оси отложены значения линейной частоты в герцах.

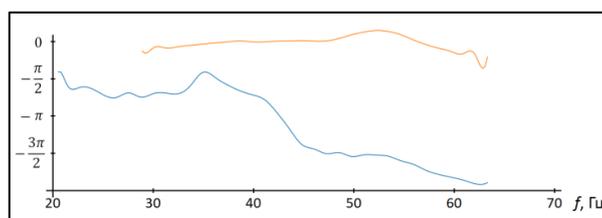


Рис. 7. ФЧХ фильтров адаптации: синяя кривая – ФЧХ $\hat{a}_2(t)$; красная кривая – ФЧХ $\hat{a}_3(t)$.

При использовании алгоритма ОРФ производится прогнозирование каждой m -й гармоники, для чего применяется свертка коррелограммы с ФВК 1-й и m -й гармоник. В результате, наряду с реальной гармоникой, наблюдаемой на коррелограмме, имеем ее модель, и они отличаются фильтром $a_m(t)$. Ранее нами высказывалось предположение о том, что такие фильтры имеют короткие импульсные характеристики. К этому выводу нас привел анализ реальных волновых полей, а также их спектральных эквивалентов, приведенных, например, в работах [Seriff, Kim, 1970; Ведерников и др., 2001] (иллюстрации из статьи Ведерникова и др. также воспроизведены в нашей работе [Денисов, Егоров, 2019а]). Из иллюстраций следовало, что каждая спектральная компонента гармоник отличается от аналогичной спектральной компоненты основного тона своим множителем. Иначе говоря, необходимо применить фильтр с соответствующим амплитудным спектром, чтобы преобразовать сигнал основного тона (или, что в данном случае то же самое, спрогнозированную модель гармоник) в реально зарегистрированную гармонику старшего порядка. Было сделано заключение, что такой амплитудный спектр описывается гладкой функцией, и этот вывод подтверждается результатами оценивания АЧХ, показанными на рис. 6. Что же касается их фазовых отличий (они тождественны фазовым спектрам фильтров адаптации), то из известных нам источников почерпнуть соответствующих сведений не удалось. Связано это, по-видимому, с тем, что анализ отличий фазовых характеристик сигналов представляет собой намного более сложную задачу.

Когда мы опробовали алгоритм адаптации на полевых коррелограммах [Денисов и др., 2019; Denisov et al., 2021], то оказалось, что требуются достаточно протяженные фильтры, чтобы обеспечить удовлетворительное качество вычитания гармоник. И тогда такое поведение фильтров нельзя было объяснить на основании проведенного нами исследования. Известно, что сложность формы сигнала (она же – эффективная длительность сигнала) определяется, в первую очередь, его фазовым спектром. А именно, максимальным значением модуля второй производной фазового спектра в сигнальном диапазоне частот [Варакин, 1970]. Иными словами, если характер амплитудных спектров нами был изучен вполне адекватно и выводы относительно амплитудных спектров, содержащиеся в упомянутых выше работах,

были нами подтверждены экспериментально при настройке фильтров адаптации по полевым коррелограммам, то сделанное заключение о крайней простоте фазовых спектров, очевидно, оказалось необоснованным. Напомним, что в статье [Денисов, Егоров, 2019а] мы предположили, что фазовые спектры фильтров с четными порядковыми номерами почти равны нулю, а фильтров с нечетными номерами приблизительно равны $\pm\pi/2$. В самом деле, удовлетворительно аппроксимировать модельный сигнал реальным удалось в результате замены нечетных гармоник с синусов на косинусы. Однако такое заключение было сделано нами на основании анализа лишь небольшого фрагмента реального сигнала, который мы оцифровали по рисунку, приведенному в публикации [Ведерников и др., 2001]. Учитывая специфику ЛЧМ-сигнала, можно было утверждать, что для некоторого узкого диапазона частот, который соответствовал показанному на рисунке фрагменту, фазовый спектр фильтра $\hat{a}_3(t)$ был приблизительно равен $\pm\pi/2$. На основании этого мы выдвинули гипотезу, что фильтр $\hat{a}_3(t)$ имеет ФЧХ, равную постоянной величине $\pm\pi/2$ всюду, т. е. в широком диапазоне частот. Справедливости ради отметим, что аналогичные выводы сделаны в научном отчете CREWES [Lamougeux, 2014].

