

## Какой одиночный приёмник лучше?

■ Череповский А.В., Мужно Д.А., SERCEL, г.Москва

### От групп геофонов к одиночным датчикам

При традиционной профильной и площадной наземной сейсморазведке для регистрации упругих колебаний применяются группы электродинамических сейсмоприёмников (геофонов) и электрические сигналы на выходе соединённых в одну группу приёмников суммируются. Как известно, этот приём обеспечивает ослабление случайных помех, повышение отношения сигнал/помеха и статистически хороший контакт приёмников с грунтом, а также повышает чувствительность, что важно при регистрации слабых отражений от глубокозалегающих границ раздела [1, 2]. В то же время, в некогда очень популярном справочнике геофизика (том «Сейсморазведка», 1981 г.) подчёркивалось, что «выбор группы является компромиссным решением, учитывающим ряд ограничений и противодействующих факторов». Отрицательные стороны группирования стали всё больше проявляться при внедрении площадной и высокоразрешающей сейсморазведки: это и различная степень подавления волн-помех в зависимости от направления источник-приёмник (если группа не изометричная, что очень редко осуществляется на практике); и ослабление высоких частот вследствие статики внутри групп; и искажение амплитуд и частот полезного сигнала на больших удалениях вследствие кинематики внутри групп (из-за неперпендикулярности

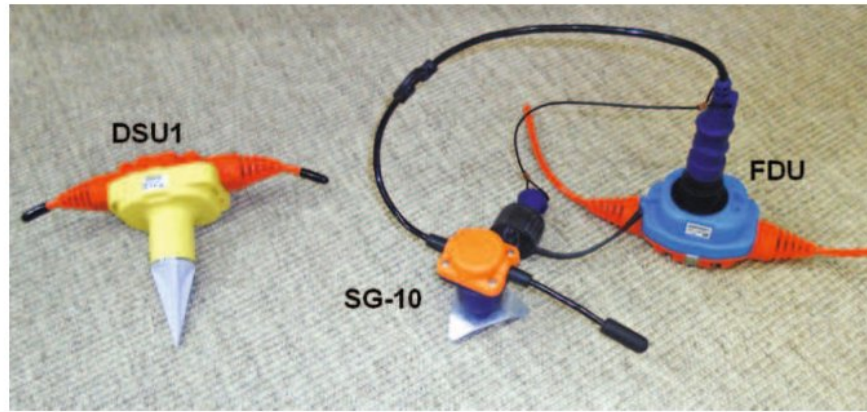
выхода лучей на поверхность наблюдений и кривизны волновых фронтов) [3, 4, 9].

Современные сейсморазведочные станции, позволяющие записывать 100000 каналов и более в реальном времени, сделали возможной регистрацию сигнала от каждого сейсмоприёмника как отдельного канала, с последующим лабораторным (цифровым) группированием на этапе обработки. По сравнению с традиционными методиками наблюдений, применение одиночных приёмников с сокращённым шагом между каналами имеет ряд преимуществ – как технологических (меньше вес наземной электроники, выше производительность), так и геофизических (более высокое качество регистрации волнового поля (отсутствие аляйсинга), сохранение высоких частот и истинных амплитуд отражённых волн). Преимущества сейсморазведки с одиночными датчиками очевиднее, когда применяется и одиночный источник [5, 8]. При этом повышение отношения сигнал/помеха (С/П) достигается на более поздней стадии сейсморазведочного цикла – на этапе обработки данных.

При удвоении среднего количества регистрируемых каналов каждые 5 лет, в нашей отрасли наблюдалось применение все меньших групп сейсмоприёмников с целью неискаженной регистрации не только сигнала, но и регулярных помех, и одновременное сокращение интервала



Рис.1. Сравнение интегрированного пункта приёма (DSU1) с традиционным оборудованием (одноканальный модуль FDU, соединённый с одним геофоном SG-10).



