

Использование сигналов с опорной плиты и инертной массы вибратора в методике вибросейсмических работ

■ Жуков А.П., Колесов С.В., ООО «Геофизические системы данных», г.Москва

Введение

В технологии сейсмических (в том числе вибросейсмических) работ назревает очередная революция. В первую очередь она обусловлена требованиями нефтегазовых компаний к дальнейшему повышению детальности и достоверности геологических моделей нефтегазовых резервуаров, которые строятся в основном на базе 3-х мерных сейсмических съемок.

Также возрастают требования к повышению производительности работ, что ведет к сокращению общего цикла геологоразведочных работ, к качеству исходных данных, к четкости 3-х мерного изображения исследуемой земной толщи. Поэтому в последнее время при проведении 3-х мерных вибросейморазведочных работ наблюдается тенденция к переходу на увеличение плотности систем наблюдений, использование регистрации сигналов одиночными сейсмодатчиками и исключение группирования виброисточников.

Все это направлено на увеличение латеральной плотности наблюдений (аналог увеличения количества пикселей для улучшения изображения в компьютерах), расширение частотного диапазона возбуждаемых и принимаемых колебаний.

Одним из существенных элементов новых подходов к проведению сейсмических работ является появление так называемых «нодальных» (модульных) бескабельных систем регистрации сейсмических колебаний, представляющих из себя одноканальные цифровые с/станции (приёмные модули – ПМ) малого объема (0,5 – 2,5 кг) с автоном-

ным блоком питания, со встроенными сейсмодатчиками, либо с присоединёнными. При 3-х мерных съемках количество таких модулей может достигать нескольких десятков тысяч и более штук, что позволяет резко увеличить производительность работ и проводить съемку с любой плотностью в труднопроходимых условиях и местах со сложным рельефом. При этом модули оснащены системой GPS, что позволяет определять с высокой точностью их координаты, и они постоянно включены в режиме регистрации (считывание информации обычно происходит после 2 – 3 недельной работы). Для возбуждения обычно используются несколько мощных одиночных виброисточников, работающих по заданным программам. Организация работ в данном случае является одной из задач систем управления виброисточниками.

Геофизики - сейсморазведчики всегда хотели знать свойства сигнала, который посылается в геологическую среду источником возбуждения сейсмических колебаний. С появлением сейсмических вибраторов такая возможность как будто бы появилась. Однако сигнал, посылаемый в среду системой вибратор/грунт, достаточно заметно отличается от опорного сигнала, который управляет (в первом приближении) работой вибратора.

На свойствах посылаемого сигнала сказываются условия возбуждения, определяемые свойствами «присоединенной массы» грунта, вовлекаемой вибратором в процесс возбуждения сейсмических колебаний.

Для повышения качества результатов сейсмических работ нужно, чтобы сво-

йства посылаемого в среду сигнала были бы постоянны, но в таком случае следует как-то учесть (или компенсировать) изменение условий возбуждения по площади (профилю) сейсмических работ. Учет фильтрующего действия верхней части разреза и его компенсация достигается при использовании технологии адаптивной вибросейсморазведки АВИС [3], что позволяет дополнительно расширять эффективный частотный диапазон регистрируемых колебаний как в сторону высоких, так и низких частот.

В «адаптивной технологии» вибросейсморазведки для расчёта «адаптивного» свипа используется сейсмическая запись от предварительно посланного свипа. В случае «нодальных» систем запись информации с каждого ПВ может оказаться недоступной в процессе работ. В связи с этим было предпринято изучение возможностей использования сигналов с виброисточников для расчета «адаптивного» сигнала. В настоящее время в компании ГСД проводятся работы по модернизации программного обеспечения блоков управления виброисточниками GDS-I для работы с системами «нодального» типа.

Исследования [6] показывают, что характер спектра вибросейсмического сигнала можно оценить по «Ground Force» (называемой ещё действующей силой или земляной силой или силой земли). Для дальнейшего изложения обозначим её как GF. Сила GF вычисляется как сумма масштабированных и со своими знаками сигналов с акселерометров, установленных на плите и на инертной массе, умноженных на массы, соответственно плиты со штоком и инертной (реактивной) массы вибровозбудителя:

$$GF(t) = BP(t) \cdot m(BP) + RM(t) \cdot m(RM), \quad (1)$$

где BP – плита со штоком, BP(t) – её ускорение (как функция времени развёртки), RM – реактивная масса, RM(t) – ускорение реактивной массы в зависимости от времени.

