*Геофизические технологии*, № 1, 2019, с. 72–83 www.rjgt.ru

doi: 10.18303/2619–1563–2019–1–72 УДК 550.834

# ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА, ОСЛОЖНЕННОГО ГАРМОНИКАМИ

**М.С. Денисов, А.А. Егоров**

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

*e-mail: denisovms@gmail.com*

Решается задача построения математической модели вибросейсмического сигнала, искаженного гармониками. Для аппроксимации используется разложение по базисным функциям. Коэффициенты разложения по базису оказываются частотно зависимыми, т. е. вместо множителей применяются фильтры. Полученная модель станет отправной точкой дальнейших исследований, проводимых с целью разработки алгоритмов подавления гармонических искажений или их использования для расширения частотного диапазона сигнала.

*Вибрационная сейсморазведка; гармоники; аппроксимация; разложение по базису*

# CONSTRUCTING A MODEL OF VIBROSEIS SIGNAL COMPLICATED BY HARMONICS

**M.S. Denisov, A.A. Egorov**

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

*e-mail: denisovms@gmail.com*

We solve the problem of constructing the mathematical model of a vibroseis signal distorted by harmonics. Basis function decomposition is used for the approximation. The basis decomposition coefficients are frequency-dependent, i. e. filters are applied instead of multipliers. The resulting model will be the starting point for further research aimed at developing processing algorithms for the suppression of harmonic distortion, or for utilizing the harmonics to extend the frequency range of the signal.

*Vibroseis; harmonics; approximation; decomposition*

## ВВЕДЕНИЕ

Процесс возбуждения вибросейсмических колебаний всегда сопровождается появлением так называемых гармонических шумов, которые, следуя традиции, мы будем называть просто *гармониками* [Теория и практика…, 1998]. В литературе встречается множество объяснений этого эффекта. К ним относятся, в том числе, условия контакта плиты с грунтом, конструкция вибратора и пр. Здесь мы не имеем нужды останавливаться на этом вопросе, так как нас не будет интересовать причина появления гармоник. Дело в том, что процесс построения модели помех не зависит от их природы. На основании такой модели в дальнейшем мы приступим к разработке алгоритма подавления гармоник, а также алгоритма их использования для расширения спектра сигнала.

**© М.С. Денисов, А.А. Егоров, 2019**

Хотя нашей конечной целью является получение алгоритмов обработки вибросейсмических данных, мы не имеем возможности ограничиться простой ссылкой на какой-либо литературный источник, в котором содержалась бы удовлетворительная информация о модели гармоник. К сожалению, во всех известных нам публикациях очень мало места уделяется анализу модели. Там же, где такой анализ проводится, зачастую предлагаются недостоверные рассуждения и выводы. Поэтому мы посчитали необходимым предпринять специальное исследование, результаты которого изложены в настоящей статье.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача, которая перед нами стоит, заключается в построении математической модели реального искаженного вибросигнала. В дальнейшем будем считать, что уходящий в глубь земли импульс неизвестен, и нужно получить его оценку. Поэтому математическое представление сигнала должно оказаться максимально компактным. Иначе говоря, нашей целью является получение модели, адекватно описывающей наблюдаемые на практике эффекты, и при этом содержащей как можно меньшее число искомых параметров. Поясним это требование подробнее. При получении оценки формы сигнала можно было бы вообще обойтись без параметризации, просто оценивая каждый его отсчет (впрочем, и такое описание сигнала оказывается своеобразной его параметризацией в виде последовательности отсчетов). В таком случае, однако, мы имели бы дело с тысячами неизвестных величин.

В качестве альтернативных параметрических моделей назовем разложение сигнала по базису. В роли базиса может выступать, к примеру, набор гармонических функций. Тогда мы имеем дело с преобразованием Фурье, и неизвестными величинами окажутся коэффициенты разложения, т. е. отсчеты спектральной характеристики. Понятно, что выбор такого базиса не приводит к компактности представления. В задаче аппроксимации функций часто используют полиномы. Но и выбор такого базиса приведет к необходимости работы с тысячами неизвестных коэффициентов.

К счастью, ситуация, с которой приходится иметь дело в вибрационной сейсморазведке, не столь безнадежна. Мы располагаем априорной информацией о форме сигнала: он близок к опорному свипу, хотя и не совпадает с ним. Таким образом, в качестве одной из базисных функций выберем теоретический свип-сигнал, а остальные базисные функции будут призваны обеспечить возможность учета отклонений от него.

