

Использование фазового спектра при анализе сейсмических данных и фазовая фильтрация

■ Карапетов Г.А., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва

Аннотация. Анализируются сейсмические сигналы с точки зрения их спектральных характеристик и, в первую очередь, фазовой. Затрагиваются вопросы, касающиеся значения и использования фазы и применения фазовых фильтров в практике обработки сейсмической информации. На примере вибросигнала, показывается та дополнительная информация, которую можно извлечь из фазы. Предлагается “модель-преобразующий” способ фазовой фильтрации.

Введение

Фурье-спектры типичных геофизических сигналов комплексные, и, следовательно, представимы в одной из двух эквивалентных форм: либо действительной и мнимой частей спектра, либо модуля и фазы. Интерпретация данных в первой форме затруднительна и, как правило, не приводит к сколько-нибудь продуктивным результатам. Вторая форма является предпочтительной.

Анализ многочисленных публикаций, посвященных цифровой обработке сейсмических данных, показывает, что при выполнении спектральных преобразований практически повсеместно речь идет об амплитудных спектрах. Про фазовый спектр вспоминают, лишь чтобы констатировать одну из традиционных гипотез о “нулевой” или “минимальной” фазе. К реальной форме сигнала и, как следствие, к получаемым в процессе обработки его оценкам обращаются лишь при инверсии и то, как правило, опосредованно.

О значении фазового спектра имеется лишь небольшое число публикаций [3, 4, 7, 8, 20], в которых, однако, показывается его несравненно большее влияние на форму сигнала по сравнению с амплитудным спектром. Более того, определению достаточно уверенных оценок обеих компонент спектра также не уделяется должного внимания.

К сожалению, оценка фазового спектра является существенно более сложной

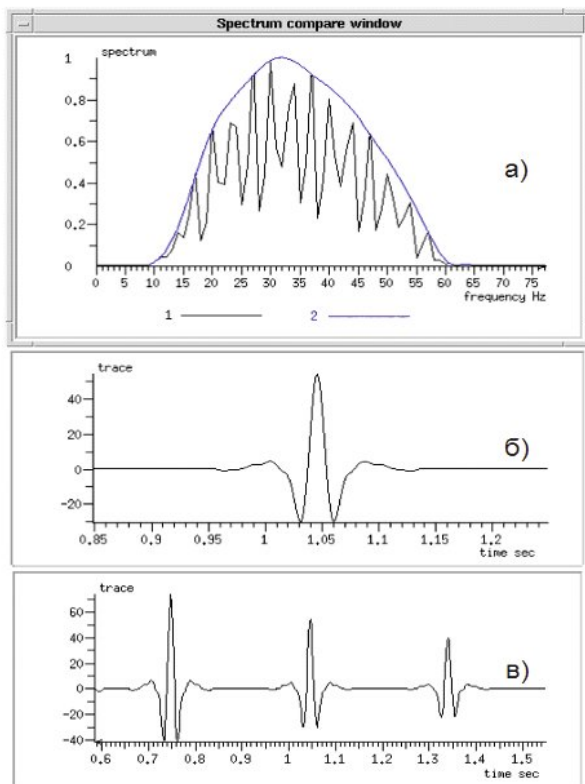
и неустойчивой процедурой по сравнению с оценкой амплитудного спектра. Мы акцентируем внимание на необходимости использования фазового спектра для анализа истинной структуры сигналов. Предложен способ модель-преобразующей фазовой фильтрации, позволяющей более эффективно и целенаправленно влиять на сигнал.

Так все же амплитудный и (или) фазовый спектр?

При теоретическом рассмотрении оценок геофизических сигналов [5, 12] трудно найти что-то подобное оценкам, получаемым при обработке сейсмических данных. Это связано с тем, что мы на практике не знаем формы исходного сигнала, а все определения базируются на применении к импульсной трассе теоремы Кемпбелла [17], которая основана на модели входного процесса линейной системы в виде дробового шума (абсолютно хаотической случайной последовательности дискретных импульсов). Для такой модели импульсной трассы спектр получаемой последовательности равномерен в достаточно широком диапазоне частот.

Использование данного подхода обычно приводит к так называемому “окрашиванию” амплитудного спектра реального сигнала – т.е. умножению его на осциллирующую функцию (рис. 1).

Оценим вначале интерференцию двух одинаковых сигналов - $u(t)$, которая возникает, например, при наличии в



▲ Рис. 1. Оценка спектра сигнала.
 а) 1- по последовательности сигналов,
 2- по одному тестовому сигналу.
 б) тестовый сигнал,
 в) последовательность тестовых сигналов.

