

От электродинамического сейсмоприёмника скорости к электродинамическому сейсмоприёмнику ускорений

А.В. Рыжов, А.К. Хромоин, ГФУП "ВНИИГеофизика", г. Москва,
С.А. Жгенти, Б.В. Запорожец, ООО "СИ Технолodge Инструментс", г. Геленджик

Занимаясь разработкой и конструированием регистрирующей аппаратуры для сейморазведки в транзитных зонах, специалисты "СИ Технолodge Инструментс" столкнулись с необходимостью проводить приём колебаний в каждом пункте наблюдений парой датчиков — пьезоэлектрическим датчиком и электродинамическим сейсмоприёмником. Первоначально это диктовалось необходимостью увязывать материалы, зарегистрированные в транзитной зоне с материалами, полученными: и на суше, где для приема колебаний, как правило, используются электродинамические сейсмоприёмники, и в акватории, где применяются пьезоэлектрические датчики. При этом, волновые поля, зарегистрированные пьезоэлектрическим датчиком, всегда выделялись большей временной разрешенностью. Дальнейшая разработка методики проведения наблюдений в транзитных зонах [2] показала, что из-за различий в характеристиках направленности 1-ого рода у этих датчиков, они по-разному отображают явления интерференции, происходящие в ближней зоне приемника, которые могут приводить к сильнейшему изменению формы суммарной регистрируемой волны. Модельные расчёты показали, что для исключения искажений регистрируемой волны, вызванной интерференцией в ближней зоне приёмника, данные, зарегистрированные датчиками с различными характеристиками направленности 1-ого рода, необходимо суммировать. Это диктуется тем, что противоположные экстремумы характеристик сложения волн для этих датчиков совпадают по оси частот. При этом суммирование колебаний, зарегистрированных обоими датчиками (пьезоэлектрический датчик имеет сферическую направленность, а электродинамический — вертикальную) позволяет практически полностью исключить влияние интерференции в ближней зоне приемника. Конечно, для обеспечения корректности процедуры сложения зарегистрированных колебаний необходимо применять датчики с идентичными, или хотя бы близкими АЧХ.

Так появилась необходимость выбрать электродинамический сейсмоприёмник, обладающий АЧХ близкой к АЧХ пьезоэлектрического датчика и, как следствие, позволяющий повысить разрешающую способность регистрируемых данных.

Наибольшее количество видов и объёмов сейморазведочных работ в настоящее время проводятся с электродинамическими сейсмоприёмниками скорости. Такие их свойства, как высокая надёжность, отсутствие источников питания, достаточная фазовая идентичность, большой динамический диапазон, низкий уровень шумов, небольшие нелинейные искажения, удовлетворительные значения выходных сопротивлений, несомненная масса, большой диапазон рабочих температур, обеспечили их широкое применение на протяжении многих десятилетий. Параметры современных электродинамических сейсмоприёмников скорости достаточно хорошо согласованы с динамическим диапазоном сейсмических сигналов и уровнем шума сейсмического канала записи цифровых и телеметрических станций.

Однако, электродинамические сейсмоприёмники скорости имеют существенный недостаток, связанный с их ограниченной разрешающей способностью. Чтобы увеличить разрешающую способность сейсмических исследований, в [12] рекомендованы к применению дорогостоящие акселерометры. Пояснения к этой рекомендации

дано позднее в [10]: "если вибратор развивает квазигармонические силовые нагрузки постоянной амплитуды, то скорость перемещения частиц упругой среды будет убывать с ростом частоты. С этих позиций электродинамический сейсмоприёмник уже не является оптимальным, так как он приводит к закономерному уменьшению амплитуд волн с ростом частоты по линейному закону". Вывод подтверждён практикой работ, проводимых с вибрационными источниками. Совсем недавно в 2005 году были проведены теоретические исследования дискретной модели упругой среды [7]. В результате этих исследований вычислена передаточная функция такой модели. На основании полученной передаточной функции сделан вывод о том, что сила, возбуждаемая сейсмическим источником, передаётся по сейсмогеологической среде со скоростью, определяемой волновым уравнением, и, достигнув сейсмоприёмника, приводит его корпус в движение с ускорением, пропорциональным воздействующей силе источника. Для входных сигналов, пропорциональных ускорениям перемещений изучаемой упругой среды, АЧХ оптимального сейсмоприёмника должна быть в рабочем диапазоне частот параллельна оси частот. АЧХ же электродинамического сейсмоприёмника скорости представляет собой равносторонний треугольник (рис. 1) с вершиной на частоте свободных колебаний, имея до и после этой частоты крутизну среза 6 дБ на октаву. Сейсмоприёмник с такой АЧХ снижает уровень как низкочастотных, так и высокочастотных составляющих сейсмического сигнала и тем самым, уменьшает потенциальную разрешающую способность принимаемого сигнала [5].