Характерный фрагмент реального монохроматического виброимпульса частоты 50 Гц приводится в статье [Ведерников и др., 2001], и мы показываем его, заимствуя этот рисунок (рис. 1). Очевидно, что записанный в процессе полевых наблюдений сигнал отличается от теоретического. Он асимметричен и характеризуется наличием искажений амплитуд в области пиковых нагрузок.

**Рис. 1.** Фрагменты реального и теоретического сигналов. По вертикальной оси отложены относительные амплитуды, по горизонтали – номера отсчетов

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Очень часто, в том числе в классических работах, например, [Seriff, Kim, 1970], модель дискретного вибросейсмического сигнала записывается в виде

$$q(t) = \sum_{m=1}^{\infty} a_m q_m(t), \tag{1}$$

где $q_m$ – $m$-я гармоника, $a_m$ – весовые коэффициенты, $t$ – индекс дискретного времени. В качестве основного свипа $q_1$ используется линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал [Боганик, Гурвич, 2006], его амплитуда равна условной единице $a_1 \equiv 1$. Параметры сигнала: $f_{\min}$ – начальная мгновенная частота колебаний, $\mu$ – глубина модуляции, определяющая скорость линейного изменения частоты,

$$\mu = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2T},$$

$f_{\max}$ – максимальная мгновенная частота колебаний, $T$ – длительность свипа:

$$q_m(t) = \begin{cases} \sin 2\pi m(f_{\min} + \mu t)t, t \in (0,T) \\ 0, t \notin (0,T) \end{cases}. \tag{2}$$

Сразу же заметим, что при помощи представлений (1) и (2) невозможно корректно аппроксимировать реальные вибросигналы, отягощенные гармониками. Так, например, в работе [Денисов, Шнеерсон, 2017] приблизить модельный сигнал к реальному удалось в результате замены четных гармоник с синусов на косинусы (аналогичные выводы сделаны в научном отчете CREWES [Lamoureux, 2014]):

$$q(t) = \sum_{m=1,3,\ldots} a_m \sin 2\pi m(f_{\min} + \mu t)t + \sum_{m=2,4,\ldots} a_m \cos 2\pi m(f_{\min} + \mu t)t.$$

На рис. 2, аналогичном соответствующему рисунку из указанной работы, представлены графики отдельных гармоник, а также их сумма. Каждая $m$-я гармоника на рисунке показана с соблюдением относительной амплитуды (т. е. умножена на свой весовой коэффициент $a_m$), а также фазы (1-я и 3-я гармоники – синусы, 2-я гармоника – косинус). На сумме гармоник успешно воспроизводится эффект несимметричности импульса, а также свойственные ему искажения формы. Помимо этого, из приведенных иллюстраций можно сделать вывод, что даже небольшим количеством членов разложения по базису гармоник можно успешно описывать интересующие нас эффекты.