разреже тонкого контрастного слоя. Его импульсная характеристика имеет вид последовательности разнонаправленных коэффициентов отражения. Если амплитудный спектр сигнала обозначить $U_0(f)$, то комбинация сигналов, отраженных от кровли и подошвы тонкого слоя, будет иметь модуль спектра вида [7]:

$$|\tilde{U}(f)| = 2|\tilde{U}_0(f) \sin(2\pi f \tau)| \quad (1)$$

где τ -двойное время пробега в пласте.

Таким образом, и возникает т.н. “окрашивание”.

При наличии эквивалентного по мощности промежуточного пласта форма осциллирующей функции изменится и станет:

$$|\tilde{U}(f)| = 2|\tilde{U}_0(f) \cos(2\pi f \tau)| \quad (2)$$

Форма спектра видоизменится, поскольку не будет подавления низких частот, но при этом “просечка” (notch) сползет по частоте в два раза в область более низких частот. При различиях в коэффициентах отражения просечка уменьшится по величине, но все равно не исчезнет. При изменении времени задержки, которое может быть следствием изменения мощности слоя или угла падения луча¹, такая просечка может перемещаться по частоте и достаточно серьезно исказить реальный спектр сигнала, затрудняя корреляцию. В том случае, когда число интерферирующих сигналов в рассматриваемом интервале увеличивается, спектр (рис. 1) приобретает характерную зубчатую форму (которую зачастую можно наблюдать в большинстве обрабатывающих систем при оценке спектров трасс).

При оценках такого рода говорить о фазовом спектре вообще не имеет смысла, поскольку он не только осложнен интерференцией сигналов, но из-за ограничения по времени приобретает добавку в виде прямоугольных волн, что требует дополнительного анализа.

Другим способом оценки амплитудного спектра является его определение с использованием функции автокорреляции (т.е. через спектр мощности случайного процесса). Оценки, получаемые при таком подходе, являются более стабильными [1], но также не лишены существенных ошибок, поскольку за счет существования корреляционных связей по времени функция автокорреляции участка сейсмической трассы затухает медленнее и подвержена флуктуациям. При таком способе теряется всякая информация о фазовом спектре, и приходится выдвигать превентивные гипотезы о поведении фазы.

¹ что в некотором роде эквивалентно изменению пути в пласте

Учитывая все вышесказанное, становится очевидным то обстоятельство, что оценка фазового спектра должна выполняться для самого сигнала. Для участка сейсмической трассы (суммы интерферирующих сигналов) такое определение лишено всякого смысла из-за искажений, определяемых этими временными задержками.

Изменения спектров в ходе обработки данных

В процессе обработки сигналы претерпевают изменения как амплитудного, так и фазового спектра. В чем обычно заключаются эти изменения? Амплитудный спектр в области его значимости, если удастся, выравнивается (другими словами расширяется насколько это возможно). Традиционно считается, что это обеспечивает наиболее короткий импульс, а значит, наибольшее из возможных разрешение при данном амплитудном спектре. Однако это не совсем верно, поскольку, как правило, в таких утверждениях отсутствует информация о фазовом спектре. Достаточно вспомнить различия в эффективной длительности² sweeper-сигнала и обычного полосового симметричного фильтра, чтобы понять противоречие.

Процедура воздействия на фазу в явном виде обычно сводится к так называемому сканированию фазы [21] в виде знаковой функции с множителем ($\phi = \pm \pi \alpha / 180$, где α – фазовый угол). Такое преобразование осуществляет лишь одну из возможных форм воздействия на фазу, позволяя видоизменять смешанно фазовый сигнал от нечетного к четному сигналу и обратно без изменения модуля спектра. Иногда такая процедура называется “поворотом” фазы при согласовании различных типов данных.

² В смысле, введенном Д.А. Агеевым

Поскольку указанная выше траектория изменения фазового спектра является одной из бесконечного множества возможных траекторий, попытаемся проанализировать хотя бы некоторые из них с позиций полезности при обработке. Не вызывает существенных возражений тезис о причинности исходного сигнала, возбуждаемого источником сейсмических волн. Несколько более проблематично выглядит гипотеза о минимальной фазовости сигнала от источника. Например, сигнал от Vapourchok³ не являлся таковым. Вибросигнал также не вписывается в данную модель. Сигнал от пневмоисточника (особенно группового) не соответствует этому допущению. Имеются также некоторые проблемы у ряда сигналов, связанные с дискретным представлением данных [8]. Однако в целом, и такую гипотезу можно в большинстве ситуаций признать удовлетворительной. Таким образом, исходная форма фазового спектра сигнала от источника может быть в большинстве случаев принята как минимально фазовая или близкая к ней с учетом ограничений по частоте. Здесь и далее, мы абстрагируемся от задержек исходного сигнала по времени⁴, считая, что начало по времени совпадает с началом каждого сигнала. В противном случае такая задержка легко убирается вычитанием линейной составляющей фазового спектра, что также является одним из видов фазовой фильтрации.

