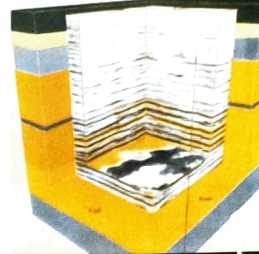


3С Акселерометры на базе MEMS для Наземной Сейсмической Разведки. Пришло ли их время?

Denis MOUGENOT и др., SERSEL, Франция



Электродинамические геофоны являются испытанной технологией, давно используемой в геофизической отрасли. Последние достижения в области микро-электромеханических систем (MEMS) позволяют получить датчики с необходимой чувствительностью, низким уровнем шумов и динамическим диапазоном, достаточными для применения при регистрации сейсмических данных. MEMS акселерометры потенциально могут обеспечить более широкий частотный диапазон, более точную амплитуду и меньшую чувствительность к отклонению от вертикальной установки. С учетом возросшего интереса к 3С регистрации, вызванного успехами при донных наблюдениях, эти тенденции побудили производителей начать разработку и продажу новых цифровых датчиков.

В ряде последних статей (J.Tessman и др., EAGE, 2002; R.R.Kendal и др., EAGE, 2002) были указаны преимущества трехкомпонентных наблюдений с одиночными цифровыми датчиками на базе MEMS, а внедрение этих датчиков было представлено как новый значительный успех в области наземных сейсмических наблюдений, сравнимый с переходом десять лет назад к 24-х разрядной регистрации. Действительно ли данная технология достигла в своем развитии того момента, когда она может или должна использоваться в обычной практике наземных сейсмических наблюдений? В данной статье рассмотрены преимущества и недостатки общего применения одиночных 3С цифровых датчиков.

Зачем для цифровых датчиков - акселерометры?

Движение земли может быть измерено в единицах перемещения, скорости или ускорения. При всех этих измерениях используется схема масса/пружина. При мягкой пружине масса (катушка геофона) не перемещается и является базисным элементом при измерении перемещения или скорости. В случае жесткой пружины масса перемещается вместе с корпусом, но с незначительным запаздывающим смещением, связанным с ускорением. Это ускорение может быть измерено либо как натяжение пружины (низкая стоимость, малое потребление энергии, большие искажения из-за активных потерь), либо как усилие обратной связи, приложенное к массе для компенсации смещения (цифровые датчики с хорошими техническими характеристиками, требующие внешнего питания).

В данном случае датчик, выполненный на базе MEMS, является аналоговым, в то время как управляющая цепь обратной связи и выходной каскад, представляющие собой Специализированную Цифровую Интегральную Микросхему (ASIC) - цифровые. Такой "цифровой" датчик имеет малые размеры. MEMS акселерометр представляет собой тонкую кремниевую пластинку размером около 1 см и весом менее 1г., что значительно меньше размера и веса датчика на базе катушки индуктивности (длина 3 см и вес блока 76 г.). В микросхеме остаточное смещение между инертной массой и корпусом составляет порядка нескольких нанометров. Производство датчика дорого из-за стоимости MEMS + ASIC. Поэтому для записи выхода каждой ASIC будет использован только один датчик на активный канал (т.е. будет всегда использоваться конфигурация с

одним датчиком).

MEMS акселерометры обеспечивают более высокие технические характеристики сейсмического приемного устройства по сравнению с электродинамическими датчиками. Они обеспечивают также преимущество полной цифровой передачи данных от датчика в Центральную Регистрирующую Систему (ЦРС).

Как это выглядит в сравнении с электродинамическим геофоном?

С точки зрения параметров, существенным преимуществом MEMS акселерометров является их линейные амплитудная и фазовая характеристики в широком диапазоне от 0 (постоянный ток) до 800 Гц, с отклонением в пределах 1 дБ. При использовании MEMS регистрация низких частот (менее 10 Гц) не ограничивается резонансной частотой (Рис. 1), которая значительно выше полосы пропускания (1 кГц). Это обеспечивает возможность регистрации постоянного тока (DC), связанного с ускорением силы тяжести и его использование для калибровки чувствительности и измерения наклона. Поскольку ускорение увеличивается с частотой (при постоянной скорости), акселерометры также удобны для высокочастотных измерений. В этой области (выше 50 Гц) собственный шум MEMS становится меньше, чем у эквивалентной электроники геофон/телеметрический модуль.