В таком случае до начала производственных работ, не разматывая кос с сейсмоприёмниками, можно одним вибратором изучить на всех или заданных пунктах возбуждения площади сигналы GF и районировать площадь по условиям возбуждения.

Вместе с тем ясно, что сигналы плиты BP(t) и инертной массы RM(t) не просто обратны по фазе (и это показано в [6]), но каждый из них может иметь ещё свои особенности, которые помогут сопоставлять особенности GF с условиями возбуждения сейсмических сигналов (УВСС). Чтоб оценивать УВСС, нужно на каждом ПВ записывать сигнал GF(t), а лучше все три величины GF(t), BP(t), и RM(t), для удобства дальнейшего их использования в практике вибросейсмических работ.

Записывать сигналы GF(t), BP(t), RM(t) в полевых условиях на блоках управления вибраторами при производственных работах начали сравнительно недавно. При этом известно применение GF(t) для корреляционной обработки виброграмм при так называемой «сейсморазведке повышенной достоверности» (см. обзор публикаций зарубежной прессы [2]).

В России запись сигналов BP(t), RM(t), GF(t) на блоках управления вибраторами пока реализована на данный момент лишь в GDS-1 (Geophysical Digital System - 1) – многофункциональной геофизической системе управления виброисточниками, с помощью которой производятся полевые вибросейсмические работы, в том числе по технологии АВИС (адаптивной вибрационной сейсморазведке). Один из первых опытов валовой записи сигналов вибратора был проведен на

одной из площадей Западной Сибири. Ниже рассмотрены предварительные результаты анализа сигналов $BP(t)$, $RM(t)$ и $GF(t)$.

Общая характеристика полевого материала

В технологии АВИС [3] на каждом ПВ первоначально производится отработка настроечного свип-сигнала, далее определяются параметры оптимального адаптивного свипа, который и отрабатывается вибратором (группой вибраторов) с заданным числом накоплений. В данных опытах в качестве настроечного использовался ЛЧМ свип, а число накоплений на ПВ уже с адаптивным свипом было равно 6. Граничные частоты всех свипов были 10 Гц и 100 Гц, длительности частотных развёрток – 10 с, конуса – по 0.5 с. Интервал дискретизации временных развёрток составлял 0.001 с.

Амплитуды сигналов, выставляемые на вибраторе («прижим»), были постоянны.

При каждом пуске сейсмического сигнала (настроечном или производственном) производилась запись во флеш – память четырёх сигналов: опорного электрического (обозначим его как $SB(t)$), сигнала с акселерометра на опорной плите – $BP(t)$, сигнала с акселерометра на инертной массе – $RM(t)$ и вычисленного сигнала «действующей» силы – $GF(t)$.

Рассмотрим на что, судя по имеющемуся полемому материалу, следует обращать внимание при анализе $BP(t)$, $RM(t)$ и их спектров $BP(f)$, $RM(f)$ в зависимости от ПВ. Это:

1) характер изменения амплитуд квазисинусоид $BP(t)$ и $RM(t)$, в том числе верхней и нижней огибающих этих сигналов, а также полусуммы этих огибающих в зависимости от времени;

2) характер изменений осреднённых амплитуд спектров (тенденции, а также пики и провалы) в зависимости от ПВ и частоты свипа. Осреднение необходимо для лучшего прослеживания тенденций изменения спектральных амплитуд на фоне их дисперсии;

3) величины общей дисперсии спектральных амплитуд и изменение средней дисперсии в зависимости от частоты и других факторов;