Воздействие на реальную фазу встречается существенно реже, ввиду значительной неопределенности процедуры. Идея фазовой фильтрации затрагивается в литературе не столь часто [3, 4], хотя неявно она используется повсеместно

³ Паровой источник компании CGG

⁴ т.е. не учитываем линейную компоненту фазового спектра

(например, в обратной фильтрации, в первичной обработке вибрационных данных, в инверсии при оценке сигнала и т.д.). При этом происходит подмена понятий: вместо явной оценки фазы часто делается достаточно неуклюжая попытка преобразования ее (фазы) в по возможности близкую к нулевой. Это достаточно эффективно в ряде случаев, когда модель исходного сигнала известна или ожидаема, что, однако, не приводит к улучшению понимания процедуры воздействия на фазу, и далеко от реальности в случае несовпадения с моделью.

Фазовый спектр в процессе обработки преобразуется, по возможности, в близкий к нуль-фазовому (либо ему эквивалентный, из-за дискретизации и ограничений по времени). Это позволяет при заданном модуле спектра обеспечить наибольшее пиковое значение сигнала в необходимый момент времени t . Именно по такой траектории (рис. 2) и следует проводить в большинстве случаев изменение фазового спектра результирующего сигнала, поскольку она согласуется с практикой обработки и повторяет фактическую траекторию изменения фазового спектра при правильно выбранном графе обработки. Мы называем такой алгоритм фазовой фильтрации “модель-преобразующим” и считаем его наиболее эффективным для получения наилучшего результата.

Для того, чтобы лучше оценить преимущества анализа и использования фазового спектра рассмотрим это на примере анализа вибросигналов.

ЛЧМ сигнал и его теоретические характеристики.

В отличие от традиционных форм описания sweer-сигналов, при которых акцентировано внимание лишь на амплитудный спектр [6, 11, 18], попробу-

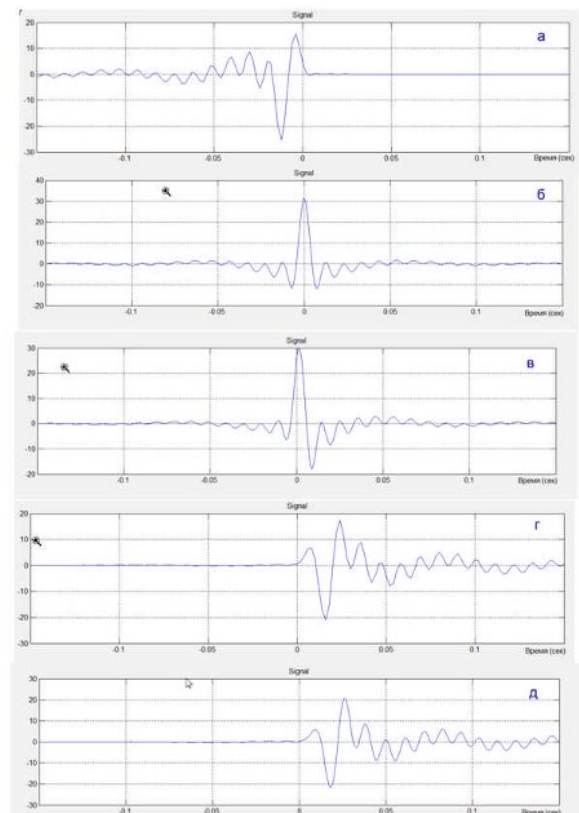
ем проанализировать их детально с позиций теории спектрального анализа.

Для этого вначале рассмотрим линейно-частотно-модулированный сигнал (ЛЧМ) с прямоугольной функцией окна [16]. Допустим, что сигнал $u(t)$ начинается в момент времени $t = 0$ и его длительность равна T_u (сек).

$$u(t) = \text{rect}\left(\frac{T_u}{2}, T_u\right) \cdot \sin(\theta) = \text{rect}\left(\frac{T_u}{2}, T_u\right) \cdot \sin\left(2\pi\left(f_n + \frac{\beta t}{2}\right)t\right) \quad (3)$$

В таком сигнале мгновенная частота f_m изменяется по линейному закону, т.е.

