



Об амплитудной и энергетической эквивалентности вибрационной и импульсной сейсморазведки

Юшин В.И., СО РАН, г. Новосибирск

Введение

Задача сопоставления сейсмических данных, полученных с помощью различных источников волн, на практике возникает весьма часто. Обычно производители программ обработки сейсмограмм, но в большей степени ориентируются на визуальные, качественные, а значит, субъективные экспертные оценки полученных данных. Наибольшие трудности возникают при сопоставлении сейсмограмм от импульсных и вибрационных источников. На практике чаще всего пользуются простейшими относительными оценками, сравнивая по форме нормированные по амплитуде сейсмограммы или их безразмерные спектры. При этом очевидное эмпирическое требование к сравниваемым исходным материалам состоит в приблизительно одинаковом уровне стороннего шума на записях. Примечательно, что, выдвигая такое требование, мы тем самым неосознанно подчиняемся фундаментальному закону оптимального приема сигналов и согласованной фильтрации [1]: выходное отношение сигнал/шум (ОСШ) после оптимальной процедуры всегда равно отношению полной энергии сигнала *независимо от его формы* к спектральной плотности входного шума. Значит, добиваясь одинакового ОСШ на сравниваемых, например, импульсных и вибрационных, сейсмограммах, мы тем самым достигаем равенства сейсмических энергий, обеспечивших их получение. Однако, строить методику сопоставления, ориентируясь на остаточный шум, было бы непрактично. Нужны строгие правила, работающие независимо от наличия или отсутствия стороннего шума. Вопросу обоснования таких правил корректного сопоставления импульсных и вибрационных сейсмограмм с энергетической точки зрения посвящена настоящая работа. Другие возможные критерии сравнения, как то: разрешающая способность, производительность и т.п., - мы здесь не рассматриваем. Задачу сформулируем следующим образом.

Пусть даны две сейсмограммы - импульсная и вибрационная, полученные в одной и той же расстановке ПВ-ПК с помощью импульсного и вибрационного источников, соответственно. Условимся о терминологии. *Сейсмограмма*, или *импульсная сейсмограмма* - запись колебаний импульсного источника в точке приема. *Виброграмма* - первичная запись вибрационных колебаний в той же точке. *Вибрационная сейсмограмма* - обращенная в импульсную форму виброграмма.

Импульсная сейсмограмма и виброграмма могут быть легко представлены в размерности каких-либо единиц движения, например, колебательной скорости, смещения или ускорения, поскольку являются первичными записями, а существующие сейсмодатчики тарируются в именно в таких единицах. Значит, для сравнения необходимо в таких же единицах представить и вибрационную сейсмограмму, полученную путем вычисления взаимной корреляционной функции (ВКФ) виброграммы и зондирующего сигнала.

Обычно корреляционная функция имеет размерность мощности сигнала. В сейсморазведке, как правило, вместо зондирующего сигнала используется его подобие, называемое опорным (иногда, управляющим) сигналом, имеющее такую же частотно-фазовую, но иную амплитудно-временную структуру. В этом случае размерность ВКФ есть произведение амплитудностей коррелируемых сигналов. Естественно потребовать, чтобы размерности виброграммы и последней должна иметь размерности совпадали, то есть, размерности сопоставляемых сигналов. Но при этом, подобно тому, как изменение волнового поля во времени, то есть, интенсивность возмущающего воздействия (взрыва, удара), амплитуда воздействия должна быть пропорциональна амплитуде воздействия (а не его квадрату, как это было бы при строгом выполнении алгоритма взаимной корреляции). И здесь возникает вопрос, какую из характеристик первичного колебания должна отображать вибрационная сейсмограмма? Таких характеристик мы видим две. Это либо фактическая амплитуда принятого вибрационного колебания, очищенного от стороннего шума, либо некая воображаемая амплитуда, несущая информацию об общей энергии зондирования. Будем называть соответствующие подходы к калибровке вибрационных сейсмограмм амплитудным и энергетическим.

При амплитудном подходе мы можем получить ответ на вопрос, каков был фактический уровень вибрационных колебаний, соответствующих той или иной волне в импульсной сейсмограмме. При энергетическом подходе мы задаем вопрос, каков был бы уровень колебаний, в этом же волновом импульсе, если бы вся сейсмическая энергия, сгенерированная за время непрерывного зондирования вибрационным источником, была бы "выплеснута" им мгновенно (с сохранением ее спектрального состава)?