Здесь мы имеем возможность анализа реальных сигналов на их полной длине, т. е. в широком диапазоне частот. Построив ФЧХ адаптивных фильтров и изучив их, приходим к заключению, что сделанное нами ранее предположение относительно фазовых спектров было верным в доступном для нас тогда диапазоне частот. В самом деле, как видно из рис. 7, ФЧХ фильтра $\hat{a}_3(t)$ в достаточно широком частотном интервале 20–40 Гц почти равна $-\pi/2$. Однако, если проанализировать общий вид фазовой характеристики фильтра нечетной гармоники, то она описывается более сложной, чем константа, функцией. При этом ФЧХ фильтра $\hat{a}_2(t)$ почти равна нулю во всем диапазоне частот, где она определена, что совпадает со сделанным нами ранее предположением о характере фазового спектра фильтров с четными порядковыми номерами.

Характер ФЧХ фильтров оказывается важным для нас по следующей причине. Методика совершенствования алгоритма ОРФ опирается на свойство малой длительности операторов адаптации (понятие малой длительности нам еще предстоит определить). Выше мы уже отметили, что эффективная длительность сигнала определяется, в первую очередь, сложностью его фазовой характеристики, и мы предполагали, что фильтры имеют минимальную длину, т. к. вторая производная фазового спектра фильтра с ФЧХ, равной нулю или константе $\pm\pi/2$, равна нулю. Теперь же, хотя мы и пришли к заключению, что ФЧХ описываются более сложными функциями, очевидно, что эти функции достаточно гладкие в том смысле, что имеют малое максимальное значение модуля второй производной. По крайней мере, их ФЧХ гладкие настолько, что эффективная длина фильтров не превосходит 300 мс (см. рис. 5), и этого окажется заведомо достаточно для наших дальнейших построений.

ПРОБЛЕМЫ ФОКУСИРОВКИ РЕАЛЬНОГО ВИБРОСИГНАЛА

Вторым предметом, который нам предстоит изучить, является возможность фокусировки реального искаженного вибросейсмического сигнала в процессе перехода от виброграммы к коррелограмме. Если сигнал отраженной волны на виброграмме осложнен гармониками, и если для корреляции применить теоретический свип-сигнал $q_1(t)$, то на результате будут заметны так называемые

корреляционные шумы, являющиеся ФВК гармоник старшего порядка и теоретического свип-сигнала. В самом деле, из выражения (1) следует

$$q_1(-t) * q(t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) * q_m(t) * q_1(-t)$$

или

$$q_1(-t) * q(t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) * c_{m1}(t), \quad (6)$$

где $c_{m1}(t)$ – ФВК m -й и 1-й гармоник. При этом желаемым результатом корреляции является АКФ первой гармоники $c_{11}(t)$. Если переписать (6) с учетом того, что $a_1(t) = \delta(t)$, то получим

$$q_1(-t) * q(t) = c_{11}(t) + \sum_{m=2}^M a_m(t) * c_{m1}(t).$$

Сумма в правой части последнего равенства представляет собой помеху, которая проявляется на коррелограмме в виде интерференции ЛЧМ-сигналов, предшествующих по временной координате сфокусированному импульсу $c_{11}(t)$ (подробный анализ свойств корреляционных шумов такой природы приведен в работе [Денисов, Егоров, 2019б]).

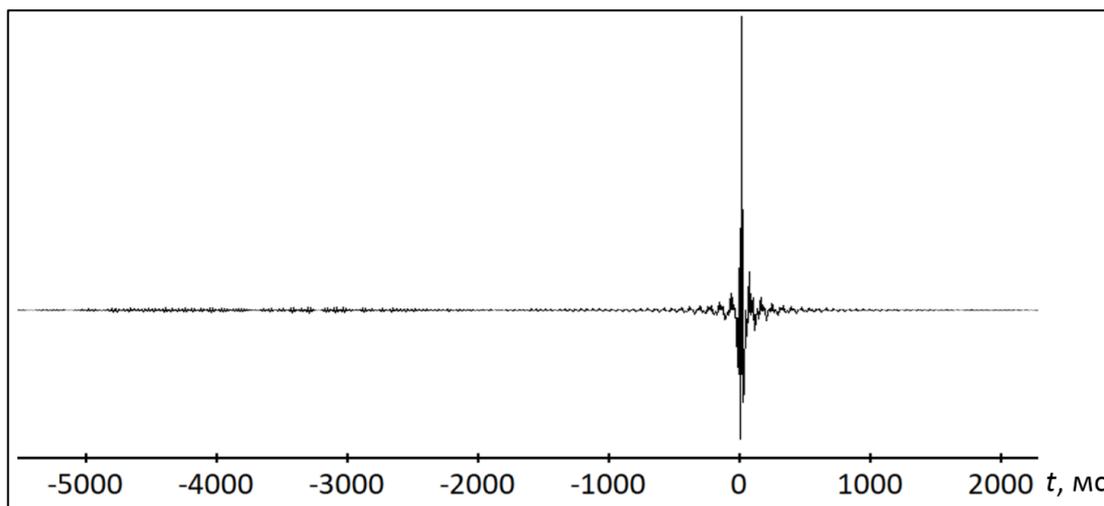


Рис. 8. Корреляция реального сигнала толкающего усилия с теоретическим свипом основного тона. По вертикали отложены относительные амплитуды