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta}{dt} = f_n + \beta t \quad (4)$$



▲ Рис. 2 Модель-преобразующая фазовая фильтрация на примере импульса Клаудера (р-индекс преобразования).
а) $r=-1$ максимально-фазовый сигнал,
б) $r=0$ нуль-фазовый сигнал,
в) $r=0.25$ смешанно-фазовый сигнал,
г) $r=1$ минимально-фазовый сигнал,
д) $r=2$ причинный сигнал

где f_n - начальная частота, f_k - конечная частота, $\beta = (f_k - f_n) T_u$ - скорость изменения частоты за интервал времени T_u и t - текущее время.

Изменение (девиация) частоты - Δ за время T_u будет равно:

$$\Delta = \beta T_u \quad (5)$$

Используя выражение (3) найдем теоретический спектр ЛЧМ сигнала

$$\begin{aligned} \tilde{U}(f) = & -\frac{i}{2} U_0 \exp(-i\pi \frac{(f_n - f)^2}{\beta}) \int_0^{T_u} \exp\left[i\beta\pi \left(t - \frac{(f_n - f)}{\beta}\right)^2\right] dt + \\ & + \frac{i}{2} U_0 \exp(-i\pi \frac{(f_n + f)^2}{\beta}) \int_0^{T_u} \exp\left[-i\beta\pi \left(t - \frac{(f_n + f)}{\beta}\right)^2\right] dt \end{aligned} \quad (6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что первая часть выражения описывает спектр сигнала в области положительных значений частоты, вторая - в области отрицательных. Поскольку действительная функция времени обладает определенной симметрией компонент спектра, остановимся для простоты на рассмотрении первого члена. Заменим переменную интегрирования t на равную

$$\xi = \sqrt{2\beta} \left(t + \frac{f_n - f}{\beta}\right) \quad (7)$$

что позволяет получить для первого члена

$$\tilde{U}(f) = -i \frac{U_0}{2\sqrt{2\beta}} \exp(-i\pi \frac{(f_n - f)^2}{\beta}) \int_{\xi_1}^{\xi_2} \exp(i\pi \frac{\xi^2}{2}) d\xi \quad (8)$$

Интеграл в последнем выражении сводится к комбинации специальных функций - интегралов Френеля [9, 14]

$$C(x) = \int_0^x \cos(\frac{\pi \xi^2}{2}) d\xi \quad S(x) = \int_0^x \sin(\frac{\pi \xi^2}{2}) d\xi \quad (9)$$

подстановка, которых в (8), приводит к окончательному виду для спектра ЛЧМ сигнала в области положительных частот.

$$\tilde{U}(f) = -i \frac{U_0}{2\sqrt{2\beta}} \exp(-i\pi \frac{(f_n - f)^2}{\beta}) \cdot \{C(\xi_2) - C(\xi_1) + i[S(\xi_2) - S(\xi_1)]\} \quad (10)$$

где ξ_1 и ξ_2 в 10 соответственно равны

$$\xi_1 = \sqrt{\frac{2}{\beta}}(f_n - f) \quad \xi_2 = \sqrt{\frac{2}{\beta}}(f_k - f) \quad (11)$$

Рассмотрим теперь отдельно амплитудный

$$|\tilde{U}(f)| = \frac{U_0}{2\sqrt{2\beta}} \sqrt{[C(\xi_2) - C(\xi_1)]^2 + [S(\xi_2) - S(\xi_1)]^2} \quad (12)$$

и фазовый

$$\varphi(f) = -\frac{\pi(f_n - f)^2}{\beta} + \text{arctg} \frac{S(\xi_2) - S(\xi_1)}{C(\xi_2) - C(\xi_1)} \quad (13)$$

спектры.

Анализ выражений (12) и (13) показывает, что на их форму оказывают существенное влияние пульсации, обусловленные интегральными функциями Френеля (9) - $C(x)$ и $S(x)$. Видно, что характер пульсаций определяется длительностью сигнала T_u и девиацией частоты Δ . При увеличении длительности сигнала и расширении частотного диапазона⁵ они (осцилляции) существенно изменяются: увеличиваются по частоте и поджимаются к краям частотного диапазона спектра сигнала f_n и f_k , но все еще остаются значительными по амплитуде [2, 14]. В центральной части этого диапазона для типичных ЛЧМ сигналов, используемых в сейсморазведке модуль спектра практически постоянен и равен

$$|\tilde{U}(f)| = \frac{U_0}{2\sqrt{2\beta}} \quad (14)$$

Значительного уменьшения пульсаций без существенного снижения энергии сигнала добиться не удастся [10, 13]. Если изменить прямоугольное окно на более гладкое, например, трапецеидальное, можно лишь уменьшить их влияние. Такая операция получила в сейсморазведке термин конусование. Теоретичес-

⁵ Произведение $D = T_u \Delta$ получило название dispersion factor [14]. В отечественной литературе - база сигнала [1].