Каждый из подходов решает свои задачи. Чаще всего используется энергетический подход. Впервые он в общем виде разработан И.С.Чичиным в основополагающей работе [2] и позже неоднократно воспроизводился или адаптировался применительно к конкретным задачам [3, 4]. Этот подход дает объективную характеристику энергетической эффективности источника колебаний. В частности, он позволяет по пробным вибровоздействиям определить необходимые параметры зондирующего сигнала, требуемое количество источников и число накопленных, а также сформировать закон нелинейной развертки частоты, оптимизирующей разрешающую способность виброзондирования [5]. Однако вопрос о непосредственном сопоставлении амплитуд вибрационных и импульсных сейсмограмм в правильной размерности тех и других проработан не был.

Альтернативный амплитудный подход был впервые целенаправленно применен в работе [6] для оценки фактического уровня вибрационных колебаний на разных удалениях от вибратора в



ТЕХНОЛОГИИ ВИБРОСЕЙСМОРАЗВЕДКИ ТЕОРИЯ

условиях, когда их амплитуды были значительно ниже уровня шума. Помимо этой упомянутой задачи он необходим для анализа некоторых нелинейных явлений в упругой среде, например, нарушений принципа пропорциональности и, наоборот, для исследования эффекта статистической вибрационной линейризации, когда регулярный сигнал, будучи меньше уровня квантования, уверенно выделяется при корреляционном приеме. Кстати упомянуть здесь еще и о проблеме поиска кванта механического движения. Если таковой существует, методика его обнаружения и измерения может быть основана на использовании вибросейсмического метода с амплитудным критерием восстановления вибрационных сейсмограмм.

Преобразование виброграммы с сохранением энергии и размерности сигнала

Как известно, математическая основа алгоритма обработки сигналов в корреляционной модификации вибрационной сейсморазведки (метод "Вибросейс") заимствована из теории оптимальной фильтрации и статистической теории связи [1, 7, 8]. Коррелятор, восстанавливающий из виброграммы импульсную сейсмограмму, можно рассматривать как линейный фильтр, определенным образом связанный с формой зондирующего сигнала, так называемый, согласованный фильтр.

Пусть $h(t)$ - весовая (импульсная переходная) функция геологической среды, на вход которой поступает зондирующее воздействие $b(t)$. Если система-среда линейна, датчик на ее выходе зарегистрирует колебание

$$v(t) = \int_0^x h(\lambda) b(t - \lambda) d\lambda \quad (1)$$

правда, осложненное сторонним шумом $n(t)$. Свертка (1) описывает регулярную, то есть, детерминированную составляющую сейсмического колебания независимо от типа зондирующего сигнала, будь то импульс взрыва или воздействие вибратора. В частотной области эта свертка отображается произведением комплексного спектра Фурье $B(jf)$ воздействия $b(t)$ на комплексную частотную характеристику $H(jf)$ среды:

$$V(jf) = H(jf) B(jf) \quad (2)$$

Потребуем, чтобы размерность выходного сигнала $v(t)$ совпала с размерностью входного $b(t)$. Нетрудно увидеть, что для этого достаточно, чтобы ее комплексный спектр $H(jf)$ был бы безразмерен, и, стало быть, размерность весовой функции среды $h(t)$ как преобразования Фурье от $H(jf)$ должна быть обратна времени.

Рассмотрим важнейший частный случай: зондирующее воздействие $b(t)$ представляет собой свип-сигнал с постоянной скоростью развертки частоты β (размерность Гц/с) в полосе от начальной частоты f_1 до конечной f_2 и медленно меняющейся амплитудой $B(t)$:

$$b(t) = B(t) \cos(2\pi f_1 t + \pi \beta t^2), \quad 0 < t < T \quad (3)$$

где T - длительность свипа. Величина β равна

$$\beta = \frac{f_2 - f_1}{T} \quad (4)$$

Свертка (1) представляет собой виброграмму в отсутствие стороннего шума. Преобразование такой виброграммы в импульсную форму будем

выполнять, путем вычисления интеграла $k(\tau)$ взаимной корреляции $v(t)$ с опорным сигналом $c(t)$, который по своей фазовой структуре подобен зондирующему $b(t)$, но имеет постоянную амплитуду c_0 и некоторую другую размерность

$$k(\tau) = \int_0^T c(t) v(t + \tau) dt \quad (5)$$

где

$$c(t) = c_0 \cos(2\pi f_1 t + \pi \beta t^2), \quad 0 < t < T \quad (6)$$

Мы здесь, используем выражение для интеграла корреляции без нормировки на длительность T . В этом есть определенный смысл, подчеркивающий связь корреляции и согласованной фильтрации. Если же в ходе решения задачи нормировка на длительность, действительно, окажется необходимой, она неизбежно проявится в амплитудном коэффициенте c_0 опорного сигнала.