Широкополосные возможности датчика могут обеспечить существенное улучшение вертикальной разрешенности сейсмических данных, зависящей от соотношения n между максимальной и минимальной частотами сигнала ($F_{max}/F_{min} = 2^n$, где n равно числу октав). MEMS акселерометр особенно удобен для регистрации низкочастотных сигналов (менее 5 Гц), таких как отражения от основных границ между литологическими формациями, или даже при землетрясениях. В этом частотном диапазоне больше проблем, связанных с источником возбуждения, поскольку низкочастотные сигналы не могут быть возбуждены с достаточным соотношением сигнал/шум. Регистрация высоких частот ограничивается их сильным поглощением в процессе

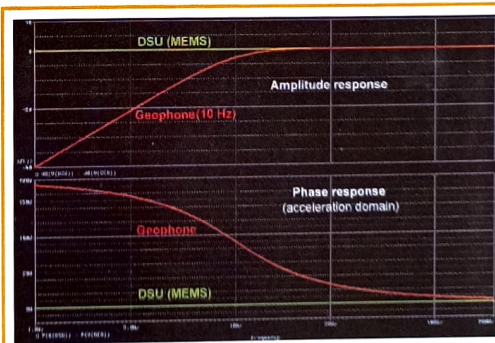
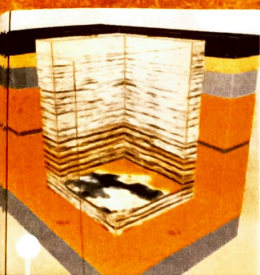


Рис. 1 Линейная фазовая и амплитудная характеристика Блока Цифрового Датчика (DSU) с MEMS в сравнении с 10 Гц геофоном, Амплитудная характеристика в скоростной области для геофона и в области ускорения для DSU. Фазовая характеристика как для DSU, так и для геофона представлены в области ускорения

МНОГОВОЛНОВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



Многоволновая сейсморазведка ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

распространения. Однако с помощью MEMS датчиков, если они размещены достаточно близко, можно прослуживать микросейсм (приблизительно 500 Гц), вызванные движением жидкости в коллекторе в процессе добычи нефти/газа.

Общий динамический диапазон 24-х разрядной регистрирующей системы с использованием MEMS (120 дБ, верхнее значение, соответствующее КНИ - 90 дБ) кажется меньше динамического диапазона той же системы, использующей одиночные геофоны (135 дБ, верхнее значение, соответствующее КНИ - 65 дБ). Это кажущееся ограничение MEMS датчиков связано с различными уровнями КНИ, принимаемыми к рассмотрению, а также с собственным шумом цифрового акселерометра, который выше, чем у эквивалентной электроники геофон/телеметрический модуль (по крайней мере, ниже 50 Гц). На практике (включая КНИ) MEMS датчик более удобен для записи слабых сигналов в присутствии сильных помех (ближние выносы), в то время как геофон (и даже больше - группа геофонов) более эффективен при записи слабых/глубоких отражений в присутствии слабых помех (дальние выносы).

Амплитудная калибровка MEMS датчика и его стабильность во времени и при температурных изменениях лучше, чем у геофонов. В целом, при сравнительных наблюдениях, исполнение цифрового датчика, когда MEMS интегрированы с электроникой телеметрического модуля в едином корпусе, лучше, обычной электроники телеметрического модуля, подключенной к различным группам геофонов с изменяющимися характеристиками.

Полная цифровая передача.

В ранние 70-е аналого-цифровой преобразователь первых цифровых регистрирующих систем находился в ЦРС. При передаче в ЦРС данных от группы геофонов для каждого канала использовалась аналоговая пара (Рис. 2). Шум, вызванный электромагнитными наводками, взаимными влияниями и утечкой был обычным делом. Спустя 30 лет электроника, распределенная по профилю, сделала возможным преобразование данных в цифровую форму непосредственно рядом с группами геофонов. Для телеметрической передачи в реальном времени

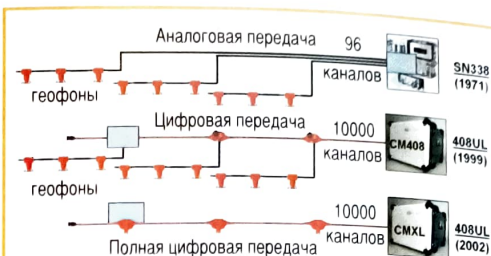


Рис. 2 У первых цифровых регистрирующих систем передача информации между группами геофонов и ЦРС, включая Аналого-цифровой преобразователь, была еще аналоговой. 30 лет спустя аналоговой была только передача между группами геофонов и Полевым Телеметрическим Модулем (FDU). Сегодня Блок Цифрового Датчика обеспечивает возможность полной цифровой передачи.

данных, поступающих с 10000 и более каналов, необходима только одна пара проводов. Чувствительность к утечкам минимальна, цифровые данные контролируются каждым узлом сейсмической сети и, в случае необходимости, передача данных может быть повторена. Однако наводки на группы геофонов еще могут иметь место. Сегодня сделан существенный шаг на пути интегрирования датчика с электроникой телеметрического модуля. В принципе, возможно установить и геофон в единый корпус с электроникой телеметрического модуля. На самом же деле, интеграция MEMS акселерометра с соответствующей ASIC и электроники телеметрического модуля более эффективна, особенно для 3С датчиков.

Преимущества полной цифровой передачи уже проверены. В процессе полевых испытаний записи групп геофонов были сравнены с записями MEMS датчиков, сделанными в том же месте (Рис. 3). На записи, полученной с помощью группы геофонов, четко видна наводка 50 Гц от высоковольтной линии. На соответствующей частотно-волновой диаграмме электромагнитный шум сильно интерферирует с сигналом ($K=0$). Благодаря полной цифровой передаче этот шум отсутствует на любой из трех компонент MEMS датчиков.