ки данная операция обусловлена скорее механическими характеристиками вибратора и при таких значениях базы ЛЧМ сигнала, какие используются в вибросейсморазведке, влияет на процесс корреляции лишь незначительно в плане увеличения боковых лепестков. Конечно, даже такое изменение формы окна приводит к относительному уменьшению осцилляций особенно заметных на амплитудном спектре и, как следствие, к некоторому улучшению формы корреляционной функции в смысле уменьшения боковых лепестков, но приводит к расширению основного лепестка. По сравнению с эффектом Гиббса, возникающим при ограничении ряда Фурье, характер осцилляций несколько иной [13, 14], поскольку они имеют вид функций, описываемых интегралами Френеля с квадратичным аргументом, а не интегрального синуса с линейным. Способы борьбы с этими осцилляциями в виде применения т.н. анализа “парных эхо” [19] или использования более гладких весовых окон направлены с одной стороны на улучшение отношения сигнал/помеха (в смысле уменьшения боковых лепестков), с другой – на сохранение разрешающей способности.

Однако достигнуть аналогичного результата можно многими путями. В [19] показана эквивалентность предискажений различных типов: как в виде амплитудной и фазовой модуляций, так и скорости частотной развертки. Заметим, что использование традиционных для спектрального анализа радарных систем окон в сейсморазведке приводят к существенному изменению мощности сигнала и искажению спектра. Из-за необходимости сохранения мощности сигнала в сейсморазведке большее употребление получили так называемые “щадящие” окна: трапецеидальное и “25% Tukey”⁶.

На наш взгляд, использование окна “Tukey”, несколько предпочтительнее, поскольку в ряде случаев улучшает поведение фазового спектра в области малых значений амплитудного спектра (что, однако, не оказывает заметного влияния). Что касается второго слагаемого (т.н. “остаточного члена”) в выражении (13), то характер искажений существенно меньше регулярной составляющей фазового спектра - квадратичного члена и им обычно пренебрегают при значениях базы сигнала $D > 100$. Однако, положение дел резко меняется после корреляции, ввиду резкого уменьшения значений фазового спектра, что требует дополнительного достаточно кропотливого анализа.

Выделение (обнаружение) регистрируемого сигнала в случае ЛЧМ посылки осуществляется при помощи согласованного фильтра, который является оптимальным при известной модели исходного сигнала. Он представляет собой масштабированную копию исходного сигнала, обращенную во времени. Для действительного сигнала это эквивалентно изменению знака фазового спектра. При таком определении оператора фильтра операция свертки становится операцией корреляции.

Описанный выше согласованный фильтр действует максимально эффективно при обнаружении сигнала, используя свойства его фазового спектра. За счет коррекции фазовых сдвигов обеспечивается когерентное суммирование всех гармонических составляющих сигнала в момент времени равный времени прихода сигнала. Именно в этот момент времени скалярное произведение сигнала и его копии максимально, что обеспечивает наибольшее из воз-

⁶ Следует особо отметить, что это не окно Ханна, а, именно, одно из окон Tukey [14]. Они имеют различный характер использования.

можных соотношение сигнал/помеха, однако к этому моменту необходимо иметь уже полностью зарегистрированный обратный сигнал, что возможно лишь с задержкой по времени равной длительности сигнала T_i . При сейсмических исследованиях такая задержка не имеет принципиального значения, поскольку вначале проводится регистрация всего процесса и лишь, затем производится корреляция.

Теоретически в радиолокации результирующий сигнал определяется через обратное преобразование Фурье от квадрата модуля идеального прямоугольного спектра мощности sweer-сигнала, т.е. с точностью до множителя

$$B(\tau) = 2U_0^2 \int_{f_n}^{f_k} \cos(2\pi f \tau) df = 2U_0^2 \frac{\sin(2\pi f_k \tau) - \sin(2\pi f_n \tau)}{2\pi \tau} \\ U_0^2 \frac{T_u}{\beta} \frac{\sin(\pi \Delta \tau)}{\pi \Delta \tau} \cos(\pi(f_n + f_k)\tau) \quad (15)$$

Такой импульс принято называть импульсом Клаудера. Его свойства достаточно хорошо изучены и описаны в литературе [13, 14, 18]. Пиковое значение теоретически прямо пропорционально энергии исходного сигнала (иначе говоря, длительности) и не зависит от его структуры. Ширина основного лепестка корреляционной функции зависит от девиации частоты и уменьшается по мере расширения спектра. Боковые лепестки в зависимости от весовой функции имеют максимальные амплитуды порядка 24% от амплитуды центрального лепестка. В сейсморазведке они получили термин шумы корреляции. Существенного уменьшения шумов добиться лишь изменением частотного диапазона не удастся, поскольку величина $\Delta/2$ близка к средней частоте $f_0 = (f_k - f_n)/2$ сигнала, что ограничивает возможное положение нулей корреляционного импульса.