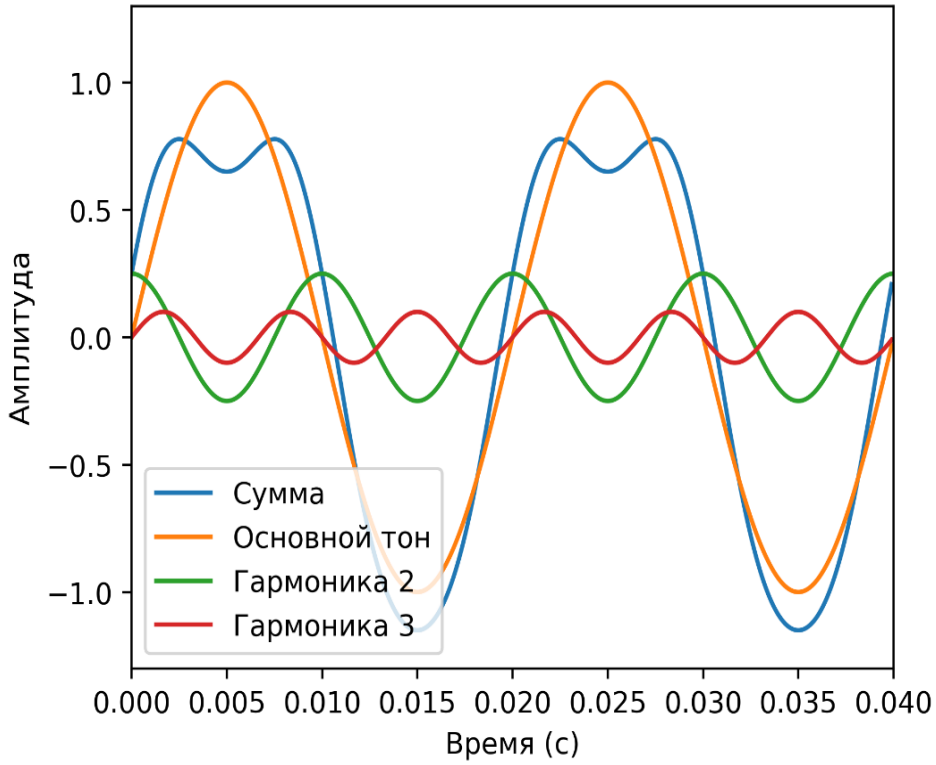


**Рис. 2.** Аппроксимация сигнала сложного вибровоздействия при помощи разложения по набору нечетных и четных гармоник с порядковыми номерами 1, 2, 3

В такой ситуации мы могли бы использовать универсальную запись модели в виде

$$q(t) = \mathrm{Re}\left\{\sum_{m=1}^{\infty} a_m \exp(j2\pi m(f_{\min} + \mu t)t)\right\},$$

где $a_m$ – комплексные весовые коэффициенты, $j = \sqrt{-1}$. Однако, как будет показано в дальнейшем, и такое представление сигнала страдает от неполноты, делая невозможной обработку полевых виброграмм и коррелограмм на его основе.

Мы будем использовать следующую модель:

$$q(t) = \sum_{m=1}^{\infty} a_m(t) * q_m(t), \qquad (3)$$

где $q_m$ определяются равенством (2), а звездочка обозначает свертку. Иначе говоря, вместо весовых коэффициентов $a_m$ будем применять фильтры $a_m(t)$. Упомянутая ранее нормировка первой гармоники на единицу в данном случае приобретает смысл $a_1(t) \equiv \delta(t)$. При этом мы не используем в виде базисных функций (2) косинусы, так как фазовая подвижка, отличающая косинус от синуса, при необходимости будет обеспечена фильтрами $a_m(t)$.

Так как верхний предел в сумме (3) равен бесконечности, то у читателя может возникнуть закономерный вопрос о количестве членов разложения, требуемых для корректной аппроксимации реального вибросигнала. Такой вопрос традиционно ставится в задачах приближения функций. Это позволяет проверить, насколько удачно выбран базис для достижения компактной аппроксимации, а также имеется ли сходимость ряда, т. е. стремятся ли к нулю коэффициенты разложения (в нашем случае – фильтры) при увеличении их порядкового номера. Фактически, такое исследование уже было проведено, и его результаты подробно описаны в упомянутой выше статье [Ведерников и др., 2001]. В результате анализа многочисленных вибросейсмических сигналов, полученных в разнообразных условиях возбуждения и приема, авторы работы делают вывод, что для практических нужд достаточно ограничиться тремя (реже четырьмя) членами разложения. Заметим, что это согласуется с заключениями, сделанными и в иных геофизических источниках, которые мы здесь не цитируем.

Сейсмическая трасса $v(t)$ описывается сверткой сложного импульса (1) с последовательностью коэффициентов отражения $r(t)$ и фильтром $p(t)$:

$$v(t) = r(t) * q(t) * p(t), \tag{4}$$

где $p(t)$ описывает эффект влияния верхней части разреза (ВЧР) на сигнал: при прохождении ВЧР сигнал преимущественно теряет высокочастотные компоненты. В выражении (4) мы пренебрегли влиянием аддитивного шума.

В результате корреляции виброграммы $v$ с опорным свипом $q_1$ получаем коррелограмму $z_1$:

$$z_1(t) = v(t) * q_1(-t). \tag{5}$$

Аналогично можно получить $z_2$, $z_3$ и т. д.

Нам также понадобятся спектральные эквиваленты выписанных выше формул. Условимся обозначать спектры заглавными буквами. Например, преобразование Фурье функции $v(t)$ будем записывать как $V(\omega)$. Формулы, которые мы будем выписывать, справедливы для $\omega \geq 0$. Соответствующие выражения для $\omega < 0$ легко получить на основании свойств симметрии спектров действительных функций [Оппенгейм, Шафер, 1979]. Спектральный эквивалент модели (3) имеет вид

$$Q(\omega) = \sum_{m=1}^{\infty} A_m(\omega) Q_m(\omega). \tag{6}$$

Теперь нам следует коснуться вопроса расчета спектральной характеристики ЛЧМ сигнала. Непосредственная подстановка выражения (2) в формулу прямого преобразования Фурье приводит к достаточно громоздким выкладкам, которые для случая $m = 1$ подробно анализируются в книге [Гоноровский, 1986], где показано, что при соблюдении условия