На рисунке 8 показан результат корреляции реального импульса толкающего усилия с теоретическим свип-сигналом. Уровень корреляционных шумов оказывается достаточно низким. Мы связываем это с тем, что в полевых условиях сигнал записывается при помощи датчика, расположенного на плите, поэтому он отличается (как правило, весьма значительно), от того сигнала, который проходит в глубь среды и взаимодействует с глубинными границами и который приходится фокусировать с целью получения коррелограммы. Регистрируемый сигнал толкающего усилия не распространяется через ВЧР и не наследует связанных с ней искажений. Наблюдаемый на практике уровень гармоник на сейсмограммах значительно превосходит тот, с которым мы имеем дело, изучая сигналы, записанные на

плите. В первую очередь, это относится к четным гармоникам, проявление которых обычно связывают с эффектами взаимодействия плиты с грунтом и нелинейными волновыми эффектами в верхнем слое почвы, в то время как нечетные гармоники обусловлены самой конструкцией вибрационной установки [Ollivrin, Tellier, 2019]. Как известно, в полевых условиях общий уровень гармоник достигает 30 % и выше от уровня свип-сигнала основного тона колебаний (см., например, [Ведерников и др., 2001]), что значительно превосходит уровень помех коррелограммы на рис. 8.

Мы также считаем важным отметить, что сам факт наличия измеренного импульса толкающего усилия не означает, что он может быть успешно применен для решения задачи сжатия вибросейсмического сигнала. И дело здесь не только в том, что, как мы это видели на показанных выше примерах (рис. 2, а и др.), не происходит точной фокусировки сигнала, а остаются сверточные компоненты, которые предстоит скорректировать на последующих этапах обработки. Основная проблема связана с тем, что реальный сигнал, который распространяется в глубь среды и взаимодействует с глубинными границами, неизвестен.

Но даже если предположить, что в полевых условиях удалось зарегистрировать именно тот сигнал, который взаимодействует с глубинными границами, то ни корреляция, ни деконволюция не способны решить задачу фокусировки сигнала. В самом деле, если применить корреляцию, то получим АКФ сигнала $q(t)$, которая в соответствии с (1) записывается как

$$q(t) * q(-t) = \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M c_{nm}(t) * a_n(t) * a_m(-t).$$

Хотя полученная функция по построению является нуль-фазовой, она обладает значительной протяженностью. Наряду с желаемым результатом корреляции $c_{11}(t)$, функция также содержит набор ФВК $c_{nm}(t)$, располагающихся симметрично слева и справа от отсчета нулевого времени, и отстоящих на значительные временные интервалы от этого отсчета. Ситуацию усугубляет тот факт, что шумы корреляции, связанные с отражениями на малых временах регистрации (имеющими повышенную интенсивность за счет того, что на них мало сказывается эффект геометрического расхождения) накладываются на слабые (т. е. ослабленные за счет геометрического расхождения) отражения на больших временах регистрации. Тем самым эффект интерференции маскирует полезные сигналы в целевой зоне.

Если попытаться использовать записанный сигнал толкающего усилия для построения оператора деконволюции $q^{(-1)}(t)$, т. е. такого оператора, что $q(t) * q^{(-1)}(t) = \Pi^{(\omega_1, \omega_2)}(t)$, то возникнут непреодолимые сложности. Дело в том, что он имеет импульсную характеристику бесконечной протяженности. Оценить его, решая оптимизационную задачу с функционалом типа (5) для ограниченного по временной координате оператора, можно лишь приблизительно, а точность аппроксимации будет зависеть от амплитуды гармоник. В работе [Денисов, Егоров, 2019б] мы подробно изучили этот вопрос и показали, что идеальная обратная фильтрация реализуется при помощи рекурсивной процедуры, которая соответствует фильтру деконволюции с бесконечной импульсной характеристикой (так называемый БИХ-фильтр [Рабинер, Гоулд, 1978]). Именно такая рекурсивная схема не только использована при разработке алгоритма ОРФ, но и заложена в его название.