Использование традиционных для радаров весовых функций типа Дольфа-Чебышева [14] практически неприемле-

мо, поскольку незначительное улучшение конечного сигнала приводит к существенной потере мощности.

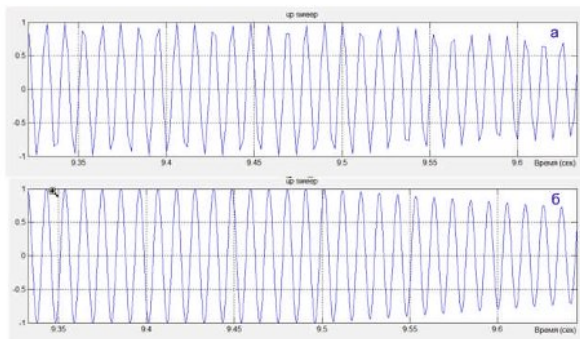
Практическое моделирование характеристик ЛЧМ сигнала.

Возможно ли, задать желаемый ЛЧМ сигнал и одновременно его спектр мощности с математической точностью? На этот вопрос теория преобразования Фурье дает отрицательный ответ.

Проблема синтеза ЧМ сигналов при одновременных ограничениях, налагаемых на спектр сигнала и его функцию корреляции задача достаточно неопределенная. При условии наличия многих факторов, которые влияют на данный процесс, единственным способом решения задачи является численное моделирование. Такое моделирование характеристик sweer-сигнала показывает, что имеется ряд достаточно тонких моментов.

Прежде всего, о самом сигнале. При традиционно используемом в сейсморазведке шаге дискретизации 2мсек имеются недостатки воспроизведения сигнала на высоких частотах (рис. 3). Они, естественно, устранимы интерполяцией (сигнал может быть восстановлен в соответствии с теоремой Котельникова), но в практической обработке приводит к незначительному, но все же ослаблению верхних частот при корреляции, поскольку в явном виде такой интерполяции не производится.

Спектральные характеристики позволяют провести более детальный анализ ситуации. В [18] показано, что при $D > 100$ практически 98-99% энергии сигнала сосредоточено в спектре в полосе частот Δ . Фазовый спектр ЛЧМ сигнала в соответствии с (13) параболический, однако в результате численных вычислений его можно получить непосредственно лишь в пределах главного значения угла только в разрывном виде. Попытка устранения



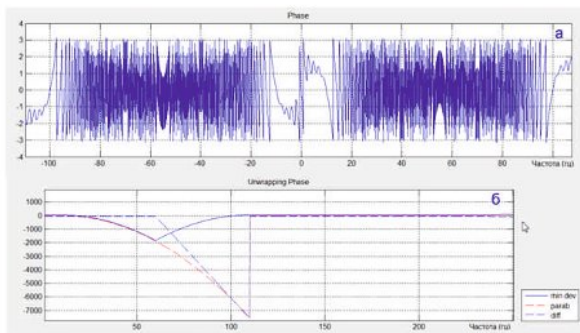
▲ Рис. 3. Вид ЛЧМ сигналов на высоких частотах. а) без интерполяции, б) с интерполяцией

разрывности⁷ приводит к существенно отличающемуся фазовому спектру, который, однако, не препятствует обратному синтезу сигнала.

Такие различия обусловлены достаточно интересным обстоятельством. Фазовый спектр ЛЧМ сигнала меняется в достаточно больших пределах⁸ и при обычных для сейсморазведки параметрах сигналов ($T_i=10-12$ сек, $f_n=10$ Гц, $f_k=100$ Гц.) достигает значений в несколько тысяч радиан (рис. 4).

Такие быстрые изменения, особенно после превышения частотой развертки значения несущей частоты ($f_m > f_0=(f_k-f_n)/2$), таковы, что изменение фазы между двумя соседними отсчетами сигнала превышает значение π и достига-

▼ Рис. 4. Фазовые характеристики ЛЧМ сигнала. а) фазовый спектр в пределах главного угла, б) красный пунктиром – теоретический фазовый спектр, синий – восстановленный непрерывный, синий пунктиром – разность между теоретическим и восстановленным.