$$T(f_{\max} - f_{\min}) >> 1 \qquad (7)$$

можно воспользоваться асимптотическим выражением, которое мы здесь обобщили на случай $m \geq 1$:

$$Q_m(\omega) \approx \begin{cases} \dfrac{\sqrt{\pi T}}{\sqrt{2m}\sqrt{\omega_{\max} - \omega_{\min}}} \exp j\left( \dfrac{\pi}{4} - \dfrac{T\left( \omega - m\dfrac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} \right)^2}{m(\omega_{\max} - \omega_{\min})} \right), \omega \in (m\omega_{\min}, m\omega_{\max}) \\ 0, \omega \in (m\omega_{\min}, m\omega_{\max}) \end{cases}. \qquad (8)$$

В задачах вибрационной сейсморазведки обычно $T \geq 6$ с, $f_{\max} - f_{\min} \geq 80$ Гц, поэтому условие (7) оказывается заведомо справедливым.

Как и следовало ожидать, каждая $m$-я гармоника имеет равномерный амплитудный спектр в пределах диапазона частот $m\omega_{\min} \leq \omega \leq m\omega_{\max}$. Фазовый спектр гармоник описывается параболой.

При переходе от виброграммы к коррелограмме (по основному свипу $q_1(t)$) импульс $q(t)$ претерпевает свертку с $q_1(-t)$:

$$q(t) * q_1(-t) = \sum_{m=1}^{\infty} a_m(t) * q_m(t) * q_1(-t). \qquad (9)$$

Детерминированные (т. е. неслучайные) функции $c_{ml}(t) = q_m(t) * q_l(-t)$ будем называть функциями взаимной корреляции $m$-й и $l$-й гармоник. В силу свойства ассоциативности оператора свертки форму импульса (9) представим в виде

$$q(t) * q_1(-t) = \sum_{m=1}^{\infty} a_m(t) * c_{m1}(t).$$

Для получения спектральной характеристики взаимной корреляции $c_{ml}(t)$ следует $Q_m(\omega)$ умножить на $\bar{Q}_l(\omega)$, где черта над буквой обозначает комплексное сопряжение. Обе функции, $Q_m(\omega)$ и $\bar{Q}_l(\omega)$, определяются выражением (8). Впрочем, чтобы не записывать формул повышенной сложности, мы не будем производить явных подстановок и ограничимся лишь комментарием. При умножении этих функций происходит умножение их амплитудных спектров и вычитание (в силу комплексной сопряженности одной из комплексных функций именно вычитание, а не сложение) фазовых спектров. Как это уже было отмечено, амплитудные спектры с высокой степенью точности совпадают с прямоугольниками, определенными соответственно в диапазонах $m\omega_{\min} \leq \omega \leq m\omega_{\max}$ и $l\omega_{\min} \leq \omega \leq l\omega_{\max}$. Для определенности будем считать, что $m > l$. Тогда результат произведения

прямоугольников будет равен константе (значение которой нетрудно получить из (8)) в диапазоне частот $m\omega_{\min} \le \omega \le l\omega_{\max}$ и нулю вне его. Очевидно, что фазовый спектр, определяемый как разность двух парабол, также является параболой. При этом в нее уже не входит постоянная составляющая $\pi/4$.

Но вернемся к модели сигнала, в которой вместо фильтров фигурируют весовые коэффициенты. Мы остановимся на этом вопросе более подробно в силу его принципиальной важности для алгоритмов, которые нам предстоит развивать в последующих публикациях. В наших рассуждениях мы вновь будем опираться на уникальную по количеству проведенных полевых экспериментов и тщательности их постановки работу [Ведерников и др., 2001]. Рис. 3, на котором показаны относительные амплитуды второй и третьей гармоник в зависимости от частоты возбуждения основного тона колебаний, заимствован из этой статьи. Как следует из рисунка, амплитуды гармоник носят частотно-зависимый характер, не повторяя форму амплитудной кривой основного сигнала. Третья гармоника на всех частотах оказывается интенсивнее второй гармоники, при этом формы графиков их относительных амплитуд отличаются. Отсюда мы приходим к заключению, что соотношение амплитуд основного сигнала и гармоник носит частотно-зависимый характер. Более того, такая зависимость различна для второй и третьей гармоник.

Можно заметить, что и основной сигнал имеет неравномерный спектр, т. е. различные возбуждаемые вибратором частоты характеризуются различными амплитудами. Это не входит в противоречие со сделанным нами допущением, что коэффициент $a_1$ не является частотно-зависимым и равен условной единице. Указанный эффект можно легко учесть, включив частотную зависимость основного сигнала в спектральную характеристику оператора $p(t)$.