ла между пунктами приёма (от 50 до 25 м, а в последнее время и до 12,5 м). Мы полагаем, что для сохранения высокого отношения С/П на окончательных изображениях среды шаг между одиночными датчиками должен быть не больше, чем половина интервала между центрами групп, но и не меньше, чем двойной интервал между отдельными сейсмоприёмниками в группе [10]. Вертикальная разрешённость с одиночными датчиками выше, чем с (большими) группами геофонов, особенно на относительно небольших временах регистрации (до 1,5-2 с). В то же время, на относительно больших временах регистрации (>2 с) преимущества одиночных датчиков обычно невелики или даже отсутствуют из-за высокого уровня случайных помех на исходных записях и более низкой чувствительности одиночных датчиков к слабым полезным сигналам.

### Различные одиночные приёмники

При выполнении производственных работ в качестве одиночного датчика может использоваться как обычный электродинамический сейсмоприёмник, соединённый с аналого-цифровым преобразовате-

лем (АЦП), так и группа сейсмоприёмников, установленных «в точке» и также соединённых с АЦП. Но для повышения компактности и надёжности полевого оборудования чувствительный элемент и АЦП лучше разместить в одном корпусе (Рис.1). Одновременно это позволит исключить помехи, связанные с передачей аналогового сигнала по проводам (наводки, взаимные влияния). Поскольку на выходе та-кого датчика сигнал имеет цифровой формат, то датчик и называется цифровым, хотя его чувствительный элемент остаётся аналоговым [11]. По существу, все цифровые датчики используются как одиночные, и их сигналы записываются как отдельные каналы.

Чувствительный элемент цифрового датчика может быть измерителем скорости колебаний частиц грунта (велосиметром) или ускорений (акселерометром). Традиционный электродинамический сейсмоприёмник является, в основном, велосиметром, поскольку генерируемое им напряжение пропорционально скорости колебаний частиц грунта на частотах выше его собственной частоты (например, 10 Гц). В то же время, такие сейсмоприёмники функционируют

как акселерометры на частотах ниже собственной частоты (правда, в этом диапазоне их амплитудно-частотная характеристика имеет спад в 12 дБ на октаву). Имеются сейсмоприёмники собственной частоты которых находятся за пределами сейсмического спектра (например, 200 Гц). Такие геофоны-акселерометры характеризуются более широким линейным амплитудно-частотным спектром в области ускорений, чем традиционные сейсмоприёмники. Однако, их фазовый спектр тоже непостоянен.

Одно из главных преимуществ акселерометров на основе микроэлектронно-механических систем (МЭМС) заключается в том, что при постоянном значении ускорения их амплитудные и фазовые спектры линейны в очень широком диапазоне частот, от 0 Гц (постоянная составляющая) до примерно 800 Гц. Другие преимущества МЭМС-акселерометров приведены в Таблице 1.

Сильный ветер и дождь часто

приводят к остановке полевых работ даже с группами геофонов. Естественно, одиночные приёмники гораздо чувствительнее к ветровой помехе, и для её ослабления рекомендуется прикапывать их или хотя бы заглублять (устанавливать в ямки). Опытные работы консорциума по изучению упругих волн (CREWES), выполненные ещё в 2001 году на открытой местности при силе ветра до 20-25 км/час [6], показали, что для поверхностных датчиков отношение С/П снижается на 3 дБ при усилении ветра на каждые 3 км/час. В то же время оно повышается на те же 3 дБ на каждые 10 см заглубления приёмников.

При необходимости регистрировать очень слабые полезные сигналы (например, при сейсмомониторинге гидроразрыва пласта) целесообразно применять специальные заглубляемые приёмники, такие как DSU-BV (компания Sercel). Они выпускаются в прочном алюминиевом корпусе и снабжены тросом, выдерживающим

Табл. 1.

| Характеристика                   | DSU1                                         | FDU + геофон                       |
|----------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|
| Тип чувствительного элемента     | МЭМС (микро-электронно-механическая система) | электродинамический сейсмоприёмник |
| Вес чувствительного элемента, гр | 1                                            | ~ 75                               |
| Общий вес пункта приёма, гр      | 375                                          | ~ 700                              |
| Энергопотребление, мВт           | 170                                          | 132                                |
| Выходной сигнал датчика          | цифровой                                     | аналоговый                         |
| Линейная АЧХ, Гц                 | 0 – 800                                      | 10 – 250                           |
| Искажения, дБ                    | -90                                          | -62                                |
| Идентичность                     | ±0.25%                                       | ±2.5%                              |
| Температурная зависимость        | отсутствует                                  | значительная                       |
| Взаимные влияния                 | нет                                          | возможны                           |
| Наводки                          | нет                                          | возможны                           |
| Аппаратурный шум                 | ниже на высоких частотах                     | ниже на низких частотах            |



нагрузку в 500 кг, что позволяет выдёргивать датчики из неглубоких скважин или из промёрзшего грунта.