Найдем амплитуду опорного сигнала $c_0 = c_E$, необходимую для корректного отображения амплитуды вибрационной сейсмограммы по энергетическому критерию, потребовав, чтобы энергия вибрационной сейсмограммы (коррелограммы) была равна энергии породившей ее виброграммы (не принимая во внимание сторонний шум). Это требование можно назвать *принципом сохранения энергии* полезного сигнала при корреляционном преобразовании виброграмм. Интеграл (5) отображается в частотной области произведением комплексного спектра $V(jf)$ виброграммы и комплексно сопряженного спектра $C^*(jf)$ опорного сигнала:

$$K(jf) = C^*(jf) V(jf) \quad (7)$$

Энергия вибрационной сейсмограммы (5) согласно теореме Парсеваля выражается двояко (во временной и частотной областях):

$$E_K = \int_0^T k^2(\tau) d\tau = 2 \int_0^{f_2} |K(jf)|^2 df = 2 \int_0^{f_2} |C(jf)|^2 |V(jf)|^2 df \quad (8)$$

Если модуль спектра опорного сигнала сделать равным безразмерной единице в полосе рабочих частот вибратора:

$$|C(jf)| = \begin{cases} 1, & f_1 < |f| < f_2 \\ 0, & |f| < f_1, |f| > f_2 \end{cases} \quad (9)$$

то из равенства (8) последует, что

$$E_K = \int_0^T k^2(\tau) d\tau = 2 \int_{f_1}^{f_2} |V(jf)|^2 df \quad (10)$$

то есть, энергия коррелограммы окажется равной энергии виброграммы. Остается найти, какова должна быть амплитуда опорного свипа (6) для выполнения соотношения (10). Для этого вновь обратимся к теореме Парсеваля, но теперь уже для свип-сигнала.

$$\int_0^T c^2(\tau) d\tau = 2 \int_{f_1}^{f_2} |C(jf)|^2 df \quad (11)$$

Подставляя в левую часть этой формулы выражение (6), а в правую - (9), получаем

$$\frac{c_0^2 T}{2} = 2(f_2 - f_1) \quad (12)$$

откуда с учетом формулы для скорости свипа (4), находим амплитуду опорного свип-сигнала

$$c_0 = c_E = 2 \sqrt{\beta} \quad (13)$$



ТЕХНОЛОГИИ ВИБРОСЕЙСМОРАЗВЕДКИ ТЕОРИЯ

и его размерность 1/с. Таким образом, пользуясь при корреляции опорным свип-сигналом вида

$$c(t) = 2\sqrt{\beta} \cos(2\pi f_1 t + \pi \beta t^2), \quad 0 < t < T \quad (14)$$

мы всегда получаем вибрационную сейсмограмму, сейсмическая энергия которой равна энергии виброграммы. Это означает, в частности, что теперь можно непосредственно сравнивать вибрационную сейсмограмму (коррелограмму) с записью взрыва или удара, будучи уверенным, что *соотношение амплитуд полезных волн на обеих сейсмограммах отображает истинное соотношение сейсмических энергий породивших их источников.*

Но еще более важно, и это следует из выражений (8-10), что энергетические и амплитудные спектры виброграммы и импульсного сигнала, выраженные в одинаковых размерных единицах, например, спектров плотности мощности электрического сигнала ($V^2/Гц$) или спектров плотности мощности колебательной скорости почвы ($m^2/с$), можно сравнивать в этих абсолютных единицах. Единственное очевидное требование состоит всего лишь в соблюдении правил выполнения преобразования Фурье с учетом физической размерности.

Вместе с тем, подчеркнем, что все вышеизложенное относится к сопоставлению одиночных воздействий: одиночного импульса и одиночного свипа. В случае работы с накоплением повторных воздействий необходимо привести записи либо к одиночному воздействию, либо к их энергетической сумме. В первом случае это делается с помощью простой процедуры вычисления среднего по ансамблю воздействий, то есть делением их суммы-"штабеля" на число n воздействий. Во втором случае, когда мы хотим выполнить полную энергетическую оценку (по сумме n воздействий, при которых энергия источника возрастает в n раз), мы должны полученную сумму-"штабель" разделить на $\sqrt{n}$.