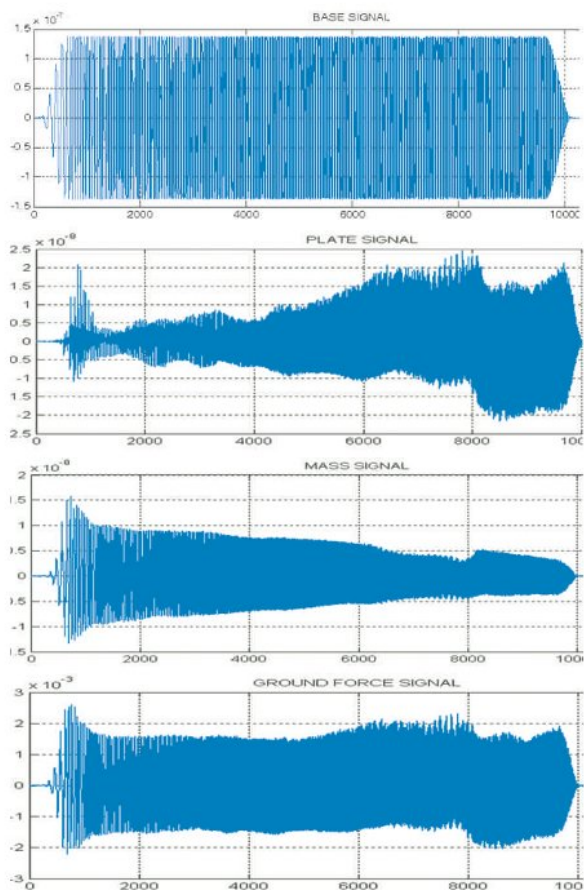
4) общую мощность побочных гармоник, вид и максимальные амплитуды их спектров;

5) соотношение параметров побочных гармоник для $BP(t)$ и $RM(t)$.

При анализе упомянутых выше величин и характеристик нужно учитывать и влияние разного рода помех, то есть здесь необходима большая статистика, чтобы вычленивать признаки, по которым можно было бы предсказывать значимые для вибросейсморазведки изменения условий возбуждения.

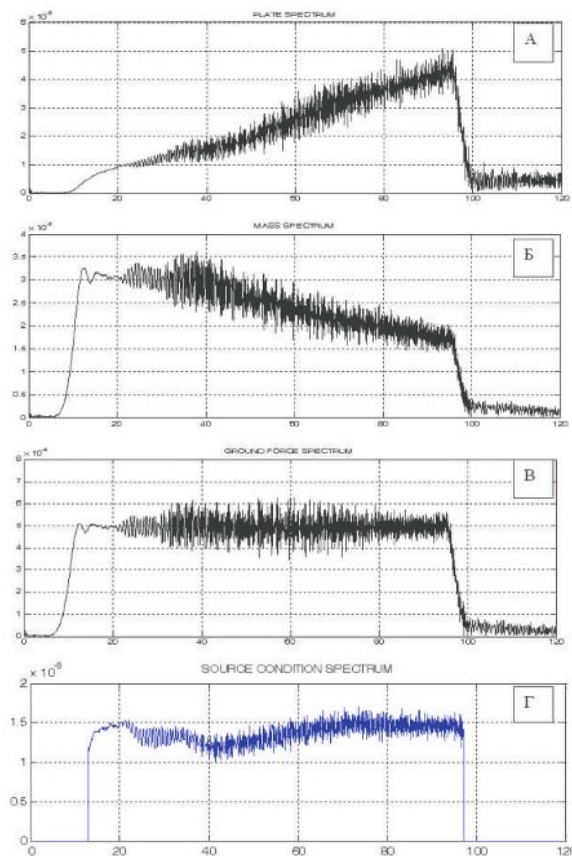
Для оценки изменений условий возбуждения с помощью анализа $GF(t)$, $BP(t)$, $RM(t)$ и их спектров целесообразно использовать в качестве опорных ЛЧМ свипы, имеющие одни и те же параметры развёртки и спектры прямоугольной формы для всех исследуемых ПВ. Таких записей было сделано более 120. Анализировались временные развёртки сигналов, их спектры, автокорреляционные функции и функции взаимной корреляции.

Рассмотрение временных развёрток сигналов $BP(t)$, $RM(t)$ и $GF(t)$ показало, что их амплитуды меняются со временем (и с частотой, что удобно было наблюдать, поскольку $F(t)$ – функция частотной развёртки была линейной) (рис.1). Амплитуды сигналов $BP(t)$ в среднем нарастают, а сигналов $RM(t)$ – в среднем (для разных ПВ) убывают со временем.



▲ Рис. 1. Временные развёртки регистрируемых сигналов: опорного – BASE, с плиты – PLATE, с инертной массы – MASS, действующей силы – GROUND_FORCE на одном из ПВ.