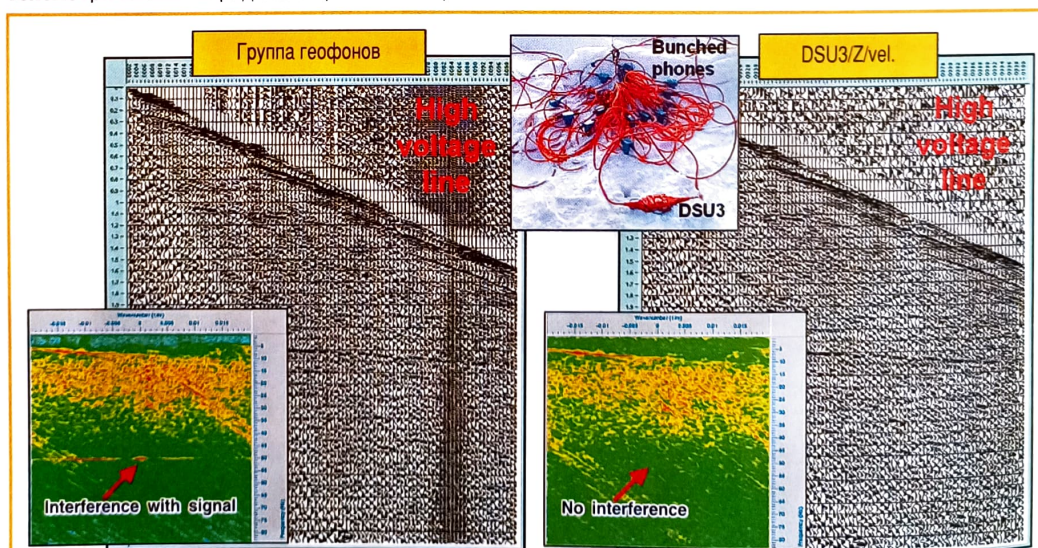
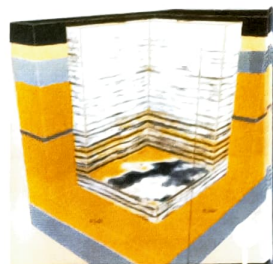


Рис.3 Сравнение между вертикальной компонентой DSU3 и группой геофонов, размещенных в одном и том же месте для одного пункта возбуждения (фото). Сильная наводка высоковольтной линии объясняется аналоговой передачей информации в электронику телеметрического модуля. Частотно-волновая диаграмма показывает, что шум 50 Гц интерферирует с сигналом. Данные DSU совершенно не осложнены этим шумом. (С разрешения BatchNeftGeofisika)



МНОГОВОЛНОВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

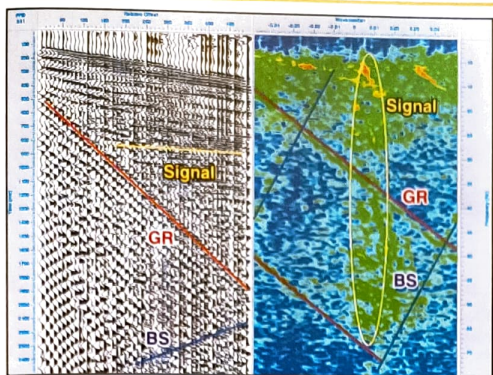


Рис. 4 Запись (GR, поверхностная волна, BS, обратное рассеивание) с расстоянием между одиночными цифровыми датчиками 10 м. На частотно-волновой диаграмме GR дает зеркальную частоту, интерферирующую с сигналом. (С разрешения CCG)

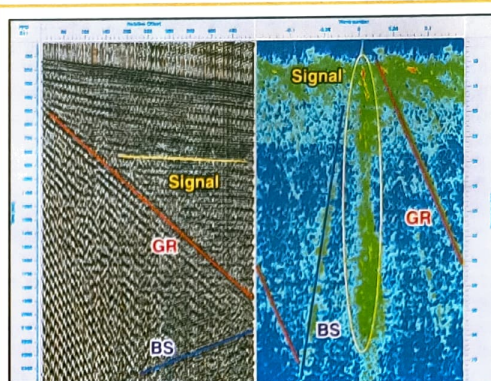


Рис. 5 Запись с шагом 3.3 м между одиночными цифровыми датчиками. На частотно-волновой диаграмме GR еще дает зеркальную частоту, но уже не интерферирующую с сигналом. (С разрешения CCG)

Цифровые датчики на замену групп геофонов?

Расстановки с геофонами могут существенно улучшить динамику в пункте приема уменьшением нерегулярных и регулярных помех. При последовательном или параллельном соединении N геофонов динамический диапазон данной группы улучшается на $10 \cdot \log N$ дБ, в то время как отношение сигнал/помеха увеличивается в корень квадратный из N. Для подавления регулярных помех геофоны размещаются таким образом, чтобы обеспечить пространственную фильтрацию. Размер группы и число подключенных геофонов должны быть достаточно большими, чтобы обеспечить правильное квантование максимально возможной длины поверхностных волн.