Обращение импульсной сейсмограммы в виртуальную виброграмму (декорреляция)

Выше мы рассмотрели условия энергетически корректного сопоставления импульсных и вибрационных сейсмограмм в импульсной форме и в спектральной области. На практике в силу существенно различных спектральных характеристик импульсных и вибрационных источников такое сопоставление не всегда достаточно информативно. Иногда полезно провести анализ импульсной записи в пространстве виброграмм. Для этого вообразим, что данная реальная импульсная сейсмограмма, полученная, например, от взрыва, является результатом корреляции некоторой виртуальной виброграммы, которая в свою очередь порождена гипотетическим виброисточником, вырабатывающим свип-сигнал, параметры которого мы можем задать произвольно. Поскольку, в конечном счете, речь идет о сопоставлении реального импульсного с реальным вибрационным источником и конкретным опорным свип-сигналом, то параметры гипотетического (виртуального) опорного свип-сигнала следует выбрать почти такими же, как у реального. Далее задача сводится к решению интегрального уравнения (5) относительно подынтегральной функции $v(t)$ при заданных функциях $k(t)$ и $c(t)$, то есть, к обратной задаче. Как известно, решение такой обратной задачи, относящейся к классу некорректных, обычно выполняется в частотной области на основе

соотношения (7) с дополнительной регуляризацией. В данном случае мы достигнем регуляризации не добавлением малого параметра в знаменатель, как обычно, а расширением полосы частот виртуального опорного свип-сигнала в сравнении с фактическим свипом, причем нулевой частоты и вверх приблизительно на 10-20%. Главное условие - спектр виртуального опорного свипа должен быть шире спектра импульсной сейсмограммы. Виртуальный опорный сигнал будет иметь ту же скорость разбегания амплитуды (13), что и основной, однако вследствие расширенной полосы частот он будет иметь большую продолжительность $T_1 > T$.

$$c_1(t) = 2\sqrt{\beta} \cos(\pi \beta t^2), \quad 0 < t < T_1 \quad (15)$$

Модуль спектра $C_1(jf)$ этого опорного сигнала в рабочей полосе частот также будет равен 1, и декорреляции не будет нарушен. Теперь можно найти спектр виртуальной виброграммы как отношение спектра импульсного сигнала к сопряженному спектру виртуального свипа, а саму ее через обратное преобразование Фурье (IFT) этого отношения:

$$V(jf) = \frac{K(jf)}{C_1^*(jf)} \Rightarrow IFT \Rightarrow v(t) \quad (16)$$

Здесь необходимо сделать замечание технического характера: перед выполнением обратного преобразования Фурье (16) следует обнулить самые крайние по частоте спектральные компоненты числителя или частного в правой части равенства (16), не допуская резких разрывов спектра на его границах, вызываемых малыми величинами знаменателя (16).

Преобразование виброграммы с сохранением амплитуды и размерности сигнала

В отличие от энергетического "амплитудный" подход позволяет представить вибрационную сейсмограмму в масштабе фактических движений почвы, проигнорировав возрастание амплитуды вследствие накопления энергии за счет корреляционного сжатия и многократных воздействий. Разумеется, в действительности все указанное процедуры должны присутствовать хотя бы для того, чтобы выделить полезный сигнал из помехи, преобразовать его в импульсную форму. Найдя амплитуду c_1 опорного сигнала, обеспечивающего такое масштабирование вибрационной сейсмограммы.

Пусть весовая функция геосреды представляется совокупностью дельта-функций элементарных отражателей

$$h(t) = \sum_i h_i \delta(t - t_i) \quad (17)$$

Зондирующий $b(t)$ и опорный $c(t)$ свип-сигналы возьмем в упрощенном виде, начиная с нулевой частоты

$$b(t) = B \cos(\pi \beta t^2), \quad 0 < t < T \quad (18)$$

$$c(t) = c_1 \cos(\pi \beta t^2), \quad 0 < t < T \quad (19)$$

Виброграмма будет иметь вид:

$$v(t) = \sum_i B h_i \cos \pi \beta (t - t_i)^2 \quad (20)$$

Рассмотрим элементарное отражение, полагая, что его задержка равна нулю, что не нарушает общности рассуждений в рамках амплитудного анализа:

$$v_i(t) = B h_i \cos(\pi \beta t^2) \quad (21)$$

В результате вычисления интеграла взаимной корреляции с опорным сигналом (19) мы получим выражение для амплитуды этого элементарного сигнала

$$a_i = \int_0^T B h_i c_i \cos^2(\pi \beta t^2) dt \approx \frac{B h_i c_i T}{2} \quad (22)$$

откуда видно, что для выполнения требования 55 опорный сигнал должен иметь амплитуду

$$c_i = \frac{2}{T} \quad (23)$$

С другой стороны, если бы вычисления выполнялись с опорным сигналом (15), мы получили бы для этой волны "энергетическую" амплитуду

$$e_i = \int_0^T B h_i 2\sqrt{\beta} \cos^2(\pi \beta t^2) dt \approx B h_i T \sqrt{\beta} = B h_i \sqrt{FT} \quad (24)$$

Следовательно, "энергетическая" амплитуда i -го импульса коррелограммы определяется через фактическую амплитуду i -го луча виброграммы формулой

$$e_i = a_i \sqrt{FT} \quad (25)$$

в которой легко увидеть аналогию с известным соотношением между входным и выходным отношениями сигнал/шум при корреляционном приеме [1].