Если для записанного на плите сигнала толкающего усилия можно добиться удовлетворительной фокусировки с минимальным уровнем корреляционных помех (см. рис. 8), то при обработке полевых сейсмограмм, когда общий уровень гармоник сравним по величине с основным сигналом, алгоритмы корреляции и деконволюции не приведут к получению желаемого результата. Более того, в этих ситуациях вообще нельзя использовать сигнал толкающего усилия для построения операторов корреляции или деконволюции, т. к. он по форме может значительно отличаться от истинного импульса отраженной волны. При решении практических задач обработки наиболее перспективным является алгоритм ОРФ, который основан на использовании статистических критериев оценивания реальной формы импульса непосредственно по коррелограмме.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАРМОНИК ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА СИГНАЛА

Наконец, мы подошли к последней теме исследования, где нам предстоит изучить возможность использования гармоник для расширения спектра на примере обработки сигнала толкающего усилия при его фокусировке. О том, что имеется потенциал расширения спектра за пределы диапазона возбуждения свип-сигнала основного тона, можно судить по рис. 1, *з* и *д*, на которых представлены СВАН-колонки по каждой гармонике. Очевидно, что спектры гармоник содержат высокочастотные компоненты, отсутствующие в сигнале основного тона. Так как на рис. 1 амплитудный спектр каждого импульса «размазан» по линейной траектории своей СВАН-колонки, это затрудняет количественную интерпретацию его формы. Поэтому мы провели спектральный анализ по трассам гармоник и показываем его результаты на рис. 9. В связи с тем, что нижняя частота возбуждения колебаний равна 10 Гц, спектры второй и третьей гармоник быстро затухают ниже 20 Гц и 30 Гц соответственно. Верхняя частота возбуждения основного свипа составляет 120 Гц, поэтому потенциально расширение спектра возможно до 240 Гц, если использовать вторую гармонику, и до 360 Гц, если использовать третью гармонику. Однако при проведении цифровой регистрации колебаний применялась антиалясинговая фильтрация, верхняя частота среза которой выбрана меньшей частоты Найквиста, в данном случае 200 Гц при частоте Найквиста 250 Гц. Поэтому на графиках амплитудных спектров гармоник мы почти не видим частот выше 200 Гц, и расширение спектра импульса возможно только до этой частоты.

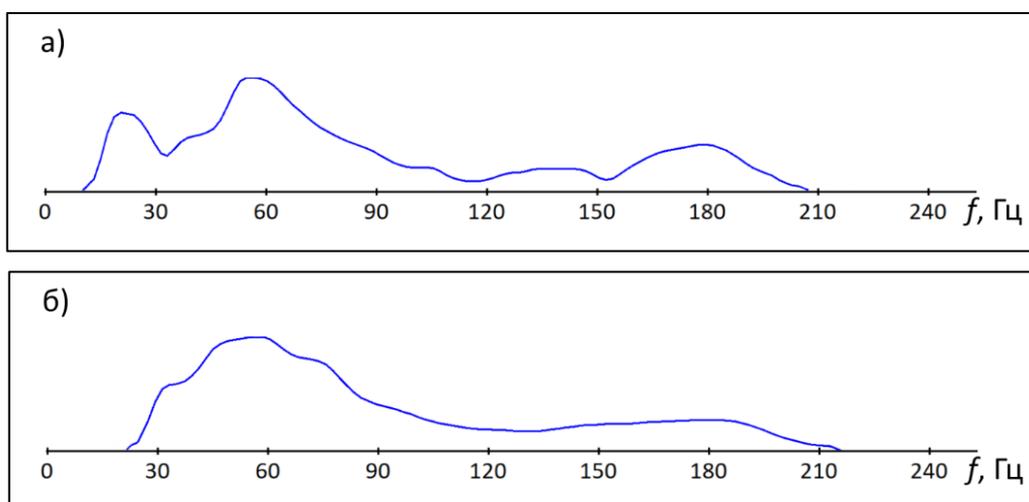


Рис. 9. Амплитудные спектры гармоник, выделенных из исходного сигнала толкающего усилия при помощи нестационарной полосовой фильтрации. *а* – вторая гармоника; *б* – третья гармоника. По вертикали отложены относительные амплитуды. Масштабирующие коэффициенты выбраны произвольно, с целью удобства визуализации.

Имеют место эффекты резонанса, а именно разрастания энергии гармоник в окрестности некоторых частот. Это явление хорошо известно и часто наблюдается при изучении полевых сейсмограмм [Ведерников и др., 2001].