Несмотря на такие преимущества групп геофонов, полевые геофизики предпочли бы избавиться от этого большого и тяжелого оборудования, которое снижает производительность работ партии, требует затрат на перевозку, искажает первые вступления и снижает частотный диапазон сигналов. На первый взгляд, использование одиночных цифровых датчиков имело бы много производственных и геофизических преимуществ по сравнению с группами геофонов. Значительно легче расстановка и позиционирование, особенно в случае 3С пунктов приема. Запись - изотропная (нет азимутально зависимой фильтрации группы), а высокочастотные составляющие сигнала не подавляются. Однако эти преимущества являются таковыми только в идеальном случае, когда отраженный сигнал не осложнен помехами, то есть в ситуации, когда был бы достаточен и одиночный геофон.

Практически, шаг размещения одиночных датчиков должен уменьшиться по сравнению с базой группы геофонов. Это уменьшенное пространственное размещение не будет подавлять сейсмические шумы в процессе записи. Оно обеспечит достаточное число трасс, используемых для построения одной глубинной точки при ОГТ (кратность перекрытия) для уменьшения регулярных и нерегулярных помех при суммировании данных. Еще более плотное пространственное размещение предотвратит также появление зеркальных частот регулярного шума для эффективного применения волновой фильтрации. Таким образом, при записи одиночным цифровым датчиком мы не сможем получить более качественное изображение полевой сейсмограммы. Преимущества (большой частотный диапазон, точная амплитуда) станут видны только после обработки данных на конечных разрезах.

Новые требования к геометрии расстановки.

Сколько таких MEMS датчиков понадобится, чтобы заменить группу из N геофонов? Сомнительно, чтобы кто-нибудь стал использовать при регистрации то же количество одиночных цифровых датчиков, что и геофонов. Это, возможно, и не требуется, несмотря на то, что обеспечило бы отличное подавление шума.

Если мы рассмотрим Поверхностную Волну (ПВ), часто самая сильная помеха, расстояние между цифровыми датчиками D должно быть таким, чтобы длина волны ПВ $L = V / F$ (V, кажущаяся скорость; F, кажущаяся частота) была проквантована, по крайней мере, два раза, то есть $D = V / 2F$. Это, как правило, обеспечивается интервалами в диапазоне от 3 до 30 м. На рис. 4 и 5 дано сравнение двух полевых записей в одном и том же месте с различным шагом расстановки приборов. При шаге 10 м поверхностная волна с очень низкой скоростью (330 м/с, т.е. со скоростью воздушной волны) создает зеркальную частоту, которая интерферирует с сигналом. При шаге 3.33 м поверхностная волна еще дает зеркальную частоту, но она исчезает на высоких частотах (70 Гц), не пересекаясь с сигналом.

Принимая во внимание эту максимальную частотную границу помехи, в соответствии с рекомендациями G.J.M. Baeten и др. (SEG, 2000), возможно использование шага (адекватное квантование, D') немного большего половины волны ПВ (квантование Найквиста, D).

До сих пор мы считали, что волны распространялись в двухмерном пространстве (2D). Для случая 3D наблюдений или сложного около-поверхностного образования, генерирующего отраженный шум рассеяния, его необходимо будет квантовать как вдоль профиля, так и в ортогональном направлении. Такое пространственное квантование потребует размещения

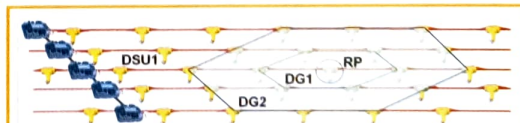
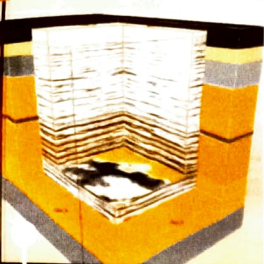


Рис. 6 Нереализованная система наблюдения 2D с полосой 1С одиночных цифровых датчиков (DSU1), подключенных к параллельным телеметрическим кабелям. Для уменьшения окружающего шума и фильтрации поверхностной волны для заданного пункта приема (PR) могут использоваться различные типы цифровых групп (DG1, DG2)



МНОГОВОЛНОВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

одиночных цифровых датчиков в полосе, эквивалентной большой группе геофонов, размещаемой на площади и подключаемой к одному каналу. Поскольку цифровые датчики подключаются непосредственно к телеметрическому кабелю, развертывание такой приемной линии потребует развертывания нескольких параллельных кабелей (Рис.6) вместо лишь одного телеметрического кабеля для всех геофонов. Быстрый расчет необходимого количества каналов для 3D площади 4x4 км с расстоянием между приемными линиями 100 м, каждая из которых включает 5 кабелей с одиночными цифровыми датчиками, подключенными с интервалом 10 м дает число равное 80000 активным каналам. Для шага квантования 2мс это число превышает реальные возможности всех известных регистрирующих систем. Сегодня подобная расстановка одиночных цифровых датчиков реальна только для 2D наблюдений.