Таким образом, выбирая амплитуду опорного сигнала при корреляции (5) по формулам (13) или (23), мы получаем вибрационную сейсмограмму, соответственно, в "энергетическом" или в "амплитудном" масштабе. Отметим кстати, что наиболее распространенное в литературе выражение для коррелограммы с нормировкой на длительность в виде

$$k(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T c(t)v(t+\tau) dt \quad (26)$$

с опорным сигналом $c(t)$, имеющим безразмерную единичную амплитуду, например, $c(t) = \cos(2\pi f_0 t + \pi \beta t^2)$, соответствует, так сказать, "половинно-амплитудному" масштабированию вибрационной сейсмограммы: вычисленное значение амплитуды любого волнового импульса будет равно половине амплитуды соответствующей непрерывной компоненты виброграммы.

Преобразование шума коррелятором

Виброграмма как правило, сопровождается аддитивным сторонним независимым шумом. В силу линейности процесса корреляции (согласованной фильтрации) процесс преобразования аддитивного шума коррелятором можно рассматривать независимо от виброграммы. Пусть входной стационарный шум характеризуется спектральной плотностью мощности $N(f)$. Спектральная плотность выходного шума $Q(f)$ выражается через входную $N(f)$ и квадрат модуля частотной характеристики преобразующего фильтра, то есть, через спектр $C(jf)$ опорного сигнала известным соотношением [1]

$$Q(f) = N(f)|C(jf)|^2 \quad (27)$$

Поскольку при "энергетическом" преобразовании амплитудный спектр опорного сигнала в рабочей полосе равен единице (9), выходной шум остается на уровне входного. При этом ОСШ возрастает в $\sqrt{FT}$ раз только за счет роста

регулярной составляющей коррелограммы

Легко показать, что при "амплитудном" преобразовании с амплитудой опорного сигнала (23) наблюдается противоположная картина: амплитуды волновых импульсов будут сохраняться равными соответствующим непрерывным гармоническим компонентам виброграммы, а спектральная плотность шума снизится в FT раз, что также даст повышение амплитудного ОСШ в $\sqrt{FT}$ раз

Обсуждение результатов и примеры их использования

Практическая проверка принципа сохранения энергии на численной модели и в натурных экспериментах.

Синтетическая виброграмма от свип-сигнала вида (3) единичной амплитуды с полосой частот 78-312 Гц длительностью 1,1 с, состоящая из 3 задержек (0,03, 0,04 и 0,1 с), не содержащая стороннего шума, подвергнута "энергетической" корреляции. На рис. 1 показаны совместно указанная виброграмма (А) и полученные из нее две коррелограммы: Б - в "энергетически корректном" масштабе, и В - в амплитудном. Расчет по формуле (10) энергии виброграммы А и коррелограммы Б показал разницу в 2%. По сейсмограммам А и Б на рис. 1 можно оценить возрастание амплитуды "энергетической" коррелограммы по отношению к виброграмме. Оно равно 1:16 для каждой из волн, что как раз соответствует теоретической величине $\sqrt{FT} = \sqrt{232 \cdot 1,1} = 16$. Следует, однако, заметить, что визуально воспринимаемая разница в амплитудах виброграммы и коррелограммы на рис. 1 меньше 16, и при прочих равных, будет тем меньше, чем больше отдельных волн присутствует в сейсмограмме. Так, разница в интенсивности реальной виброграммы и ее "энергетической" коррелограммы может оказаться вообще незначительной. Типичный пример такой пары (виброграмма и коррелограмма) показан на рис. 2.

Сравнительный анализ сейсмограмм импульсного и вибрационного источников в пространстве импульсных сейсмограмм и виртуальных виброграмм по энергетическому критерию эквивалентности.