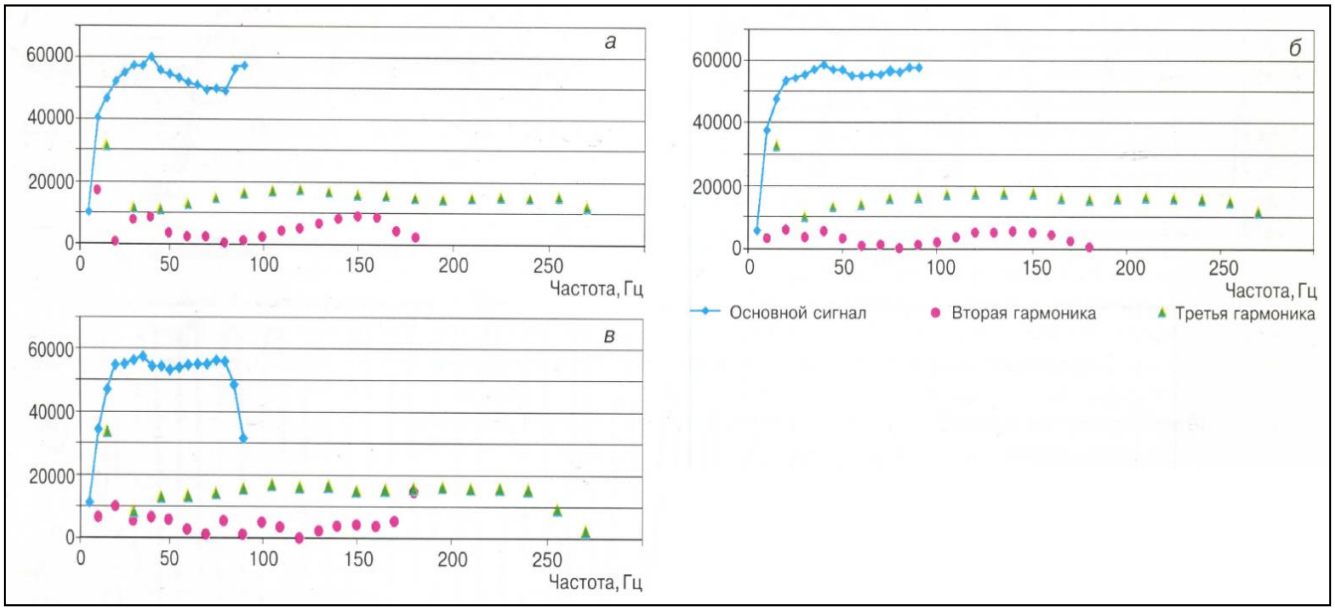


**Рис. 3.** Значения амплитудных спектров основного сигнала и его кратных гармоник при регистрации колебаний вблизи источника:
а – тундра;
б – лед озера;
в – песчаная грива