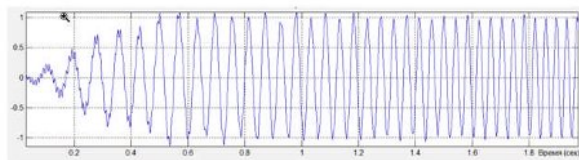
ет 2π при $f_m=f_k$, что существенно осложняет работу алгоритмов применяемых для восстановления непрерывного спектра. Наиболее эффективно работающий функционал, минимизирующий суммарное отклонение разрывной функции, не справляется с решением данной задачи. Дополнительную лепту при этом вносят скачки, обусловленные осцилляцией. Эта проблема не решается увеличением длительности сигнала или уменьшением шага дискретизации при доступных в сейсморазведке величинах. Более того дальнейшее увеличение длительности сигнала приводит к настолько резкому нарастанию фазового спектра, что приводит к ухудшению характеристик сигнала за счет увеличения ошибок при реализации таких быстро меняющихся фазовых характеристик. Здесь уместно отметить, что величина фазового аргумента θ в (3), не является значением фазового спектра для соответствующих по времени значений частоты из (4). Необходимо скорректировать эти значения на соответствующий набег фазы для рассматриваемой гармоники от начала сигнала. Это существенно осложняет процесс формирования развертки, хотя и не делает его принципиально невозможным.

Все эти уточнения имеют смысл лишь для реализации процедуры обратного синтеза сигнала в адаптивной методике вибрационной сейсморазведки. Оценки, проведенные по результатам обратного синтеза ЛЧМ сигнала, показывают, что даже применение правильной с теоретической точки зрения фазовой характеристики требуют коррекции амплитудного и фазового спектров в областях, прилегающих к граничным частотам спектра сигнала. Любые неточности в зада-

⁷ Такая процедура в иностранной литературе получила название “unwrapping”.

⁸ Добавочный член не оказывает практически никакого влияния в данной ситуации.

нии фазы в этих частях спектра приводят к эффекту Гиббса в сопряженной временной области (рис. 5).



▲ Рис. 5. Искажения при обратном синтезе ФМ сигнала

Реальная ситуация на практике [11] существенно отличается от идеальной, рассмотренной ранее. Во-первых, регистрируемый сигнал уже не имеет равномерный спектр. Он значительно ослаблен в области верхних частот сейсмического диапазона. Вследствие поглощения и затухания, его фазовый спектр за счет дисперсии скорости с неизбежностью приобретает дополнительную фазовую составляющую [15], которая существенно видоизменяет корреляционную функцию. Эту компоненту фазового спектра можно попытаться определить, если правильно оценить амплитудный спектр регистрируемого сигнала и использовать “модель-преобразующую” фазовую фильтрацию. Во-вторых, спектр реального посылаемого в землю сигнала имеет существенно сглаженные края⁹, в которых переходные зоны занимают более 10Гц. Все это заставляет задаться вопросом, каким образом можно улучшить результат корреляции по возможности без дополнительного изменения полевой технологии?

Теоретически автокорреляция sweер-сигнала представляется в данном случае операцией менее эффективной с точки зрения преобразования спектра по сравнению с обратной фильтрацией [19], поскольку, как мы уже упоминали, спектр имеет значительные краевые области, в которых амплитуды гармонических составляющих плавно уменьшаются и существенно ниже, чем в центральной части спектра. В то же время автокорреляция в отличие от обратной фильтрации не

требует явного определения фазового спектра для его приведения к нуль-фазовому виду, что является ее важным преимуществом, которое традиционно используется в вибросейсморазведке, однако она не может воздействовать целенаправленно на амплитудный спектр. Если бы не было изменения фазового спектра у регистрируемого сигнала и, как следствие, появление ненулевого фазового спектра у результирующего импульса (не являющегося импульсом Клаудера), то для нас были бы непринципиальны его амплитудные изменения.

Ни для кого не секрет что, регистрируемый сигнал существенно отличается от сигнала, излучаемого вибратором, и вместо автокорреляции фактически выполняются взаимная корреляция со всеми вытекающими из этого последствиями. Попытки изменить физическое соотношение гармонических составляющих в спектре вибросигнала (адаптивные методики) не получили пока широкого распространения по нескольким причинам: сложности аппаратной реализации, как ни странно, ухудшении характеристик sweер-сигнала и, наконец, невозможности получения адекватной (пропорциональной) реакции среды на дополнительную закачку высокочастотных гармоник спектра и, зачастую, слишком высокочастотных сейсмоприемников для регистрации нижних частот. Отметим, что любые узкополосные добавки к сигналу приводят к ухудшению динамической выраженности результатов, что, собственно, должно быть, очевидно.