Амплитуды сигналов $GF(t)$ для разных ПВ в основном постоянны (в размахе). Однако у всех трёх сигналов средняя линия сигнала может смещаться и колебаться относительно нуля. Возможная причина этого – нелинейные сейсмические явления, нарушение закона Гука. Говорить об их особенностях пока рано, но важно то, что они проявляются по-разному от ПВ к ПВ и можно попытаться их использовать для оценки изменений УВСС. Другие детали временных развёрток из-за большой их длительности неудобны для анализа. Более интересные сведения о сигналах получаются при анализе их амплитудных спектров и спектров мощности. Обозначим спектры сигналов $SB(t)$, $BP(t)$, $RM(t)$, $GF(t)$ соот-



▲ Рис. 2. Типичные спектры сигналов: А) с плиты – $BP(f)$, Б) с инертной массы – $RM(f)$, и В) сигнала Ground Force – $GF(f)$. Г) спектральная характеристика условий возбуждения $SC(f)$ – на другом ПВ по сравнению с рис.1.

ственно через $SB(f)$, $BP(f)$, $RM(f)$ и $GF(f)$. На рис. 2 показаны типичные спектры этих сигналов вибраторов при генерации ЛЧМ свипов (полученные на другом ПВ, чем на рис.1). Спектр опорного ЛЧМ сигнала $SB(f)$ не приводится – он всем хорошо известен.

Общий вид спектров следующий: большей частью спектры $BP(t)$ возрастают от нуля по прямой линии или вогнутой параболе, тогда как спектры $RM(t)$, соответственно, убывают от низких частот к высоким, а все спектры $GF(t)$ имеют вид, близкий к прямоугольному, поскольку мы пока рассматриваем результаты посылки ЛЧМ свипов. Все сигналы генерировались в интервале частот 10 – 100Гц, так что колебания

после 100Гц можно отнести к побочным гармоникам – кратным, суммарным, вызванными нелинейными искажениями основного сигнала (1й гармоники). Так на рис.2 после 100Гц амплитуды спектров $BP(f)$, $RM(f)$ и $GF(f)$ не равны нулю, что означает, что эти спектральные компоненты относятся к побочным гармоникам. При шаге дискретизации 0.001с максимальная частота спектра равна 250Гц, - половине частоты Найквиста, если исключаются аляйсинг-эффекты. На рисунках 4 – 7 спектры приведены уже для полосы частот 0 – 250Гц и хорошо видны части спектров (более 100Гц) побочных волн – гармоник.

Соотношение между спектрами сигналов с плиты и с инертной массы было отмечено ещё в [6]: на мягких грунтах видно, как вибрирует плита, а масса ведёт себя спокойнее, тогда как на жёстком грунте, например на дорожном асфальте – сильно подсакивает масса, а движения плиты почти не видно.

Согласно работе [5] Кузнецова В.В. и др., спектральную характеристику условий установки вибратора (условия возбуждения сигнала) можно выразить отношением спектра сигнала с плиты $BP(\omega)$ к спектру сигнала, генерируемого вибратором. В работе [5] в качестве такого сигнала был взят опорный электрический сигнал $SB(t)$, поскольку сигнал с реактивной массы не регистрировался. В нашем случае регистрировались сигналы акселерометров с плиты и массы - $BP(t)$, $RM(t)$, а также расчётный сигнал $GF(t)$, который был использован в качестве сигнала, посылаемого вибратором в грунт.

Для приведения спектров сигналов с акселерометра к спектрам перемещения плиты вибратора в [5] отношение $BP(f)/(GF(f))$ должно делиться ω^2 . Практика обработки и анализа (сравнения

между собой результатов обработки с разных пунктов возбуждения) исходных данных показала, что удобнее использовать не сами перемещения, а их скорости, т.е. делить отношение $BP(f)/(GF(f))$ на ω . Переходя от ω к $(2\pi f)$, получим следующее выражение для спектральной характеристики условий возбуждения (source condition spectrum – $SC(f)$):

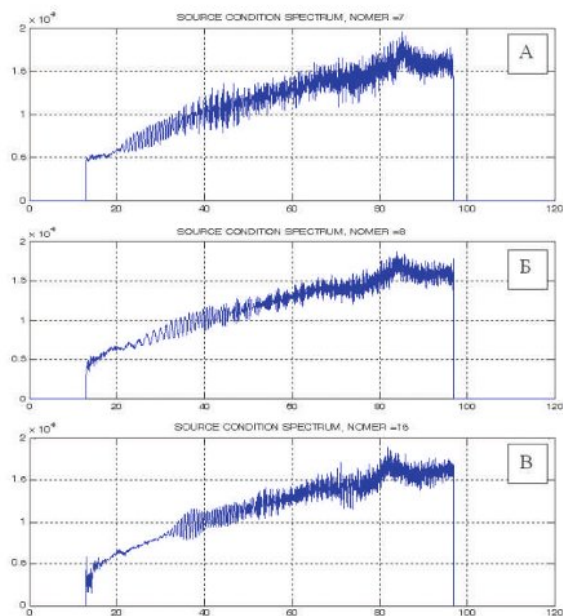
$$SC(f) = BP(f)/(GF(f) * (2\pi f)) \quad (2)$$