Чтобы прийти к желаемому сигналу с расширенным спектром, которым является полосовой фильтр с частотами среза 10–200 Гц, и который мы обозначим через $\Pi^{(10,200)}(t)$ (т. е. заменив для простоты обозначений в Π циклическую частоту на линейную), требуется вначале разделить сигнал и каждую его гармонику, которую мы планируем использовать. Имитируя ситуацию, с которой приходится иметь дело при обработке полевых сейсмограмм, вместо нестационарной полосовой фильтрации для такого разделения применяем алгоритм ОРФ. На первом шаге получим коррелограмму из виброграммы, в качестве которой здесь выступает сигнал толкающего усилия. Прогнозируем гармоники при помощи свертки коррелограммы с ФВК $c_{m1}(t)$, после чего производим адаптивное вычитание спрогнозированных моделей помехи. В результате имеем коррелограмму, очищенную от гармоник. Смоделируем сигнал основного тона, присутствующий в интерференции с гармониками в сигнале толкающего усилия, при помощи свертки очищенной коррелограммы с теоретическим свипом первой гармоники. После этого вычтем этот сигнал из виброграммы. В результате имеем интерференцию гармоник порядка от второго и выше, и в такой виброграмме вторая гармоника стала младшей. Если она, к тому же, оказывается наиболее интенсивной, то теперь алгоритм ОРФ может быть применен для решения задачи отделения этой гармоники от остальных. (Если это не так, то ОРФ применяется для отделения наиболее интенсивной гармоники.) Повторяя процедуру, получим отдельные записи по каждой гармонике, начиная с первого до M -го порядка, которые, как и прежде, обозначим через $s_m(t)$, $m = 1, \dots, M$. Количество выделенных гармоник выбирается произвольно (обычно контролируется отношение сигнал/шум, которое, как правило, убывает с увеличением порядка гармоники). Более подробно последовательность действий изложена в цитированных выше публикациях.

Применим к каждой $s_m(t)$ ретросвертку с $q_m(t)$ и получим сфокусированный сигнал m -й гармоники $\mathfrak{z}_m(t)$. Для того, чтобы из набора таких записей получить одну с расширенным спектром импульса и максимальным отношением сигнал/шум, сформируем функционал

$$\hat{g}_m(t) = \arg \min_{\tilde{g}_m(t)} \sum_t \left(\Pi^{(10,200)}(t) - \sum_{m=1}^M \tilde{g}_m(t) * \mathfrak{z}_m(t) \right)^2, \quad (7)$$

где $\hat{g}_m(t)$ – искомый M -канальный оператор.

Решение оптимизационной задачи (7) хорошо известно. Если пренебречь краевыми эффектами, то в результате дифференцирования функционала, фигурирующего в правой части этого выражения, приходим к системе линейных уравнений с блочно-теплицевой матрицей. Для ее решения разработан многоканальный аналог алгоритма Левинсона [Робинсон, Трейтел, 1980]. В результате получаем оптимальный многоканальный фильтр $\hat{g}_m(t)$ (в нашем случае было выбрано $M = 3$), после применения которого к трассам выделенных гармоник и суммирования результатов, приходим к искомому сигналу с расширенным спектром.

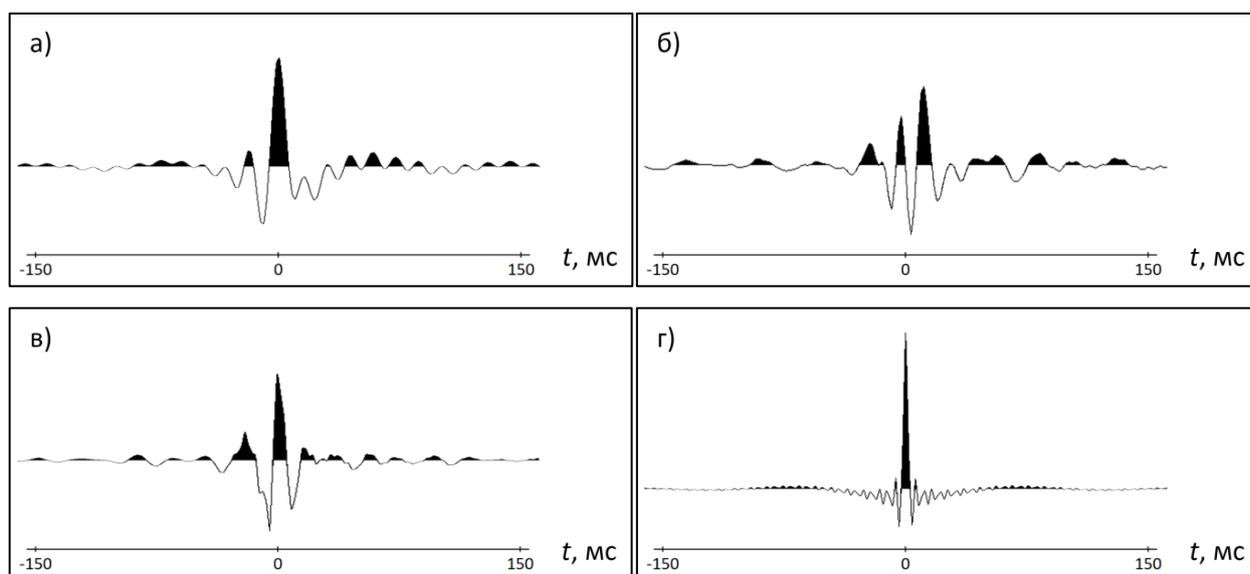


Рис. 10. Сфокусированные импульсы гармоник, выделенных из сигнала толкающего усилия при помощи алгоритма ОРФ: *а* – гармоника первого порядка; *б* – гармоника второго порядка; *в* – гармоника третьего порядка. Полученный импульс с расширенным спектром (*г*). По вертикали отложены относительные амплитуды.