Благодаря непрерывному пространственному квантования, эта полоса одиночных датчиков обеспечивает своего рода универсальную систему сбора данных, поскольку она не привязана ни к какому конкретному виду помехи. Различные комбинации одиночных датчиков, зачастую рассматриваемые как цифровые группы, могут быть использованы для подавления помех после регистрации данных со всех одиночных цифровых датчиков. Поскольку группы перекрываются от пункта к пункту, каждый отдельный датчик может быть использован в различных цифровых группах. В заданном пункте приема эта сформированная группа может даже включать значительно большие цифровые расстановки с увеличением при этом времени пробега волны и уменьшением соотношения сигнал/помеха.

Новая эра для 3С регистрации.

Подключение групп трехкомпонентных геофонов к телеметрическому кабелю является сложной задачей, поскольку приходится иметь дело с тяжелым оборудованием, множеством проводов и большим количеством разъемов. Размещение, установка по уровню и тщательная ориентация всех этих трехкомпонентных геофонов тяжелая, но обязательная процедура: конечный результат - электрическая сумма всех трехкомпонентных геофонов подключенных к электронике телеметрического модуля, на последнем этапе любая корректировка невозможна. Интеграция датчиков и электроники модуля в едином корпусе, как это сделано в 408UL 3C Digital Sensor Unit (DSU3), уменьшит общий вес, ошибки электрических соединений и позволит выполнить многокомпонентные наблюдения быстрее, лучше и дешевле.

Конечно, размещение 3С цифрового датчика потребует некоторого внимания для обеспечения правильных соединений, но обеспечение точной вертикальности установки больше не требуется. Это связано с уникальным свойством 3С

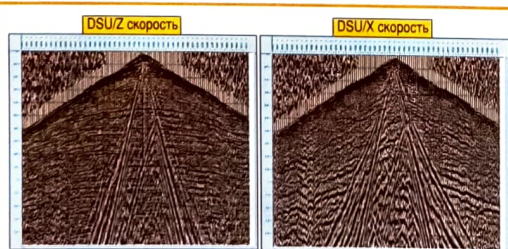


Рис. 7 Отображение в реальном времени записей DSU3 (Z&X компоненты) на дисплее Центральной Регистрирующей Системы после преобразования скоростей и ФВЧ фильтрации (10 Гц) (С разрешения Veritas DGC&Devon)

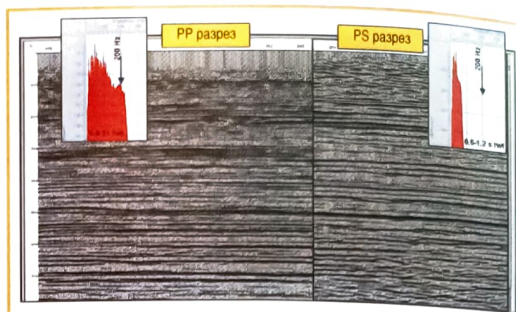


Рис. 8 Сравнение PP&PS окончательных разрезов, соответствующих предыдущим записям.

PS разрез сжат во времени PP, притяжением $V_p/V_s=3$. Частотное содержание PP разреза свыше 200 Гц, в то время, как на PS разрезе частоты выше 70 Гц были подавлены. Коэффициенты отражения двух разрезов, зарегистрированных в породах песчаник/глина совершенно различны. (С разрешения Veritas DGC&Devon)

цифрового датчика, созданного на базе MEMS - возможностью измерения вектора силы тяжести и его использования в качестве опорного для автоматического вычисления с высокой точностью (± 0.5 град.) наклона каждого горизонтального датчика. Значения наклона записываются в расширениях заголовка трассы, и данные могут быть даже скорректированы в реальном времени в ЦРС. Таким же образом ориентация датчика, если она неправильная, может быть скорректирована в процессе обработки в предположении радиального распространения волн между источником и одиночным датчиком (только для 3D наблюдений).

Измерение наклона только одно из преимуществ, касающееся точности векторов, обеспечиваемых 3D цифровыми датчиками на базе MEMS. Помимо их возможностей, касающихся частотного диапазона (линейная характеристика от 0 до 800 Гц), можно отметить очень точную ортогональность датчиков (точность $\pm 0.25^\circ$) и их точную и стабильную калибровку амплитуды (точность $\pm 0.25\%$).

Технология с использованием 3С цифровых датчиков уже испытана в процессе проведения многих сейсмических наблюдений. Данные, приведенные на рис. 7 и 8 иллюстрируют 2D наблюдения с использованием взрывных источников и сейсморегирующей системы 408UL, выполненные в Северной Америке. Они свидетельствуют о частотных возможностях 3С цифровых датчиков на базе MEMS (DSU3). Сохранение высоких частот в процессе суммирования потребовало очень точного определения статических поправок и эффективной деконволюции после подавления помех. На конечном PP разрезе частотный спектр сигнала в окне 0.4 - 1.0 с выше 200 Гц, а сигнал свыше 300 Гц наблюдается до 0.2 с.