В качестве “оправдания” перехода от ω^2 к ω вспомним, что в сейсморазведке сейсмоприёмники регистрируют именно скорости перемещения.

Вычисления проводились в сокращённом частотном интервале – чтобы не попасть при делении в зоны конусования свипов. В данном случае конусование захватывало несколько больше 2Гц, поэтому частотный интервал 10 – 100Гц был сокращён до 13 – 97Гц.

Вычисления велись в системе Матлаб-7. Были опробованы варианты с делением на ω и ω^2 , с делением на опорный сигнал $SB(f)$ (вместо $GF(f)$), как на константу - при ЛЧМ свипе, и на заданный опорный НЧМ, если рассматривать посылки НЧМ свипов – адаптивного, произвольного вида, спектр которого строился по набору точек, а также функциональных [4] адаптивных НЧМ свипов, параметры которых подбирались по спектру адаптивного свипа. Сравнение показало, что работа со спектром опорного сигнала $SB(f)$ даёт тот же результат, что и использование $GF(f)$, за исключением мелких деталей характеристик $SC(f)$.

Интересно, что характеристика условий возбуждения $SC(f)$ в большинстве случаев записи сигналов $SB(t)$, $BP(t)$, $RM(t)$ и $GF(t)$, для одного и того же ПВ одна и та же с точностью до постоянного множителя, независимо от посылаемого сигнала – ЛЧМ, адаптивного общего вида или функционального, при первом



▲ Рис. 3 Характеристики условий возбуждения $SC(f)$ для трёх свипов на одном ПВ:

- А) установочного ЛЧМ,
- Б) адаптивного АВИС и
- В) функционального адаптивного НЧМ свипа (ФАС).

накоплении или последующих (см. рис.3). Это свидетельствует об устойчивости такой характеристики. Однако для записей сигналов на некоторых ПВ были замечены и исключения.

На рисунках 4 ÷ 7 приведены различные варианты форм и соотношений спектров сигналов $BP(t)$ и $RM(t)$. Приведены некоторые наиболее нетипичные спектры из имеющегося исходного материала, что, конечно, не означает, что они равновероятны.

На этих рисунках хорошо заметны изменения характеристик $SC(f)$ в зависимости от размещения пункта возбуждения (ПВ). Чтобы связать эти изменения с какими-то физическими и геоморфологическими условиями возбуждения, нужно проводить специальные наблюдения на местности, определяя, в том числе, координаты ПВ, фиксируя описание особенностей грунта на ПВ и внося эти данные в записи сигналов $SB(t)$ $BP(t)$,

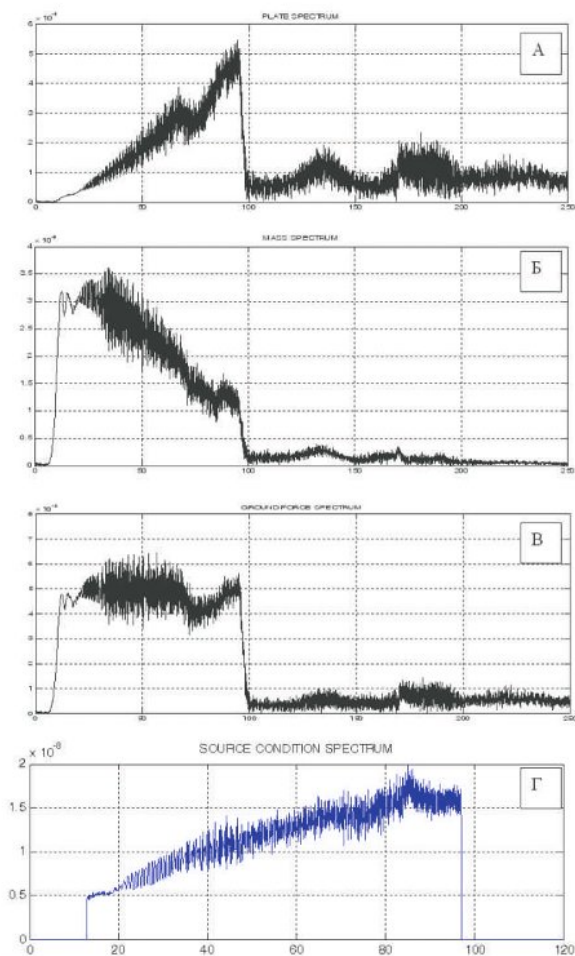
$RM(t)$ и $GF(t)$ (записи велись в системе SEG Y), что в данном случае не было сделано.