Амплитуды колебаний, регистрируемых электродинамическими сейсмоприёмниками и МЭМС-акселерометрами, напрямую сравнивать бессмысленно. В области ускорений чувствительность DSU1 постоянна и равна 0.452 В/(м/с<sup>2</sup>) или 4.43 В/g. В области скоростей чувствительность этого датчика зависит от частоты: она равна 28.4 В/(м/с) на частоте 10 Гц, но имеет градиент +6 дБ на октаву в обе стороны. Многочисленные лабораторные исследования и полевые тесты показали, что после пересчёта в одну и ту же область (скорости или ускорения) данные, зарегистрированные двумя типами датчиков – геофонами и акселерометрами, становятся очень похожими по динамическим характеристикам в диапазоне частот от 5 до 200 Гц, что доказывает их геофизическую эквивалентность [7].

Ожидалось, что МЭМС-акселерометры обеспечат существенное расширение регистрируемого сигнала в сторону более низких частот (5 Гц и ниже), что очень важно как для улучшения изображений среды, так и для более надёжного определения коллекторских свойств. В большинстве случаев практические результаты были разочаровывающими, особенно при взрывных исследованиях. На низких частотах (НЧ) редко наблюдались существенные различия между аналоговыми сейсмоприёмниками и цифровыми датчиками. Причина заключалась в том, что взрывной источник зачастую генерирует высо-

коамплитудные низкочастотные поверхностные волны (от 2-4 Гц), в то время как доля НЧ (ниже 10 Гц) в объёмных упругих волнах очень небольшая. Однако, при съёмках с очень низкочастотными свип-сигналами или с более тщательно подготовленными взрывными скважинами были получены записи с полезной информацией, содержащей НЧ ниже 5 Гц.

Подводя итоги, мы можем сказать, что одиночные датчики регистрируют как полный сигнал, так и весь спектр помех. Но частотный состав данных, полученных с одиночными датчиками, будет шире по сравнению с частотным составом данных, полученных с группами аналоговых сейсмоприёмников, и результирующие сейсмические изображения среды должны иметь более высокое качество. МЭМС-акселерометры, такие как DSU1, получили признание и уже несколько лет используются при производственных съёмках 2D и 3D в Китае, доказывая определённые преимущества этого регистрирующего оборудования. С точки зрения технологичности, их небольшой вес и интегрированность (меньшее количество разъёмов и соединений) очень удобны, особенно при выполнении полевых работ с применением вертолётов. Цифровые датчики DSU1 полностью совместимы с современными регистрирующими кабельными и бескабельными системами (такими как 428XL и UNITE) и не требуют никакой специальной адаптации. Они могут использоваться даже в смешанных приёмных расстановках, состоя-



щих из обычных одноканальных модулей FDU, соединённых с аналоговыми сейсмоприёмниками, и однокомпонентных (1C) или трёхкомпонентных (3C) цифровых датчиков. Возможен контроль качества таких комбинированных сейсмограмм в реальном времени – для сравнения трасс, записанных аналоговыми сейсмоприёмниками и цифровыми датчиками, приведёнными (интегрированными) к скоростям.

Практика показала, что одиночные цифровые датчики позволяют получить более уверенные данные для AVO-анализа. В случае возрастания амплитуды отражения с удалением (AVO-аномалии класса 3), применение цифровых датчиков обеспечивает сохранение «ярких пятен» на суммарных разрезах и выделение маломощных газонасыщенных коллекторов

[12]. Сулижское месторождение газа в бассейне Ордос – это самое большое низкосернистое месторождение газа в Китае. Коллектор в этом бассейне представлен неоднородным чередованием маломощных флювиальных песчаных тел, не выделяемых по данным обычной сейсморазведки. Из-за небольших запасов газа в каждом пласте и относительно большой глубины (3300 м), процент успешного бурения был недостаточно высоким (62%) для экономической разработки месторождения. Необходимо было прибегнуть к методам прямого обнаружения газа. Был отстрелян опытный профиль с цифровыми датчиками DSU1 с шагом 10 м, – вместо площадных групп сейсмоприёмников по 36 штук, – и на сейсмограммах удалось сохранить полезную информацию до удалений 5000 м. Было установлено,