Если же подходить к процессу получения коррелограммы как к процессу, на который возможно воздействовать поэтапно [4], и попытаться преобразовать сначала фазовый спектр, а затем амплитудный, либо наоборот, то можно сущес-

⁹ Здесь и далее мы не затрагиваем вопросы, касающиеся нелинейных искажений

твенно упростить процедуру получения качественной взаимно корреляционной функции. Воздействуя на sweeper-сигнал, у которого амплитудный спектр модулирован заданным образом, а фазовый остался прежним, можно не только получить симметричный (нуль-фазовый) сигнал, но и требуемый амплитудный спектр. Конечно, для такой операции желательно иметь виброграмму, однако линейность преобразований, если она все же имеет место в реальной ситуации, должна позволить воздействовать и на коррелограммы, что, однако, требует дополнительных исследований.

Заключение

Хочется надеяться, что приведенные примеры позволят более внимательно и аккуратно относиться к фазе, как наиболее важному элементу спектрального анализа, и не ограничиваться определением лишь амплитудного спектра, содержащего не столь значительную часть информации о сигнале, который мы изучаем.

Литература

1. Андерсен Т. Статистический анализ временных рядов. Перевод с англ. под редакцией Ю.К. Беляева. М. Мир, Москва, 1976. 755с.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М., "Высшая школа", 2000. 462 с.
3. Малкин А.Л., Фиников Д.Б. Оптимальный способ коррекции фазового спектра сейсмического сигнала. "Геология и геофизика", 1988, №6, 117-125.
4. Малкин А.Л., Фиников Д.Б. Фазовая деконволюция, теоретический аспект, "Геология и геофизика", 1988. №8, 86-93.
5. Напалков Ю.В. Спектральные представления в сейсморазведке. Ч. I, II, Ш. Учебное пособие для студентов специальности 0105 "Полевая геофизика". МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, Москва 1977г.
6. Жуков А.П., Колесов С.Б., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б. Сейсморазведка с вибраци-

онными источниками. Тверь, ООО "Издательство ГЕРС", 2011. 411 с.

7. Карапетов Г.А. Спектрально-голографический способ скоростного анализа. "Геофизика", 2013. №5, 68-74.
8. Карапетов Г.А. Некоторые аспекты цифрового представления данных. "Геофизика", 2014. №1, 68-72.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Перевод с англ. Под редакцией И.Г. Арамановича. М., "Наука", 1980. 800 с.
10. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. Пер. с английского под редакцией В.С. Кельзона, М., "Сов. Радио", 1971. 568 с.
11. Шнеерсон М.Б. (под редакцией). Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки. М., "Недра", 1998. 527 с.
12. Bracewell R.F. The Fourier Transform and Its Applications. McGraw-Hill, 2000. 616 p.
13. Cook C.E., Paolillo J. A Pulse Compression Predistortion Function for Efficient Sidelobe Reduction in a High-Power Radar. Proceedings of the IEEE, v.52, №1, 1964. 377-389.
14. Fowle E.N. The Design of FM Pulse Compression Signals, IEEE Trans. on Information Theory, Jan., 1964. 61-67.
15. Futterman W.I. Dispersive Body Waves. Journal of Geophysical Research, v. 66, №13, Dec., 1962. 5279-5291.
16. Harris F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. Proceedings of the IEEE, v.66, №1, 1978. 51-83.
17. Mac Donald D.K.C. Noise and Fluctuations: An Introduction. John Wiley & Sons, N-Y, 1962. Перевод: Введение в физику шумов и флуктуаций, М., "Мир", 1968, 159 с.
18. Klauder J.R., Price A.C., Darlington S., Albersheim W.J. The Theory and Design of Chirp Radars. The BELL System Technical Journal, v. XXXIX, №4, 1960. 745-808.
19. Labitt M. Obtaining Low Sidelobes Using Non-Linear FM Pulse Compression. Lincoln Laboratory Project Report ATC-223.1994. 37 с.
20. Ulrych T.J. etc. The Essence of Phase in Seismic Data Processing and Inversion. SEG/San Antonio Annual Meeting, 2007. 1765-1769.
21. Yilmaz O. Seismic Data Processing. Stephen M. Doherty editor. SEG, 1978. 526p.