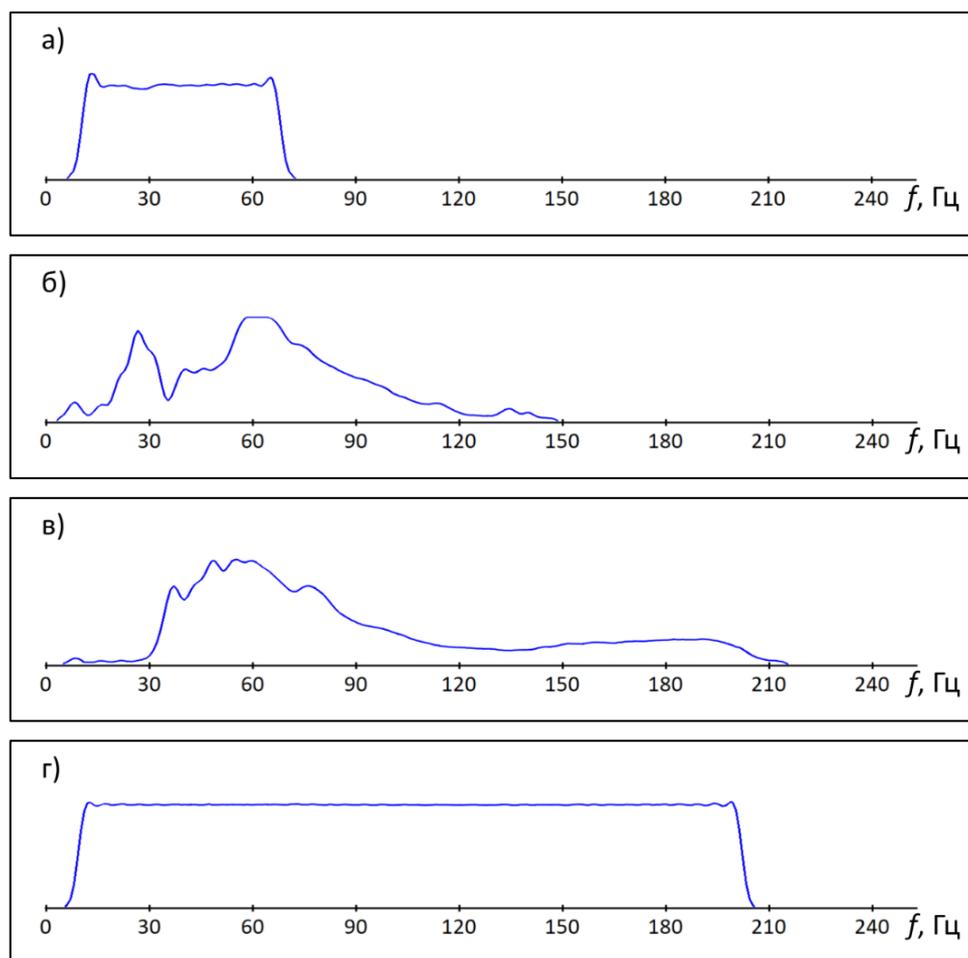


Рис. 11. Амплитудные спектры сигналов, показанных на рис. 10: *а* – гармоника первого порядка; *б* – гармоника второго порядка; *в* – гармоника третьего порядка, *г* – амплитудный спектр импульса с расширенным спектром. По вертикали отложены относительные амплитуды.

На рисунке 10 показаны сфокусированные гармоники, а также полученный импульс. На рисунке 11 представлены их спектральные характеристики. Так как мы условились ограничить анализ первой гармоники частотой 70 Гц, то выделенная вторая гармоника содержит частоты до 140 Гц. Спектральная характеристика третьей гармоники могла бы быть насыщена частотами до 210 Гц, однако в результате антиалаясинговой фильтрации она ограничена частотой 200 Гц. Полученный импульс имеет симметричную форму, а также почти равномерную АЧХ в расширенном частотном диапазоне.