Оптимальные АЧХ имеют пьезоэлектрические акселерометры. Но у них есть недостаток, связанный с уменьшением их чувствительности с понижением частоты воспринимаемых сигналов. Это обусловлено тем, что рабочий частотный диапазон пьезоэлектрического акселерометра расположен на наклонной линии АЧХ механического колебательного звена, где значение его передаточной функции стремится к нулю пропорционально отношению ω^2/ω_0^2 . Высшая частота рабочего частотного диапазона пьезоэлектрического сейсмоприёмника выбирается в три раза меньше частоты свободных колебаний механического колебательного звена для того, чтобы исключить влияние резонансного подъёма АЧХ. Уже на высшей частоте диапазона относительное перемещение корпуса и инерционного тела будет почти на порядок меньше перемещения корпуса, а для низшей частоты, составляющей одну сотую от высшей частоты диапазона, будет меньше перемещения корпуса в 10^5 раз. Для того, чтобы воспринять перемещение корпуса 1 мм на частоте 1 Гц, пьезоэлектрический акселерометр должен иметь разрешающую способность относительного перемещения корпуса и инерционного тела 10^{-14} м. Внутренние шумы этого прибора на два порядка больше. Так пьезоэлектрический акселерометр для исследований низкочастотных вибраций 8306 фирмы Брюль и Кьер имеет частотный диапазон от 0,06 до 1250 Гц, частоту свободных колебаний 4500 Гц, коэффициент преобразования 1 В/м/с², динамический диапазон 114 дБ, эффективное напряжение шума 14 мкВ, массу 0,5 кг. Наименьшая амплитуда воспринимаемого перемещения на

частоте 10 Гц равна 5 нм. Это на два порядка хуже, чем у электродинамического сейсмоприёмника GS-32CT. На рис. 1 приведена АЧХ пьезоакселерометра 8306.

В последнее время предпринимаются попытки использовать в качестве приёмников сейсмических сигналов дорогостоящие компенсационные акселерометры, используемые в навигации [3]. Лучшим из них является АК-6, разработанный Ленинградским институтом электромеханики и Московским институтом автоматики. Прибор измеряет свой угол наклона, сохраняя работоспособность в любом положении. Его коэффициент преобразования 0,12 В/м/с². Его динамический диапазон 154 дБ, наименьшая амплитуда воспринимаемого ускорения 2·10⁻⁶ м/с². В АК-6 применён ёмкостный преобразователь, потенциально способный измерять перемещение инерционного тела относительно корпуса с разрешением 10⁻¹⁴ м [4]. Разрешающая способность АК-6 по перемещению на частоте 10 Гц на порядок хуже, чем у GS-32CT. К тому же эти акселерометры, кроме высокой стоимости, превышающей стоимость известных электродинамических

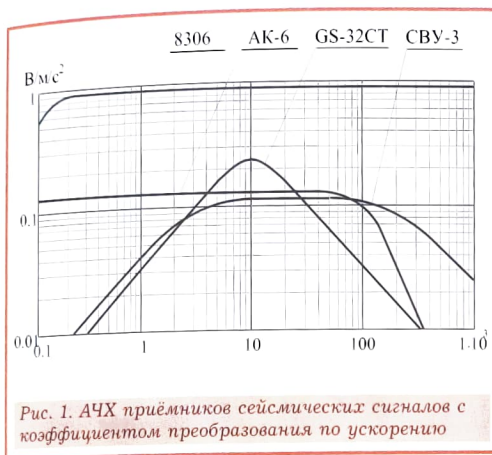


Рис. 1. АЧХ приёмников сейсмических сигналов с коэффициентом преобразования по ускорению

сейсмоприёмников на два порядка, имеют и второй недостаток, связанный с ограничением их частотного диапазона справа частотой 100 Гц.

Фирма Input/Output разработала трёхкомпонентный акселерометр VectorSeis. Взяв за основу компенсационный акселерометр для навигации, фирма расширила его частотный диапазон в сторону высоких частот, уменьшив массу инерционного тела до долей грамма и заменив в обратной связи тяжёлый (с обмотками) электродинамический двигатель на лёгкий электростатический с конденсаторными пластинами, напылёнными на инерционном теле. У VectorSeis частотный диапазон находится в пределах от 2 до 200 Гц, динамический диапазон равен 105 дБ, наименьшая амплитуда воспринимаемого ускорения на порядок хуже, чем у АК-6, а наименьшая амплитуда воспринимаемого перемещения на частоте 10 Гц на два порядка хуже, чем у GS-32CT.