Кроме того, такие опыты нужно специально ставить, чтобы избежать нежелательных случайностей при позиционировании вибраторов на ПВ и чтобы не принять плохую подготовку профиля возбуждения или неудачную установку вибратора на ПВ за физическую закономерность.

При анализе спектров $BP(f)$, $RM(f)$ и $GF(f)$ на предмет их связи с условиями возбуждения можно было заметить что, как и следовало ожидать, наиболее интересны спектры записей с плиты $BP(f)$. Это можно видеть на рисунках 4÷7. Однако интересны и спектры $RM(f)$, иногда имеющие, на первый взгляд, свои особенности, несмотря на их зависимость от движения плиты. На рисунках, начиная с №4, не приводятся спектры опорного сигнала и $GF(f)$. Опорный сигнал везде один и тот же, а спектр $GF(f)$ в частотном диапазоне 10 – 100 Гц везде, за редким исключением (как, например, на рисунке 2), очень близок к спектру опорного сигнала.

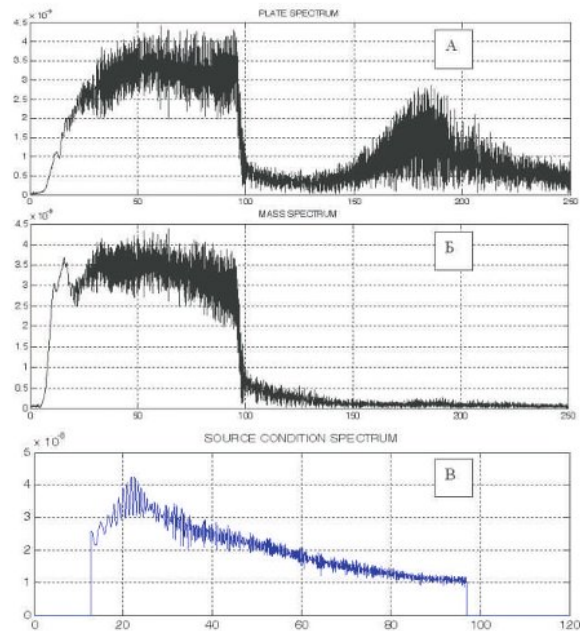
Возможно, для районирования нет единого признака для всех грунтов. Сведение всех различий УВСС только к жёсткости грунта явно недостаточно: убираются из рассмотрения все нелинейные явления, а вместе с ними и связанные с ними помехи, а также возможное использование этих явлений для получения дополнительной геологической информации. Кроме того, такие признаки могут быть различными для разных геофизических задач.

Кроме общего вида спектров $BP(f)$, $RM(f)$, $GF(f)$ и характеристик $SC(f)$ представляет интерес и вид спектров побочных волн-гармоник, хорошо видных на



▲ Рис. 4. Амплитудные спектры в диапазоне 0-250Гц сигналов с плиты А), массы Б) и действующей силы В) на одном из ПВ. После 100Гц на сигнале с плиты видны сильные спектральные составляющие волн-гармоник. На рис.Г) характеристика условий возбуждения SC(f) в диапазоне 13-97Гц.