Понятно, что при решении практических задач мы не будем иметь дело со столь идеализированной ситуацией, когда доступен изолированный сигнал. Сейсмическая трасса всегда представляет собой сложную интерференционную картину. Тем не менее, алгоритм ОРФ рассчитан именно на обработку виброграмм и коррелограмм, поэтому он сохранит свою работоспособность, и это мы ранее демонстрировали на полевых примерах. Другое дело, что трассы выделенных гармоник будут характеризоваться не только различным спектральным составом, но также и различным отношением сигнал/шум. Это необходимо учитывать при построении оптимальных многоканальных фильтров, тем более, что наземные вибросейсмические данные всегда осложнены весьма интенсивными помехами. Также важно иметь в виду, что шум на трассах, полученных по гармоникам разных порядков, не является независимым (это следует учесть при записи функционала и, как следствие, при формировании блочной матрицы системы уравнений). В самом деле, если имеется одна трасса виброграммы, то присутствующая на ней помеха преобразуется в помеху на коррелограммах, полученных из этой виброграммы для гармоник различного порядка, как результат фильтрации операторами с различными импульсными характеристиками. Коррелограммы участвуют в формировании функционала типа (7), записанного для расширения спектра суммарной трассы, однако содержащиеся в них помехи оказываются статистически зависимыми. Построенный многоканальный адаптивный фильтр позволит оптимальным образом просуммировать полученный набор коррелограмм, учитывая отношение сигнал/шум каждой трассы для каждой частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящего исследования были изучены три основных темы, и по результатам изучения сделаны следующие выводы. Во-первых, адаптивные фильтры, которые применяются в задаче вычитания спрогнозированных гармоник из коррелограмм, имеют короткие импульсные характеристики, заведомо не превосходящие по длительности 300 мс. Здесь справедливость этого утверждения была проверена при анализе одного полевого сигнала толкающего усилия. Однако наш опыт исследования таких сигналов (а также опыт непосредственного статистического оценивания фильтров по полевым виброграммам) свидетельствует о том, что оно не теряет корректности и в прочих ситуациях. Во-вторых, при наличии гармонических искажений сигнала ни корреляция, ни деконволюция не являются оптимальным способом перехода от виброграммы к коррелограмме. Корректным способом работы в такой ситуации является предварительное разделение сигнала и гармоник. С этой целью мы использовали алгоритм ОРФ. В-третьих, выделенные при помощи ОРФ (или иного алгоритма) гармоники могут быть использованы для расширения спектра сигнала.

Наша следующая работа, продолжающая исследования в области гармонических искажений вибросигналов и использующая полученные здесь выводы, будет посвящена вопросам, связанным с повышением статистической надежности способов адаптивного разделения сигнала и гармоник по исходным виброграммам и коррелограммам.

После отделения сигнала основного тона от гармоник к полученной виброграмме основного тона применяется корреляция со свипом первой гармоники, в результате чего получим коррелограмму, свободную от гармонических искажений. Если ставить задачу расширения спектра сигнала, то следует из виброграммы гармоник, полученной на предыдущем этапе, последовательно выделить вторую, третью и т. д. гармоники, используя алгоритм ОРФ для их разделения. Коррелируя каждую такую виброграмму с соответствующей ей функцией гармоники, получим набор коррелограмм, который затем нужно оптимальным образом осреднить. За критерий оптимальности следует принять требование наибольшего расширения спектра при сохранении максимального отношения сигнал/шум на каждой частоте. Иначе говоря, речь идет о построении многоканального оптимального фильтра.

Авторы благодарят Zhouhong Wei за предоставленные полевые записи толкающих усилий вибрационных установок и за разрешение на демонстрацию результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- Боганик Г.Н., Гурвич И.И.** Сейсморазведка. – Тверь: АИС, 2006. – 744 с.
- Варакин Л.Е.** Теория сложных сигналов. – М.: Советское радио, 1970. – 376 с.
- Ведерников Г.В., Максимов Л.А., Жарков А.В.** Исследование кратных гармоник вибросигналов // Геофизика. – 2001. – Спецвыпуск к 30-летию «Сибнефтегеофизики». – С. 33–38.
- Гоноровский И.С.** Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
- Денисов М.С., Шнеерсон М.Б.** Использование гармоник для расширения спектрального состава волн в вибрационной сейсморазведке. Часть 2 // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 3. – С. 36–54.
- Денисов М.С., Шнеерсон М.Б.** О природе гармоник в вибросейсмическом методе разведки и возможности их использования для расширения спектра сигнала // Геофизика. – 2018. – № 3. – С. 24–27.
- 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., Егоров А.А., Шнеерсон М.Б.** Опробование алгоритма оптимизационной рекурсивной фильтрации для подавления гармоник на модельных и полевых коррелограммах // Геофизические технологии. – 2019. – № 2. – С. 54–66, doi: 10.18303/2619-1563-2019-2-54.
- Кондратьев И.К.** Линейные обрабатывающие системы в сейсморазведке. – М.: Недра, 1976. – 175 с.
- Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
- Рабинер Л., Гоулд Б.** Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
- Робинсон Е., Трейтел С.** Цифровая обработка сигналов в геофизике / В кн. Применение цифровой обработки сигналов. Под ред. Э. Оппенгейма. – М.: Мир, 1980. – С. 486–544.
- Сильвия М.Т., Робинсон Э.А.** Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ. – М.: Недра, 1983. – 447 с.
- Denisov M.S., Egorov A.A., Kurin E.A., Shneerson M.B.** Vibroseis harmonic noise elimination based on optimized recursive filtering // 81st EAGE Conference and Exhibition: Extended Abstracts (3–6 June 2019, London, UK). – EAGE, London, 2019. – P. 1–5, doi: 10.3997/2214-4609.201900843.