Производительность партии с одиночными 3С цифровыми датчиками.

Сейсмические наблюдения с высокоплотной расстановкой одиночных цифровых датчиков требуют регистрации большого числа каналов. Малые расстояния между пунктами приема, необходимые для обеспечения адекватного квантования помех, приводят к удвоению (и более) числа каналов. Три компоненты вместо одной увеличивают число каналов втрое. Для 3D наблюдений это может вылиться в несколько десятков тысяч каналов. Для обеспечения производительности при таком большом количестве каналов наземное оборудование должно быть легким, а регистрирующая система должна быть мало потребляющей. Надежность передачи данных должна быть обеспечена использованием сетевой телеметрии, а для быстрой диагностики необходим контроль

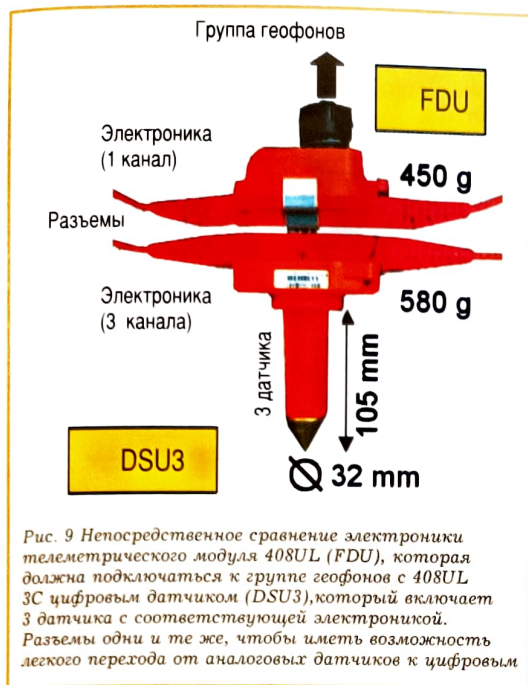


Рис. 9 Непосредственное сравнение электроники телеметрического модуля 408UL (FDU), которая должна подключаться к группе геофонов с 408UL 3С цифровым датчиком (DSU3), который включает 3 датчика с соответствующей электроникой. Разъемы одни и те же, чтобы иметь возможность легкого перехода от аналоговых датчиков к цифровым

качества расстановки и сейсмических данных в реальном времени.

Достигнутый в сейсморегирующей системе 408UL (Рис.9) вес 3С Блока Цифрового Датчика, равный 580 г, (DSU3, включающий базовую сборку с телеметрическим кабелем, всю электронику блока на три канала и три MEMS датчика) выглядит неплохо в сравнении с 450 г 1С Полевого Цифрового Блока (FDU, включающий ту же базовую сборку с телеметрическим кабелем и электронику только для одного канала, подключаемую к группе геофонов). Это сравнение иллюстрирует высокий уровень интеграции датчик/электроника, что и позволяет использовать MEMS акселерометры.

Принимая во внимание затраты, связанные с рабочей силой и с использованием машин, сейсморазведка должна использовать минимальное количество аккумуляторов с максимальным сроком службы (т.е. сейсморегирующая система должна быть мало потребляющей). Даже тот факт, что для MEMS, в отличие от геофонов, требуется питание, уже не является недостатком регистрации с цифровым датчиком. По крайней мере, для регистрирующей системы 408UL общее потребление DSU3 (400 мВатт) меньше эквивалентного потребления трех FDU,

подключенных к трехкомпонентным геофонам (420 мВатт).

Распределенная электроника с возможностями процессорной обработки и буферизации, используемая в большинстве современных кабельных телеметрических систем, обеспечивает возможность сохранения данных при их передаче. В случае повреждения кабеля использование множества поперечных соединений между приемными линиями и центральной системой регистрации обеспечит возможность передачи данных по другому пути.

При увеличении числа каналов свыше 10000, ручная или визуальная проверка всей системы и качества данных становится невозможной. Это объясняет важность автоматизированного контроля качества в реальном времени, как это уже реализовано для одиночного цифрового датчика. Например, в системе 408UL наклон, измеряемый по разности постоянной составляющей горизонтальных компонент, может контролироваться непрерывно. Результат не только запоминается в цифровом виде, но также отображается в графической форме для визуального контроля с отображением соответствующим цветом случая, когда наклон превышает заданный порог. Дополнительно, каждый из MEMS включает встроенный референтный акселерометр, который обеспечивает непрерывный контроль приборов, включая КНИ, усиление, фазу и взаимные влияния. По окончании регистрации поток данных может быть просмотрен отдельно по компонентам, а некоторые атрибуты (сигнал, шум, частотное содержание, сбойная трасса...) для непрерывного контроля процесса регистрации можно просматривать последовательно либо трасса за трассой, либо взрыв за взрывом.