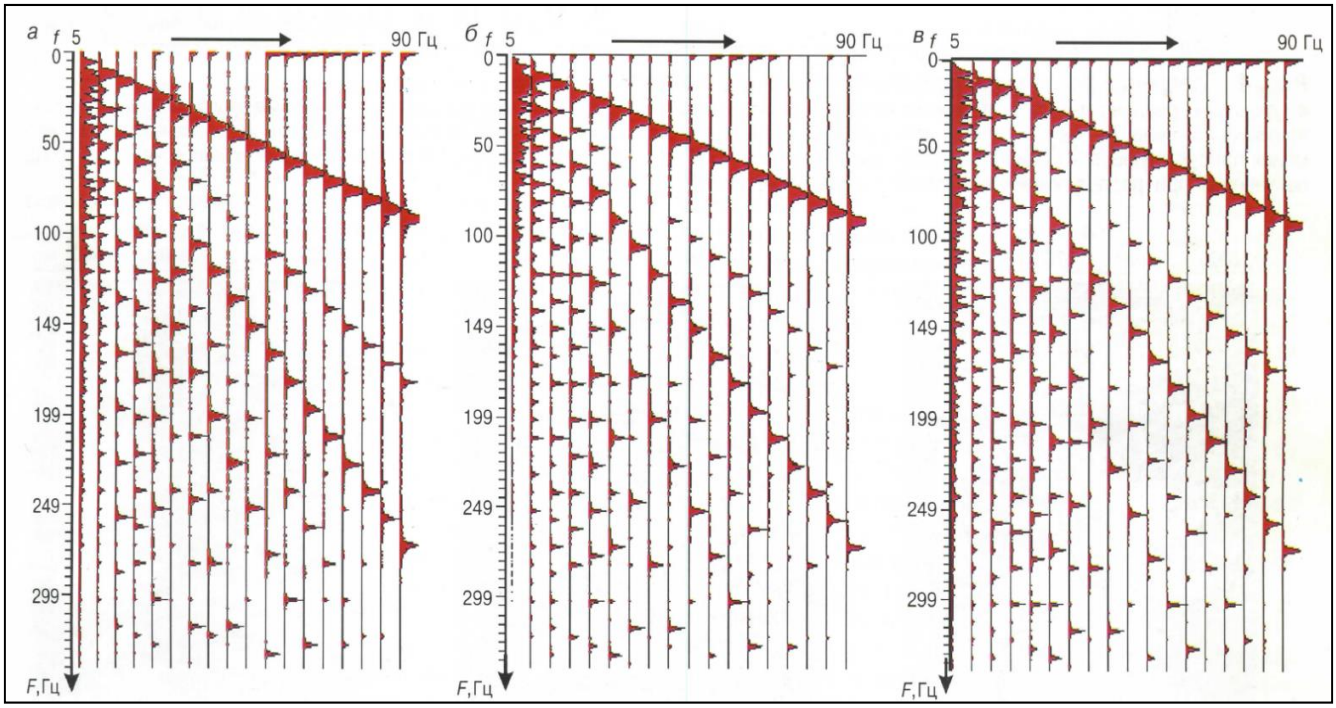


**Рис. 4.** Амплитудные спектры монохромных сигналов (шаг по частоте моносигнала 5 Гц), зарегистрированных вблизи источника:
а – на льду озера;
б – на песчаной гриве;
в – в заболоченной тундре

Сделанные выводы обобщаются и на гармоники более высокого ( $m > 3$ ) порядка. На рис. 4, также заимствованном из статьи [Ведерников и др., 2001], представлены амплитудные спектры трасс, зарегистрированных вблизи источника. Возбуждались монохромные колебания. Выделяется минимум амплитуд на средних частотах четных гармоник, в то время как для нечетных гармоник зависимость амплитуды от частоты более гладкая.

Отсюда мы приходим к заключению, что использование модели (3), в которой вместо множителей $a_m$ используются фильтры $a_m(t)$, является обоснованным. При этом для гармоник различного порядка фильтры, вообще говоря, различны.

Эти выводы подтверждаются в результате изучения полевой виброграммы, любезно предоставленной нам специалистами компании «Башнефтегеофизика» и показанной на рис. 5. Традиционным способом анализа гармоник является применение к трассам волнового поля преобразования Фурье в локальном скользящем окне. В результате такого преобразования приходят к так называемому спектрально-временному представлению (СВП) – рис. 6. Наклонные линии соответствуют гармоникам второго, третьего и т. д. порядков. Амплитуда поля СВП, прослеживаемая вдоль какой-либо из наклонных линий, показывает относительную интенсивность частоты в гармонике. Как следует из рисунка, интенсивности частот для одной гармоники могут существенно отличаться, и характер этих отличий варьируется от одной гармоники к другой. Это подтверждает сделанный выше вывод о необходимости привлечения фильтров.

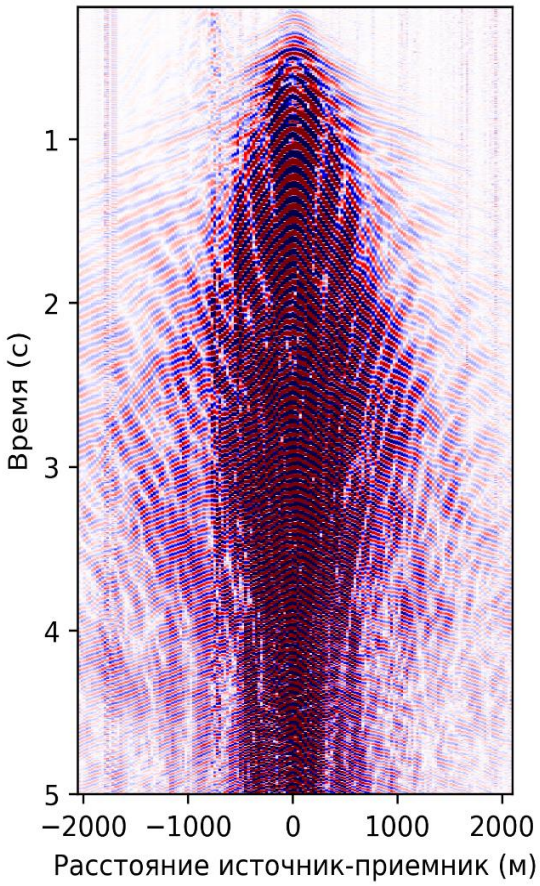


**Рис. 5.** Фрагмент полевой виброграммы, зарегистрированной в результате возбуждения свип-сигнала с граничными частотами 7-125 Гц и длительностью 24 с