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.

Lamoureux M.P. Non-linear Vibroseis models for generating harmonics // *CREWES Research Report* – 2014. – Vol. 26. – P. 1–11.

Ollivrin G., Tellier N. SmartLF for robust and straightforward reduction of low-frequency distortion // 89th SEG Annual Meeting and Exposition: Expanded Abstracts. – 2019. – P. 17–20.

Seriff A.J., Kim W.H. The effect of harmonic distortion in the use of vibratory surface sources // *Geophysics*. – 1970. – Vol. 35 (2). – P. 234–246, doi: 10.1190/1.1440087.

REFERENCES

Boganik G.N., Gurvich I.I. *Seismic Exploration* [in Russian]. – AIS, Tver, 2006. – 744 p.

Denisov M.S., Shneerson M.B. Utilization of harmonics to broaden the bandwidth in Vibroseismic. Part 2. // *Seismic Technologies*. – 2017. – Vol. 3. – P. 36–54.

Denisov M.S., Shneerson M.B. Nature of harmonics in the Vibroseis method and the possibility of their utilization to broaden the signal frequency band // *Geofizika*. – 2018. – Vol. 3. – P. 24–27.

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., Kurin E.A., Shneerson M.B. Vibroseis harmonic noise elimination based on optimized recursive filtering // 81st EAGE Conference and Exhibition: Extended Abstracts (3–6 June 2019, London, UK). – EAGE, London, 2019. – P. 1–5, doi: 10.3997/2214-4609.201900843.

Denisov M.S., Egorov A.A., Shneerson M.B. Testing the optimization-based recursive filtering algorithm to suppress harmonics on model and field correlograms // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. – 2019. – Vol. 2. – P. 54–66, doi: 10.18303/2619-1563-2019-2-54.

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.

Gonorovsky I.S. *Radio engineering circuits and signals* [in Russian]. – Radio and communication, Moscow, 1986. – 512 p.

Kondratiev I.K. *Linear processing systems in seismic exploration* [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1976. – 175 p.

Korn G., Korn T. *Handbook of mathematics* [in Russian]. – Nauka, Moscow, 1974. – 832 p.

Lamoureux M.P. Non-linear Vibroseis models for generating harmonics // *CREWES Research Report* – 2014. – Vol. 26. – P. 1–11.

Ollivrin G., Tellier N. SmartLF for robust and straightforward reduction of low-frequency distortion // 89th SEG Annual Meeting and Exposition: Expanded Abstracts. – 2019. – P. 17–20.

Rabiner L., Gould B. *Theory and application of digital signal processing* [in Russian]. – Mir, Moscow, 1978. – 848 p.

Robinson E., Treitel S. Digital signal processing in geophysics, in: Oppenheim E. (Ed.), Application of digital signal processing [in Russian]. – Mir, Moscow, 1980. – P. 486–544.

Seriff A.J., Kim W.H. The effect of harmonic distortion in the use of vibratory surface sources // Geophysics. – 1970. – Vol. 35 (2). – P. 234–246, doi: 10.1190/1.1440087.

Sylvia M.T., Robinson E.A. Inverse filtering of geophysical time series in oil and gas exploration [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1983. – 447 p.

Varakin L.E. Theory of complex signals [in Russian]. – Soviet Radio, Moscow, 1970. – 376 p.

Vedernikov G.V., Maksimov L.A., Zharkov A.V. Study of multiple harmonics of vibroseis signals // Geofizika. – 2001. – Special Issue to 30th Anniversary of “Sibneftegeophysica”. – P. 33–38.

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, e-mail: zyrokin@yandex.ru.

*Статья поступила в редакцию 5 мая 2022 г.,
принята к публикации 27 июня 2022 г.*