Ухудшение разрешающей способности акселерометра VectorSeis, видимо, связано с неоптимальными значениями параметров этого прибора и, в первую очередь, с малой массой инерционного тела его механического колебательного звена. Как известно [1], действующее на корпус акселерометра ускорение, эквивалентное ускорению, вызываемого внутренним тепловым шумом демпфирующего устройства механического колебательного звена, равно:

$$a = \sqrt{4kT \cdot \Delta f \cdot \frac{4\pi\beta f_0}{m}} \quad (1)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°К – постоянная Больцмана, $T = 300^\circ\text{K}$ – абсолютная температура, Δf – рабочий частотный диапазон, β – степень затухания механического колебательного звена, f_0 – частота его свободных колебаний, m – масса инерционного тела звена.

Ускорение, рассчитанное по формуле (1) для сейсмоприёмника GS-32CT (с параметрами: $\Delta f = 256$ Гц; $\beta = 0,7$; $f_0 = 10$ Гц; $m = 11$ г), равно $0,1 \cdot 10^{-6}$ м/с². То же ускорение для акселерометра VectorSeis превышает $20 \cdot 10^{-6}$ м/с².

Если, сохранив положительные свойства электродинамического сейсмоприёмника скорости, создать в нём степень затухания больше единицы, то в результате получим электродинамический сейсмоприёмник ускорений в частотном диапазоне тем более широком, чем больше степень затухания. В 1972 году впервые электродинамический сейсмометр ускорений ОСП-2 создал сотрудник Института Физики Земли В.А.Токмаков. Он разработал теоретические основы работы ОСП-2 в частотном диапазоне от долей до первых единиц герц и получил соотношения для расчёта параметров такого сейсмометра [11]. Из-за увеличения индуктивной связи между каркасом и обмоткой катушки в частотном диапазоне сейсмических сигналов нефтегазовой сейсморазведки (от единиц до первых сотен Гц) эти соотношения не могут быть использованы при расчёте сейсмоприёмника ускорений.

Во ВНИИГеофизика разработан электродинамический сейсмоприёмник вертикальных ускорений СВУ-3 с рабочим частотным диапазоном от 3 до 250 Гц. На рис. 1 изображена его АЧХ, совпадающая с АЧХ фильтра, согласованного со спектром сейсмического сигнала. Описание конструкции и расчёт параметров сейсмоприёмника даны в [6], его передаточная функция получена в [8], а технические характеристики приведены в [5]. Рассчитанные по формуле (1) внутренние шумы, создаваемые механическим колебательным звеном, составляют $0,3 \cdot 10^{-6}$ м/с² и не превышают внутренних шумов, создаваемых сопротивлением обмотки СВУ-3.

Именно этот электродинамический сейсмоприёмник вертикальных ускорений был выбран специалистами "СИ Технолоджи Инструментс" для использования в системе регистрации для транзитных зон Marsh Line.

В настоящее время между "СИ Технолоджи Инструментс" и ГФУП "ВНИИГеофизика" действует договор о подготовке документации на мелкосерийное производство СВУ-3 с рабочим частотным диапазоном от 3 до 250 Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Аки, П. Ричардс. Количественная сейсмология. М.: Мир, 1983.
2. Жентли С.А., Запорожец Б.В. Сбор сейсмических данных и телеметрия переходных зон // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов: Издательство Полиграф-Депо. – 2005. №3.
3. Коновалов С.Ф. и др. Опыт разработки малошумящего акселерометра. // Гирскопия и навигация. – 2000. – №3.
4. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин // Л.: Энергоатомиздат, 1983
5. Рыков А.В. Анализ свойств сейсмоприёмников // Геофизика. – М.: Издательство Герс. – 2003. – №4.
6. Рыков А.В. Новый электродинамический сейсмоприёмник ускорений. // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов: Издательство Полиграф-Депо. – 2002. – №2
7. Рыков А.В. Распространение волн в дискретной модели упругой среды. // Разведка и охрана недр. – 2005. – №2-3.
8. Рыков А.В. Электродинамический сейсмоприёмник ускорений. // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов: Издательство Полиграф-Депо. – 2004. – №4
9. Теория автоматического управления. Часть 1. Под редакцией Воронова А.А. – М. Высшая школа. – 1977.
10. Теория и практика наземной невязрывной сейсморазведки. Под редакцией Шнейерсона М.Б. – М.: Недра. – 1998.
11. Токмаков В.А. О сейсмических приборах с большим затуханием. // Сейсмические приборы. – М.: Наука. – 1977. – Выпуск №10.
12. Шериф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. Том 1. – М.: Мир. – 1987.