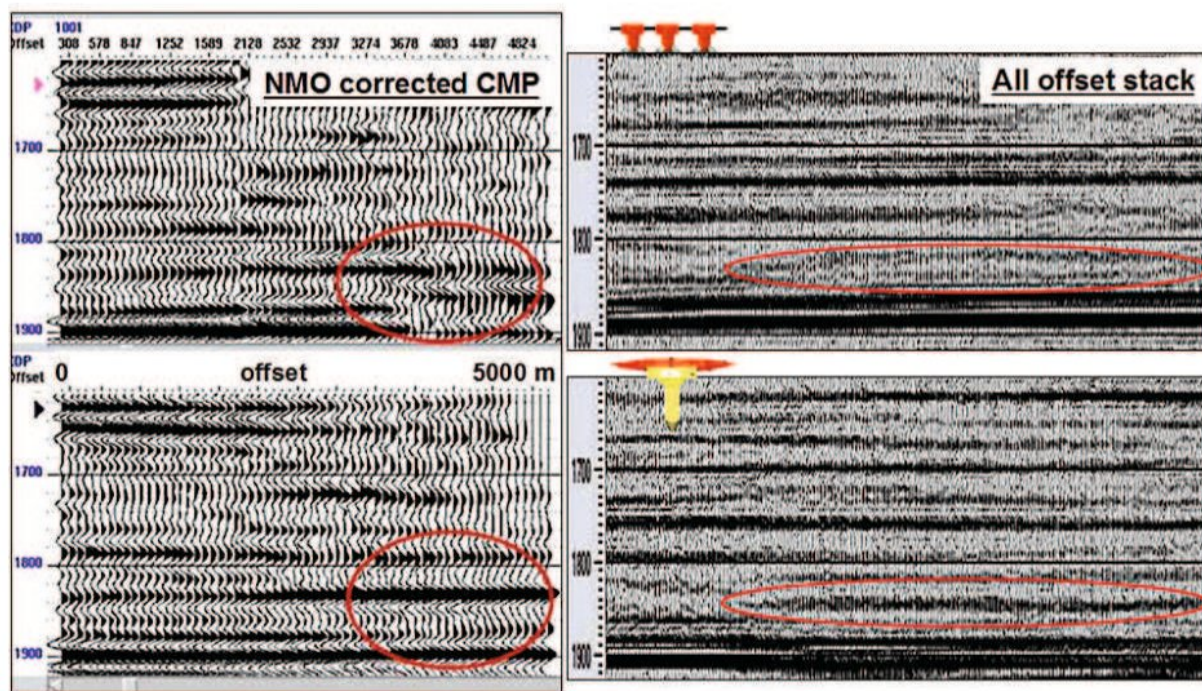


Рис.2. Сравнение сейсмограмм с введенными кинематическими поправками (слева) и соответствующих суммарных разрезов (справа). Верхние изображения получены с группами геофонов, а нижние – с одиночными акселерометрами. ▲



что амплитуда отражения от коллектора значительно возрастает с удалением (рис.2). Такие данные не были получены ранее с большими группами аналоговых сейсмоприёмников.

После обработки данных, включавшей AVO-анализ, суммирование дальних трасс и упругую инверсию, прямое обнаружение газа стало возможным. Эта же методика полевых работ была распространена на тысячи погонных км профилей с одиночными датчиками. В результате, процент успешного бурения скважин повысился до 94.4%. Это позволило компании PetroChina утроить добычу газа на данном месторождении в 2007 году от 1,3 до 4 млрд. кубометров.