Поскольку MEMS датчики регистрируют ускорение, а не скорость, как обычные геофоны, обеспечена возможность перевода данных в реальном времени из одной размерности в другую. Для того чтобы обеспечить возможность сравнения аналогового и цифрового датчиков и приведения данных к единому виду, широкодиапазонные сейсмические данные MEMS датчиков могут быть подвергнуты дополнительной фильтрации, как это делает геофон (10 Гц ФВЧ и затухание, Рис.10).

Закключение: наступило ли время использования датчиков?

Одиночные цифровые датчики на базе MEMS обеспечивают новые возможности по сравнению с обычными группами геофонов. Сам датчик (MEMS + ASIC) должен обеспечить

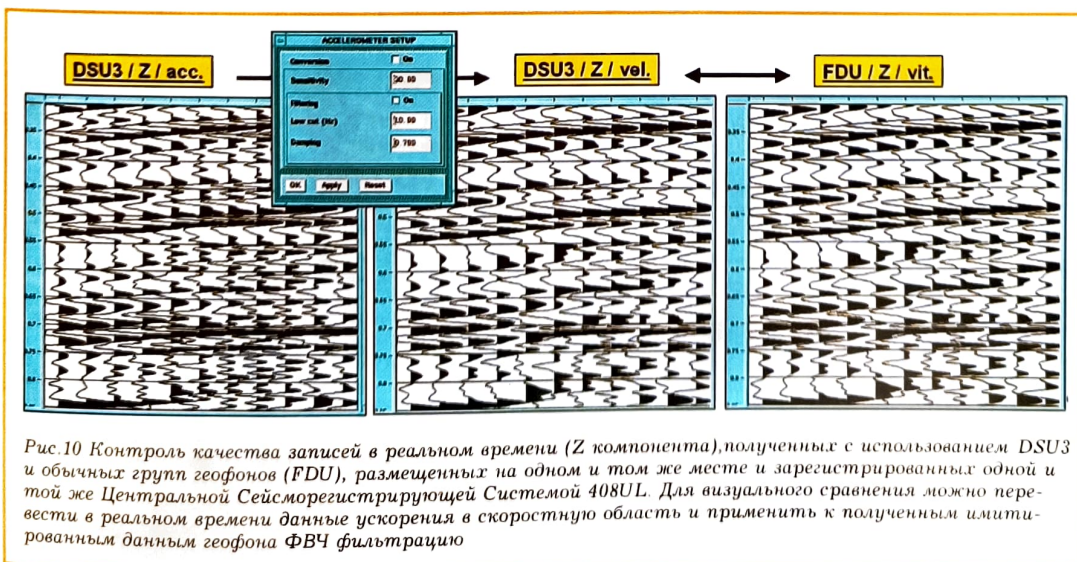
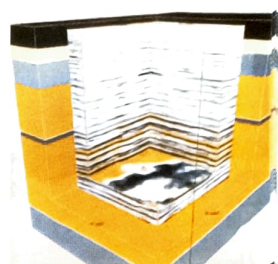
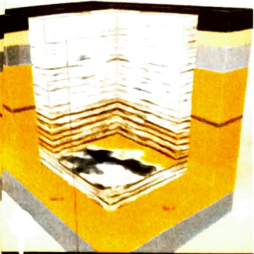


Рис.10 Контроль качества записей в реальном времени (Z компонента), полученных с использованием DSU3 и обычных групп геофонов (FDU), размещенных на одном и том же месте и зарегистрированных одной и той же Центральной Сейсморегирующей Системой 408UL. Для визуального сравнения можно перевести в реальном времени данные ускорения в скоростную область и применить к полученным имитированным данным геофона ФВЧ фильтрацию



МНОГОВОЛНОВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



Многоволновая сейсморазведка ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

большую векторную точность благодаря его точной и стабильной калибровке (амплитуда и ортогональность) и его широкодиапазонной линейной характеристике (от 0 до 800 Гц). Высокая интеграция датчика с электроникой телеметрического модуля обеспечивает снижение не только размера/веса, но и потребления энергии. Впервые он обеспечивает полную цифровую передачу данных от датчика в ЦРС, менее чувствительную к электромагнитным наводкам, взаимным влияниям, утечкам. В конечном счете технология MEMS имеет потенциал для уменьшения затрат на выполнение работ при более высоком качестве данных. Однако, есть два вида ограничений на использование MEMS датчиков: одно из них геофизическое и связано с тем фактом, что цифровые датчики используются для регистрации как одиночные; другое - экономическое и связано со стоимостью производства цифровых датчиков.

Если регистрация данных одиночным датчиком обеспечивает очевидные преимущества при развертывании системы и сохранении сигнала, то эти преимущества в значительной степени уравниваются неспособностью одиночных датчиков подавлять любую нерегулярную/регулярную помеху. Записи одиночного цифрового датчика будут осложнены шумами и это осложнение будет еще большим, если мы принимаем, что пункт приема должен быть связан с пунктом возбуждения (т.е. без какой-либо пространственной фильтрации источника возбуждения). В зашумленных районах с сильной, дисперсионной и обратно рассеянной поверхностной волной и с высоким уровнем нерегулярного шума это может воспрепятствовать записи любого полезного сигнала.