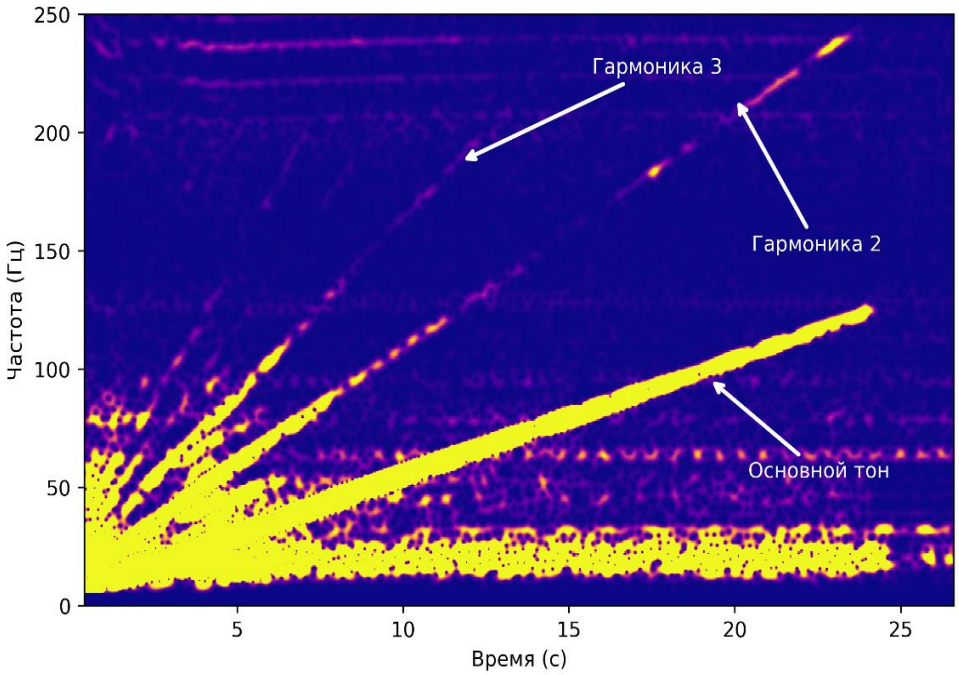


**Рис. 6.** Поле СВП, полученное по полевой сейсмограмме. Выделяются сигналы основного тона колебаний, а также гармоники различных порядков

Но что можно сказать о свойствах этих фильтров? Понятно, что они не могут быть произвольными, иначе появляется неопределенность: фильтр может брать на себя и роль самой базисной функции. Ограничения на сложность операторов фильтрации в процессе получения их оценок будут вводиться нами в дальнейшем при решении задачи адаптивного вычитания гармоник. Пока же мы можем сказать, что фильтры должны иметь почти постоянные фазовые спектры, близкие к нулю (в случае, если в полевой виброграмме гармоника описывается синусом), или к $\pi / 2$ (если гармоника описывается косинусом). Этот вывод сделан нами на основании рис. 2 и комментариев к нему. Амплитудные спектры фильтров являются простыми гладкими функциями. При этом амплитудные спектры фильтров при нечетных гармониках близки к константе. Это следует из рис. 3 и 4 и комментариев к ним.

В заключение заметим, что при получении аппроксимации на рис. 2 (сравнивая его с рис. 1) мы использовали фрагмент монохромного сигнала, поэтому применяли лишь весовые коэффициенты, и фильтры нам не понадобились. С аналогичной ситуацией мы бы столкнулись, если бы аппроксимировали небольшой фрагмент свип-сигнала, в пределах которого нет значительной дифференциации по мгновенной частоте.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Часто приходится слышать или встречать на страницах печатных изданий дискуссии на тему: реальны ли гармоники в вибросейсмическом методе. В связи с этим мы считаем полезным привести комментарий относительно реальных и абстрактных понятий в задачах обработки и интерпретации сигналов. При возбуждении вибрационных колебаний в глубь земли распространяется искаженный импульс $q(t)$, и именно он является той единственной реальностью, которая регистрируется в результате сейсмических наблюдений.