В натурном эксперименте в Новосибирской области при одной и той же расстановке были получены импульсная и вибрационная сейсмограммы. В качестве импульсного источника использовалась легкая кувалда и 100-мм стальная платформа. Энергия одиночного удара кувалды была измерена и оказалась равной около 100 Дж. Вибрационный источник пьезокерамического типа был разработан и изготовлен Г.В. Егоровым. Источник состоял из пакета активных шайб с рабочей платформой диаметром 400 мм на

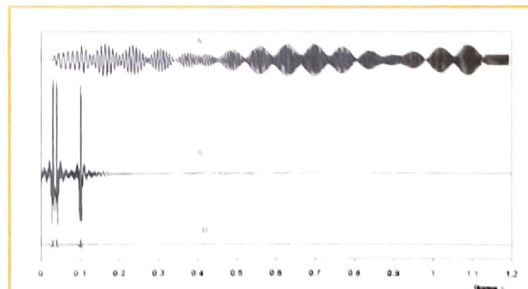


Рис. 1 Синтетическая виброграмма (А), состоящая из 3 волн, и ее "энергетическая" (Б) и "амплитудная" (В) коррелограммы



ТЕОРИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВИБРОСЕЙСМОРАЗВЕДКИ

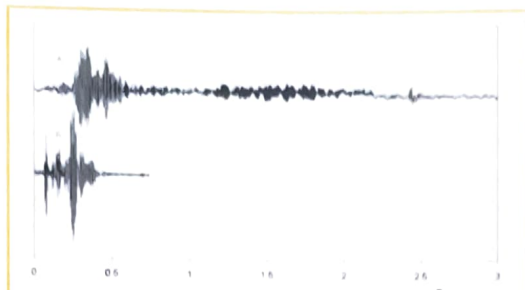


Рис. 2 Виброграмма (А) и коррелограмма (В) от пьезокерамического источника (вынос 40 м) в энергетическом масштабе

одном конце пакета и инертной массой 60 кг - на другом. Он устанавливался на грунт и дополнительно нагружался вспомогательным грузом. Источник питался силовым тиристорным преобразователем вольт-амперной мощностью 300 ВА. Однако активная электрическая мощность, идущая от преобразователя на источник, оказалась не более 1 Вт. Точнее активную мощность измерить не удалось вследствие существенно импульсного характера напряжения, вырабатываемого преобразователем, и исключительно реактивного характера входного электрического импеданса источника. Регистрация в обоих случаях проводилась с накоплением 16 воздействий (использовалась портативная цифровая сеймостанция "Лакколит X-M" разработки ООО "Логические системы"). Сейсмограммы и виброграммы приводились к одиночному воздействию и выражались в абсолютных значениях виброскоростей почвы.

Для импульсного источника было построено два волновых поля - открытым каналом (рис.3) и после полосовой фильтрации в полосе пропускания 78-312 Гц (рис.4), уравнивающей рабочую полосу импульсного источника с вибрационным. Третье волновое поле на этой же расстановке было построено для пьезокерамического источника на основе вибрационных сейсмограмм, прокоррелированных по энергетическому критерию (рис.5). В помощь сравнительному анализу этих трех сейсмограмм (рис.3-5) на рис.6 дана сборка "одноименных" трасс, по одной из каждого волнового поля (вынос 40 м).

Рассматривая сейсмограммы на рис.3-6, мы видим, что основная энергия импульсного источника находится вне (ниже) полосы частот вибрационного источника. Энергетический анализ импульсных сейсмограмм во временной области показывает, что на частотный диапазон виброисточника 78-312 Гц, то есть, на отфильтрованную сейсмограмму на рис. 4, приходится менее 1% энергии импульсной сейсмограммы от кувалды в широкой полосе

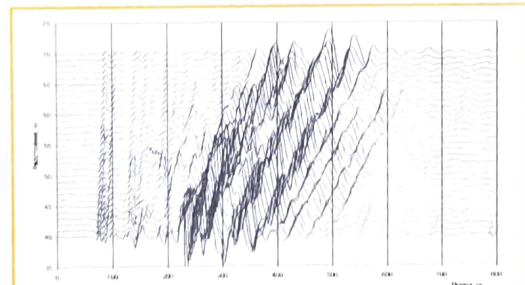


Рис. 3 Сейсмограмма поверхностного импульсного источника (кувалда с энергией удара 100 Дж) на базе 40-70 м

(рис.3). Правда, большая часть энергии удара кувалды сосредоточена в поверхностных волнах, они почти исчезают после фильтрации, тогда как на головную волну фильтрация оказала значительно меньшее влияние. Сравнивая далее равноценные по подосе частот волновые поля, созданные кувалдой и вибратором (рис. 4 и 5), можем заметить, что вибратор дает лучшее разрешение на объемных волнах. Так, на рис.5 на времени 80-90 мс уверенно разделяется головная волна на две, тогда как на рис. 4 это не очевидно.