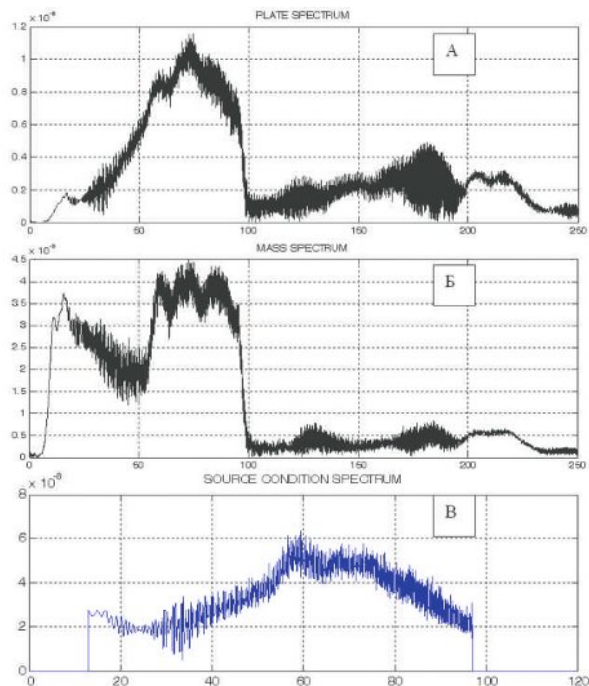
рисунках 4÷7 после 100Гц и до 250Гц. Волны гармоники есть и до 100Гц, но на общем фоне спектра записей они не так заметны. Лучше всего гармоники видны на BP(f), тогда как на RM(f) они относительно слабые, на GF(f) – они средние по амплитудам, хотя общий их рисунок повторяется подобно BP(f). Можно полагать, что волны – гармоники также могут характеризовать условия возбуждения, но как именно – ещё предстоит выяснить. При этом известно, что сам вибратор (без присоединённой массы) является генератором волн – гармоник.



▲ Рис. 5. Спектры сигналов с плиты – А) BP(f) и с массы – Б) RM(f) оба почти прямоугольные и не похожи на соответствующие спектры рисунков № 2 и № 3. На спектре BP(f) видны мощные побочные гармоники, тогда как на спектре RM(f) их амплитуды на много меньше – всё это при одних и тех же нормирующих множителях (10^{-9}). На рис. В) характеристика условий возбуждения SC(f) в диапазоне 13-97Гц.

Наличие достаточно сильных (с амплитудами иногда более половины амплитуды спектра 1й гармоники – см. рис 5А и рис. 7А) побочных волн – гармоник позволяет считать их частью возбуждаемого сигнала. Конечно, разработчики вибраторов стремятся уменьшить нелинейные искажения в сигнале вибратора, ну а если эти искажения возрастают именно из-за условий возбуждения? В таком случае следует производить корреляционную обработку не с опорным сигналом, а с сигналом GF(t).

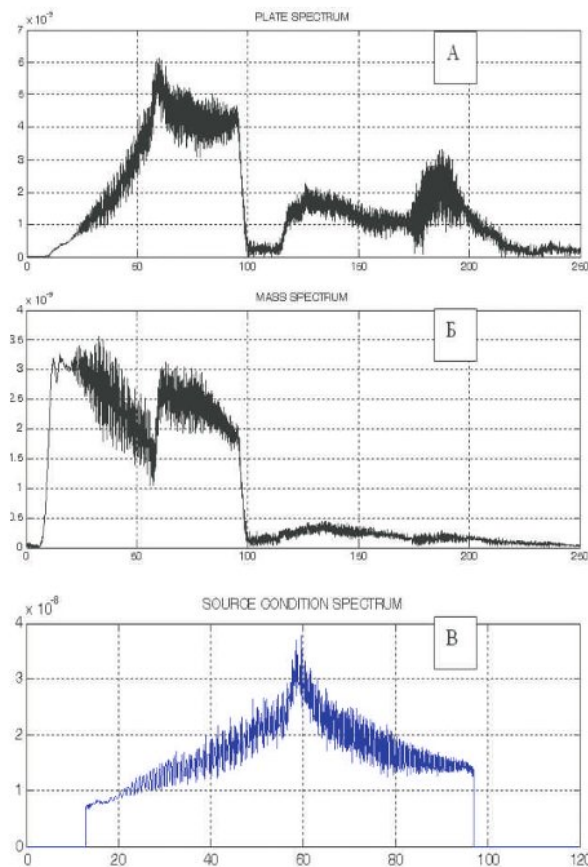
Из того насколько мощны бывают волны – гармоники следует, что вопрос о том, с чем коррелировать виброграммы – с опорным сигналом или сигналом GF(t), явно не праздный и если есть



▲ Рис. 6. Спектры $BP(f)$ и $RM(f)$ довольно причудливой формы и не похожи на соответствующие спектры рисунков № 2 и № 4. Амплитуды побочных гармоник на спектре $BP(f)$ примерно в 6–7 раз больше, чем на спектре $RM(f)$. На рис. B) характеристика условий возбуждения $SC(f)$ в диапазоне 13-97Гц.