Его математическое описание – отдельная задача, которая решается в каждом конкретном случае, исходя из требований целесообразности; мы вводим ту или иную модель для нашего удобства. Выше мы аппроксимировали сигнал при помощи представления (1), и в таком разложении в качестве базисных функций $q_m(t)$ могут фигурировать не только гармоники. Для одного и того же сигнала существует бесконечно много представлений в виде разложения по набору тех или иных базисных функций, и выбор одного из них определяется спецификой решаемой задачи. В нашем случае этой задачей является оценивание формы сложного импульса, поэтому нам требуется описать его как можно меньшим числом параметров, которые затем будут искомыми величинами.

Очень часто при анализе функций применяют разложение по базису Фурье, и такая процедура называется преобразованием Фурье. Конечно же, это тоже есть лишь одно из возможных математических описаний сигнала. В принципе, можно было бы «работать» и с исходным сигналом, не раскладывая его по базису. Однако если мы будем изучать взаимодействие этого импульса с глубинными неоднородностями, то нам потребуется разложение (1), в котором в виде $q_m(t)$ следует выбрать моночастотные синусы и косинусы, т. е. базисные функции преобразования Фурье. Дело в том, что исследуемая среда реагирует на малоинтенсивное упругое воздействие как линейная система.

Собственными функциями линейной системы являются функции Фурье. Именно поэтому свертка в области времени переходит в произведение спектральных характеристик в частотной области, что позволяет значительно упростить изучение функции отклика среды, проводя ее отдельно для каждой частоты. Если говорить совсем просто, то в ситуации, когда мы по какой-либо причине затрудняемся провести анализ взаимодействия сложного сигнала с системой, мы пытаемся найти такие элементарные функции, реакция системы на каждую из которых может быть легко изучена. Затем сложный сигнал следует представить в виде суперпозиции этих функций, откуда следует, что искомый отклик системы есть суперпозиция откликов на каждую элементарную функцию.

Тем не менее, можно задаться вопросом: реальны ли гармоники как компоненты, из которых состоит сложный вибросейсмический сигнал? Мы переформулируем это вопрос иначе: корректно ли утверждать, что некоторый сигнал состоит из совокупности других сигналов? Например, можно ли сказать, что нулевой сигнал $q(t) \equiv 0$ состоит из двух синусоидальных колебаний одной частоты, но противоположного знака? Вряд ли кто-либо воспримет такое утверждение всерьез. С таким же успехом можно утверждать, что этот же сигнал состоит из произвольного набора разнополярных функций. Поставленный вопрос близок к тематике острой и продолжительной дискуссии, имевшей место в радиотехнике в середине прошлого века, которая касалась реальности существования спектральных составляющих Фурье в сигналах (подробнее об этой дискуссии см. [Финк, 1984]).

Итак, мы не отрицаем реальности гармоник, но утверждаем, что существуют они лишь в нашем воображении как математическая абстракция, обеспечивающая одно из множества возможных описаний эффекта, наблюдаемого в процессе эксперимента.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования мы показали необходимость применения модели (3) для корректной аппроксимации реального вибросигнала, искаженного гармониками. На основании полученной модели будут развиты алгоритмы удаления гармоник и использования гармоник для расширения спектра сигнала.

При практическом использовании модели введенные нами фильтры оказываются неизвестными функциями. Они неизвестны в том числе и потому, что их характер различен для различных условий возбуждения. Таким образом, в дальнейшем нам предстоит решать задачу получения соответствующих оценок.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят И.Р. Ягудина и Р.М. Гафарова (Башнефтегеофизика) за предоставленные полевые виброграммы и разрешение на их демонстрацию, а также М.Б. Шнеерсона (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина) за плодотворные обсуждения.

## ЛИТЕРАТУРА

**Боганик Г.Н., Гурвич И.И.** Сейсморазведка. – Тверь: АИС, 2006. – 744 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.

**Оппенгейм А.В., Шафер Р.В.** Цифровая обработка сигналов. – М.: Связь, 1979. – 416 с.

**Теория** и практика наземной невзрывной сейсморазведки / Под ред. М.Б. Шнеерсона. – М.: Недра, 1998. – 527 с.

**Финк Л.М.** Сигналы, помехи, ошибки… – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.

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

**Seriff A.J., Kim W.H.** The effect of harmonic distortion in the use of vibratory surface sources // Geophysics. – 1970. – Vol. 35, No 2. – P. 234–246.

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

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

*ЕГОРОВ Антон Алексеевич* – геофизик ООО «ГЕОЛАБ». Научные интересы: разработка алгоритмов обработки данных сейсморазведки, полное обращение волновых полей, e-mail: anton21egorov@gmail.com.