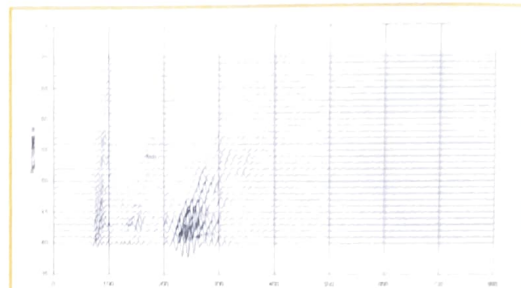


Рис. 4 Та же сейсмограмма от удара кувалды, что на рис.3, подвергнутая прямоугольной полосовой фильтрации с полосой пропускания 78-312 Гц

Спектральный анализ, несомненно, может оказать весьма существенную помощь для объективного сравнения импульсных и вибрационных источников. Как было отмечено выше, амплитудные и энергетические спектры импульсных сейсмограмм и виброграмм можно сопоставлять в абсолютных единицах, не прибегая к каким-либо коэффициентам пропорциональности, а просто соблюдая правила преобразования Фурье в абсолютных физических размерностях. Тем не менее, следует обратить внимание на использование виртуальных виброграмм, поскольку последние могут отображаться не только в функции времени, но и функции частоты. Для иллюстрации такого анализа на рис.7 показаны виртуальные виброграммы, полученные с помощью декорреляции (16) импульсных сейсмограмм, изображенных на рис.6 (в той же последовательности А, Б, В). При декорреляции использовался свип-сигнал вида (15) в полосе частот 0-340 Гц и параметром β таким же, как и у реального свипа. Поэтому ось абсцисс, являющаяся осью времени, отградуирована в мгновенных частотах виртуального свип-сигнала. Сборка виртуальных виброграмм на рис.7 дополнена четвертой трассой - реальной виброграммой пьезокерамического источника (рис.7Г). В соответствии с начальной частотой реального свипа начало реальной виброграммы смещено на графике на частоту 78 Гц.

Последним замечанием мы еще раз хотим

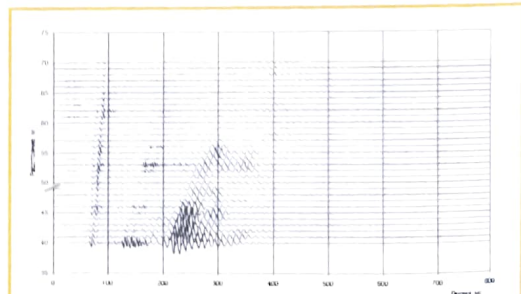


Рис. 5 Вибрационная сейсмограмма от пьезокерамического источника на той же расстановке, что и на рис.3 и 4, в полосе частот 78-312 Гц

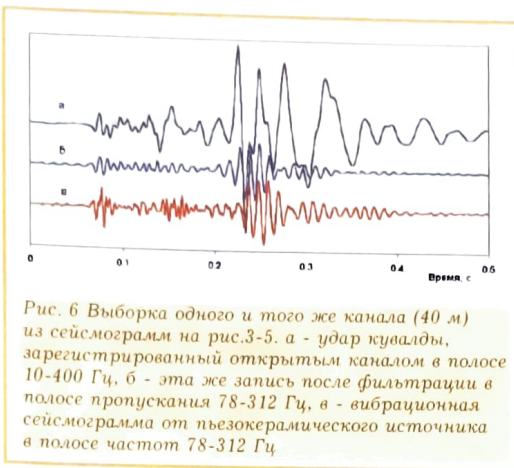


Рис. 6 Выборка одного и того же канала (40 м) из сейсмограмм на рис.3-5. а - удар кувалды, зарегистрированный открытым каналом в полосе 10-400 Гц, б - эта же запись после фильтрации в полосе пропускания 78-312 Гц, в - вибрационная сейсмограмма от пьезокерамического источника в полосе частот 78-312 Гц

подчеркнуть важный для понимания процедуры декорреляции факт - виртуальный свип-сигнал должен начинаться с нулевой частоты и заканчиваться выше верхней частоты реального свип-сигнала и выше верхней частоты импульсного сигнала. Это требование является достаточным для существования решения данной обратной задачи, и никакой другой регуляризации не требуется.

Из рис.7 видно, что вибрационный источник, существенно проигрывая в общей энергии импульсному, в области высоких частот имеет вполне заметное преимущество, что проявляется, как мы видели, в лучшем разрешении объемных волн. Напрашивается задача синтеза комбинированной импульсно-вибрационной сейсмограммы, которая могла бы обладать значительно большей выразительностью и информативностью, чем каждая из них в отдельности. Но это отдельная и достаточно сложная проблема.