Для сохранения сигнала весь этот шум должен быть подавлен в процессе обработки. Для уменьшения нерегулярных помех должна быть увеличена кратность ОГТ. Это можно сделать путем уменьшения шага расстановки и увеличения числа одиночных цифровых датчиков в сравнении с обычными группами геофонов. Для подавления регулярных помех расстояние между пунктами приема должно быть также уменьшено, возможно не так как в случае геофонов, но, по крайней мере, как можно ближе к расстоянию Найквиста, для того, чтобы избежать появления зеркальных частот поверхностной волны. Как для нерегулярных, так и для регулярных помех это потребует увеличения количества пунктов приема и канальности (т.е. к простому увеличению стоимости регистрации данных). Таким образом, возникает вопрос: имеет ли смысл вкладывать средства и работать с одиночным цифровым датчиком вместо обычных расстановок с геофонами?

Чтобы ответить на этот вопрос, давайте рассмотрим приемную расстановку для районов с низким уровнем помех (группа из шести геофонов на 30 м) и примем, что один цифровой датчик (1С или 3С) может заменить два геофона или

трехкомпонентные геофоны (т.е. 5 м интервал между геофонами заменяется 10 м интервалом между DSU). Мы рассмотрим три различные конфигурации, эквивалентные этой 30 м аналоговой 1С приемной расстановке (Рис.11): такая же расстановка, где геофоны заменены трехкомпонентными геофонами (Аналоговая 3С); линия из DSU3 с 10 м шагом (цифровая 3С); такая же линия с DSU1 (цифровая 1С).

В качестве показателя капитальных затрат (CAPEX) мы будем рассматривать стоимость 30 м приемной линии, эквивалентной Аналоговой 1С расстановке (принимается за 1). В качестве показателя операционных затрат (OPEX) мы примем вес таких же 30 м приемных линий в сравнении с весом трех других конфигураций. Затраты/вес ЦРС, кросс-блоков, линейных блоков и соответствующих аккумуляторов в расчет не берутся.

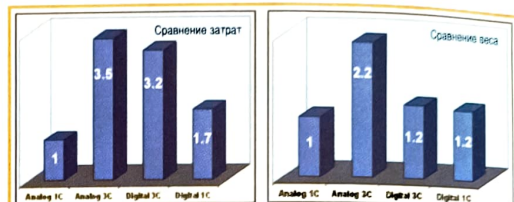


Рис. 12 Сравнение затрат (для CAPEX) и веса (для OPEX) для 4-х конфигураций, представленных на Рис.11. Цифры даны относительно обычной аналоговой конфигурации 1С (база=1)

Из сравнения затраты/вес на гистограммах (рис.12) вытекают два очевидных вывода:

- выполнение многокомпонентного наблюдения и для CAPEX и для OPEX дешевле с использованием Цифровой 3С расстановки;
- в цифровую расстановку (1С или 3С) еще требуется больше вложений, чем в аналоговую 1С, но операционные затраты близки.

Однако, если рассматривать в качестве базы общую стоимость проекта полевых работ (она значительно больше CAPEX амортизации), то дополнительные затраты на использование цифровой 3С линии, вместо аналоговой 1С, могут быть малы и составлять от 5 до 10% (J.Gibson и др., TLE, 2003). PP данные могут быть лучше, благодаря лучшему пространственному квантованию и более широкому частотному диапазону, обеспечиваемым MEMS датчиками. PS данные не будут немедленно использоваться, но дадут возможность решать специфические проблемы описания коллектора, при возникновении такой необходимости на поздних стадиях разработки месторождения. Таким образом, нам представляется, что в долгосрочном плане использование цифровых 3С линий дает весомую потенциальную выгоду по сравнению с небольшими дополнительными затратами этой технологии в случае обычных 2D или 3D наблюдений, с использованием коротких линейных расстановок.

Благодарности

Авторы выражают признательность CGG, Veritas DGC, DEVON и BatchNefteGeofisika за предоставление зарегистрированных и обработанных данных, полученных с помощью цифровых датчиков, которые с их разрешения использованы в данной статье. Они также благодарны Sercel R&D Dept., занимающемуся разработкой цифровых датчиков, за их полезную информацию, а также Sercel AS Dept., который выполнял тестирования в поле.

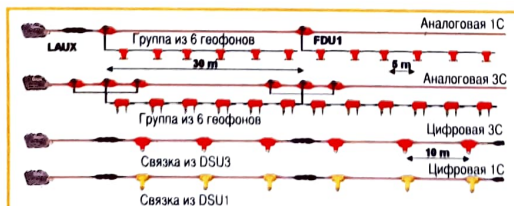


Рис.11 Обычный пункт приема 1С/30м/6 геофонов группа (Аналоговая 1С) в сравнении с соответствующим Аналоговым 3С пунктом приема. Предположено, что один цифровой датчик (каждые 10 м) может заменить 2 геофона (каждые 30 м). Соответственно показаны Цифровой 3С и Цифровой 1С пункты приема