Многочисленные опубликованные практические примеры убеждают, что одиночные цифровые датчики лучше сохраняют амплитуды отражений, что даёт возможность повысить надёжность инверсии и уточнить расчёт коллекторских свойств. Однако приходится констатировать, что спустя 10 лет после своего появления, МЭМС-акселерометры занимают не больше 5% на мировом рынке и все еще относятся к высокотехнологичной нише. И мы не ожидаем, что в обозримом будущем такие одиночные датчики полностью вытеснят традиционные группы сейсмоприёмников, по крайней мере, на площадях с высоким уровнем помех или глубокозалегающими целевыми объектами (слабые отражения). Высокая цена цифровых датчиков также сдерживает их широкое внедрение. Но линейка этих датчиков расширяется и теперь они

могут использоваться с кабельными и бескабельными регистрирующими системами в самых разнообразных условиях работ: от донных наблюдений на море и в переходных зонах до болот и гор на суше.

### **Мега-партии и одиночные приёмники**

Мега-партиями можно назвать такие сейсмические партии, в которых используется больше 10000 активных каналов. Обычно в мега-партиях используются одиночные геофоны или акселерометры. На территории бывшего СССР на текущий момент была выполнена только одна крупная съёмка с высокой плотностью наблюдений (3,3 млн. трасс на кв. км) мега-партией компании «Азимут Энерджи Сервисез» (AES), подразделения компании «Интегра», – в Казахстане на месторождении Карачаганак. Но там заказчик предпочёл круглые группы из 9 геофонов, а не одиночные акселерометры, из-за очень большой глубины исследований и, соответственно, очень больших расстояний источник-приёмник (до 9000 м).

Мы полагаем, что в ближайшие годы в России и СНГ интерес к сейсморазведке с высокой плотностью, широкими азимутами и одиночными цифровыми датчиками существенно вырастет, особенно в регионах со сложными поверхностными и сейсмогеологическими условиями, где традиционные методики сейсморазведки 3D не позволяют получить информативные изображения среды. Для наземной сейсморазведки нового поколения мы готовы предложить

наш датчик DSU1 в сочетании с самой популярной на рынке регистрирующей системой 428XL. Мы видим следующие «за»:

- система 428XL с датчиками DSU различных модификаций используется в производственных работах во всем мире с 2006 года;

- система 428XL позволяет записывать до 200000 каналов в реальном времени с шагом дискретизации 2 мс, в формате SEG-D;

- система 428XL с датчиками DSU1 и кабелями ST+ легче любой другой наземной сейсморегистрирующей системы на 30%;

- датчики семейства DSU основаны на передовой технологии MEMS (нет эффектов старения, температурной зависимости, электромагнитных наводок);

- кабельная система 428XL полностью совместима с бескабельной системой UNITE, которая может быть предпочтительнее на экологически чувствительных территориях, в условиях развитой инфраструктуры и высокой плотности населения;

- наличие сети центров поддержки пользователя и ремонтных баз на всех континентах.

Литература

1. Мужно Д., Череповский А.В., 2009, Цифровые акселерометры и их влияние на сейсморазведку. – «Приборы и системы разведочной геофизики», Саратов, №04 (30) / 2009, с.18-22.

2. Череповский А.В., 2010, Пришло ли время отказаться от группирования в пользу одиночных сейсмоприёмников? – «Геофизика», №3, 2010, с.22-28.

3. Череповский А.В., 2011, Повышение эффективности сейсморазведки путём применения одиночных сейсмоприёмников. – Тезисы 13-ой конференции по проблемам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных Геомодель-2011, Геленджик, 11–15 сентября 2011 г.

4. Череповский А.В., 2012, Сейсморазведка с одиночными приёмниками и источниками: обзор современных технологий и проектирование съёмок. – Образовательное турне EAGE, Москва, 133 с.

5. Baeten G. and van der Heijden H., 2008, Improving S/N for high frequencies. – The Leading Edge, vol.27, p.144-153.

6. Bland Henry C. and Gallant Eric V., 2001, Wind noise abatement for 3-C geophones. – CREWES Research Report, Vol.13.

7. Hons, M.S., Stewart, R.R., Hauer, G., Lawton, D.C. & Bertram, M.B., 2008, Accelerometer Versus Geophone response – A Field Case Study: 70th EAGE Conference & Exhibition, Rome, 9-12 June 2008, Extended

## Подробнее об авторах



Череповский А.В.,  
Региональный геофизик  
компании Sercel, к.т.н;



Мужно Дени  
Главный геофизик  
компании Sercel