возможность, то лучше использовать $GF(t)$. Разумеется, взаимная корреляция опорного сигнала с результатом посылки $GF(t)$, имеющего в своём составе волны гармоник, приводит к ослаблению их влияния, но шумы взаимной корреляции всё же остаются.

Идея использования для взаимной корреляции виброграмм сигнала, посылаемого вибратором в среду, чтобы учитывать изменение условий возбуждения от ПВ к ПВ, не нова. Так в [1] предлагается для взаимной корреляции виброграмм использовать $GF(t)$ сигнал. Однако существовавшие тогда блоки управления (БУСВ) не могли ещё записывать сигналы $GF(t)$ на каждом ПВ и это предложение не было реализовано в производственных условиях.



▲ Рис. 7. Спектры $BP(f)$ и $RM(f)$ с резонансными пиками на 60Гц – внутри частотного интервала. Соотношение амплитуд гармоник соответственно примерно 8:1. На рис. B) характеристика условий возбуждения $SC(f)$ в диапазоне 13-97Гц.

Выше была рассмотрена лишь небольшая часть того, что может быть получено на основе анализа имеющегося фактического материала. Сюда следует отнести анализ волн-гармоник и их зависимость от условий возбуждения вибросейсмических сигналов, анализ дисперсий амплитуд спектров сигналов с плиты и массы, анализ характеристик условий возбуждения $SC(f)$ и спектров $BP(f)$, $RM(f)$ и $GF(f)$ при возбуждении нелинейных свипов и многое другое, что может быть обнаружено при вновь поставленных экспериментах. Так что по тем данным, что приведены выше, можно делать лишь предварительные выводы.

Выводы

1) При вычислении спектральной характеристики условий возбуждения на ПВ $SC(f)$ целесообразно пользоваться формулой $SC(f) = BP(f)/(GF(f) \cdot (2\pi f))$, где в качестве спектра сейсмического сигнала, возбуждаемого в среде, взят спектр действующей силы $GF(f)$ и взята первая степень круговой частоты $(2\pi f)$, а не её квадрат (см. [5]).

2) Вид спектральной характеристики условий возбуждения может достаточно заметно меняться, что позволяет надеяться на использование её для расчёта параметров адаптивного сигнала и районирования площади работ.

3) Сейсмический вибратор с возможностью записи возбуждаемых сигналов – это очень полезное устройство для изучения условий возбуждения вибро-сейсмических сигналов, а также для других целей, где требуется определение механических свойств грунтов.

Литература

1. Кострыгин Ю.П., Нигматзянов А.М., Гродзенский В.А., Шнеерсон М.Б. 1992г., «Система для проведения вибросейсмической разведки» АС СССР № 1805411, где предлагается для взаимной корреляции виброграмм использовать сигнал, посылаемый вибратором в среду и конкретно – GF сигнал.

2. Шнеерсон М.Б., Жуков А.П., 2010, Современные тенденции вибрационной

сейсморазведки (по материалам зарубежных статей)//Приборы и системы разведочной геофизики, СО ЕАГО, 3.

3. Жуков А.П., Шнеерсон М.Б., 2000, Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки: М., ООО «Недра-Бизнесцентр».

4. Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б., 2011, Сейсморазведка с вибрационными источниками.//Тверь, Изд. «ГЕРС»

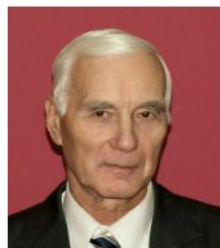
5. Кузнецов В.В. и др. 1981, Влияние условий установки виброисточника на возбуждаемое волновое поле. //В сб. Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. АН СССР, ИФЗ, «Наука», М..

6. Schrodtt Joseph K., 1987, Techniques for improving vibroseis date: Geophysics, 52,4, 469 - 482.

Подробнее об авторе



Жуков
Александр Петрович
д.т.н., профессор МГУ,
Директор ООО
"Геофизические
Системы Данных"



Колесов
Сергей Васильевич
д.т.н., научный сотрудник
ООО «Геофизические
системы данных» (ГСД).