Выводы

1. Рассмотрены два подхода к сопоставлению сейсмограмм, полученных с помощью импульсных и вибрационных источников: энергетический и амплитудный. При энергетическом подходе обеспечивается такой масштаб прокоррелированных сейсмограмм, при котором энергия коррелограммы равна энергии виброграммы. Этот подход назван "принципом сохранения энергии" при корреляции. При амплитудном

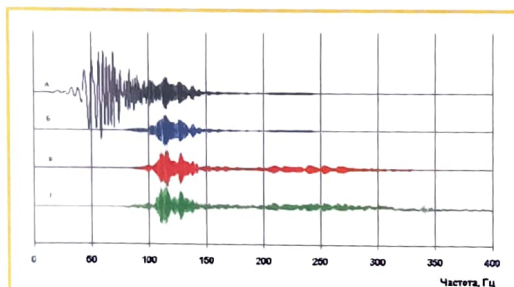


Рис. 7 Энергетически корректное сопоставление амплитуд виртуальных и реальных виброграмм импульсного и вибрационного источника для импульсных сейсмограмм, показанных на рис.6: а - виртуальная виброграмма записи импульсного источника (дальность 40 м) в полосе частот 10-340 Гц; б - то же после прямоугольной полосовой фильтрации с полосой пропускания 78-312 Гц; в - виртуальная виброграмма вибрационной сейсмограммы, полученная в полосе 10-340 Гц; г - реальная виброграмма в этой же точке профиля, полученная с помощью свип-сигнала в полосе 78-312 Гц

подходе устанавливается такой масштаб преобразования, при котором амплитуды коррелированных импульсов равны амплитудам породивших их компонент виброграммы. Оба подхода сводятся к выбору соответствующих амплитуд опорного сигнала при корреляции.

2. Отмечено, что в рамках энергетического подхода можно сопоставлять амплитудные или энергетические спектры сейсмограмм импульсного источника и виброграмм вибрационного в абсолютных единицах и естественных размерностях, не прибегая к каким-либо коэффициентам и, тем более, к нормировке, как это, к сожалению, зашито в большинстве стандартных пакетов. Надо всего лишь соблюдать правила преобразования Фурье с учетом размерности сигналов и времени.

3. Показано теоретически и практически проверено, что сравнение источников разного типа можно выполнять не только в области импульсных сейсмограмм или спектров, но и в пространстве виброграмм, что позволяет совместить временное и спектральное представление сейсмических сигналов. При этом виброграмма виброисточника используется в ее естественном виде, а запись импульсного источника обращается в виртуальную виброграмму.

В подготовке и проведении полевых экспериментов принимали участие Н.И. Геза, Г.В. Егоров, В.М. Носов, И.В. Сапрыкин, К.Б. Квасов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 03-05-64944.

Литература

1. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. "Сов. радио", М., 1966, 678 с.
2. Чичинин И.С. Вопросы теории сейсмического вибросондирования. / Методика сейсморазведки. М, Наука, 1965, с. 147-164.
3. Майоров В.В., Шнеерсон М.Б., Гродзенский В.А. Сравнительная помехоустойчивость импульсного и вибрационного способов возбуждения колебаний. Разведочная геофизика, вып. 91, М, Недра, 1980, с. 12-17.
4. Юшин В.И. Обоснование методики сопоставления энергетической эффективности импульсных и вибрационных источников сейсмических волн /Излучение и регистрация вибросейсмических сигналов.// Изд. АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т геологии и геофизики, Новосибирск, 1986, с.57-65.
5. Геза Н.И. Управление спектром вибросигнала с помощью нелинейных разверток частоты (на примере вибропросвечивания Байкальской рифтовой зоны). / Распределенная обработка информации. Труды международного семинара, 23-25 июня 1998 г, Новосибирск, Сибирское отделение РАН, 1998, с.446-456.
6. Юшин В.И., Геза Н.И. Метод абсолютных измерений амплитуд вибросейсмических колебаний по результатам их корреляционного накопления. /Вибросейсмические методы исследования Земли (Материалы Всесоюзной конференции), // АН СССР, Сиб. отд-ние, Вычислительный центр, Новосибирск, 1982, с.55-62.
7. Klauder J.R. The design of radar signals having both high range resolution and high velocity resolution. The Bell System Tech. Journ., 1960, v. 39, № 4. ("Зарубежная радиоэлектроника", 1961, № 1).
8. Klauder J.R., Price A.C., Darlington S., Albersheim W. J. The theory and design of Chirp radars. The Bell System Tech. Journ., 1960, v. 39, № 4. ("Зарубежная радиоэлектроника" 1961 г. № 1).
9. Чичинин М.С. Евчатов Г.П. Об одном способе расчета режима работы вибрационного источника с произвольным наперед заданным спектром. Геология и геофизика, №4, 1969, с.87-92.



ТЕОРИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВИБРОСЕЙСМОРАЗВЕДКИ