

Регистрация одиночными датчиками без джиттера (размытия) данных: сравнительное исследование датчиков

■ Николая Тэлье, Стефан Лярош, Хань Ван, Филипп Эрман, Sercel

Введение

В начале 2000-х годов приемники МЭМС (микроэлектромеханические системы) стали заменять последний аналоговый компонент в цепочке сбора данных. При этом системы регистрации совершили этот технологический скачок в 80-х годах XX века. Преимущества плотного сбора данных с использованием одиночных датчиков сегодня общепризнаны крупнейшими компаниями в отрасли. И уже не вызывает сомнений то, что высокая плотность трасс привносит значительный вклад в обработку, позволяя получать более четкие изображения и более подробные характеристики коллектора. Слабый сигнал, свойственный съемкам с одиночными источниками и одиночными приемниками, определяет входные данные для обработки. Недостатки геофонов сглаживаются при использовании в больших группах, но эти же недостатки становятся артефактом входных данных для обработки, когда геофоны используются как отдельные приемники. Третье (нынешнее) поколение датчиков МЭМС, помимо всех других улучшений, преодолело ограничение на низких частотах, присущее предыдущим поколениям.

По мере дальнейших исследований характеристик датчиков стало возможным выявить некоторые недостатки, присущие геофонам, и их влияние на зарегистрированные данные, которые демонстрируют явное размытие получаемых изображений (вызванное погрешностями измерения фаз и амплитуд), однозначно связанное с датчиком.

После краткого обзора сенсорных технологий в этой статье будут представ-

лены сравнения двух типов датчиков на основе зарегистрированных данных, будет оценено их влияние на итоговое отображение среды. Эти выводы достаточно впечатляющие, чтобы убедить ведущего производителя сейсмического оборудования перейти на МЭМС во всех своих новых продуктах.

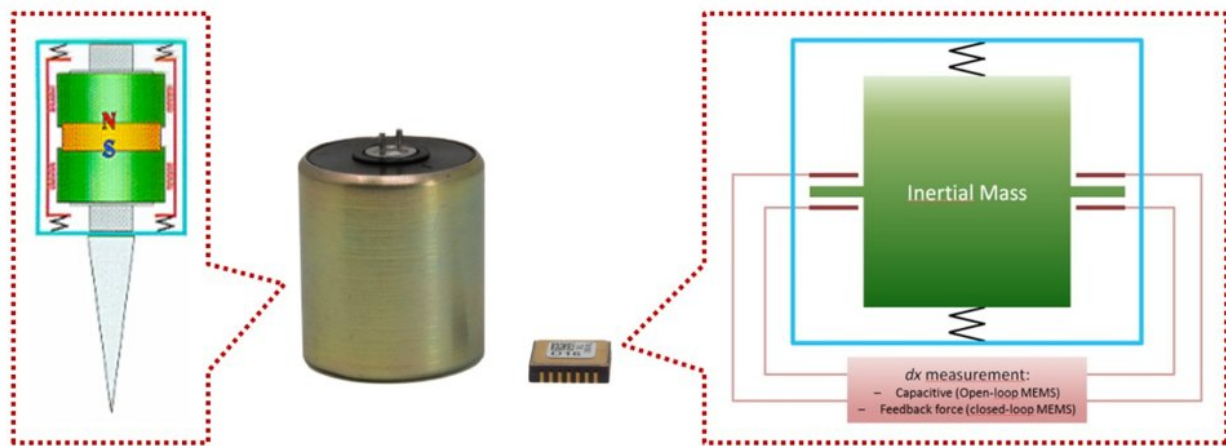
Основные принципы работы геофонов и МЭМС

Обзор технологий

Геофоны и датчики МЭМС работают так, как они и были задуманы, то есть измеряют движение частиц грунта, используя один и тот же принцип: колебательная система масса-пружина. И тот, и другой датчик должны быть смонтированы внутри корпуса, но на этом сходства и заканчиваются!

Стоит отметить несколько чисто аппаратных отличий:

- МЭМС - цифровые датчики. Геофоны - исключительно аналоговые.
- Их различие в размерах следует почти той же логике, что и разница между аудиолентой и компакт-диском: от 8 до 20 г для массы геофона по сравнению с... всего 50 мг для массы датчика МЭМС!
- Для геофонов соотношение {жесткость пружины / вес массы} является низким. Для датчиков МЭМС все наоборот.
- В результате геофоны имеют низкую резонансную частоту (обычно от 5 до 10 Гц и даже значительно ниже для некоторых длиннопериодных датчиков, используемых в академических целях). Датчики МЭМС имеют гораздо более высокую резонансную частоту (> 800 Гц) или даже



▲ Рис. 1. Сравнение геофонных и МЭМС-технологий.

вовсе не имеют резонансной частоты при работе в замкнутом контуре обратной связи.

Первый пункт сопоставления может потребовать некоторого пояснения (рис. 1). Несмотря на значительные различия в весе, размере, принципе измерения и представлении данных, оба датчика фактически основаны на одном и том же принципе детекции сигнала: колебательная система масса-пружина.

Геофоны являются исключительно аналоговыми устройствами, поскольку их принцип измерения основан на индуцированном напряжении, генерируемом катушкой (прикрепленной к корпусу с помощью пружины и, таким образом, действующей как масса), движущейся относительно магнита (прикрепленного к штырю датчика).

Датчики МЭМС работают по тому же принципу масса-пружина, но способ восприятия ими сигнала совершенно иной. В случае датчиков МЭМС с замкнутой обратной связью мы не хотим, чтобы (легкая) масса двигалась. Вместо этого, чтобы противодействовать силе инерции, действующей на массу из-за ускорения грунта, к массе прикладывается сила электростатической обратной связи посредством электроники ASIC (специализированной интегральной схемы),

переключающей сигнал напряжения на своих электродах, чтобы удерживать массу неподвижной. В результате точное измерение ускорения грунта обеспечивается за счет точного мониторинга этого напряжения благодаря высокоэффективной работе электроники ASIC. Измерение ускорения становится цифровым.

Другие аспекты рассмотрения технологии МЭМС и ее сравнение с геофонами, были сделаны, в частности, в работах Лэнэ (Lainé, 2014) и Тэлье (Tellier, 2017).

Выходной сигнал датчика и его обработка

Выходной сигнал геофона — это напряжение, вызванное смещением магнита внутри катушки. Это напряжение пропорционально скорости частиц грунта выше собственной частоты геофона: преобразование в м/сек потребует применения параметра чувствительности геофона, который предоставляется производителями геофонов с допусками. Около и ниже собственной частоты отклик геофона больше не является линейным: помимо чувствительности, необходимо учитывать затухание и собственную частоту (также с допусками), чтобы разработать оператор второго порядка, который может быть применен для удаления сигнатуры датчика.

У цифрового датчика МЭМС выход представляет собой 24-битный цифровой сигнал (сигнал, закодированный 23-мя разрядами, плюс один разряд для знака), который отражает силу, приложенную к массе, чтобы она оставалась неподвижной. Эта сила, а значит и выходной сигнал датчика, пропорциональны ускорению грунта. Конструкция датчика обеспечивает плоскую форму его отклика на всей интересующей нас сейсмической полосе частот, начиная с постоянного тока (0 Гц). Для преобразования цифрового выхода МЭМС в ускорение необходимо применить уникальный скаляр (постоянный коэффициент) независимо от задействованных частот.

Получение скорости грунта или смещения грунта (которое все чаще рассматривается для полноволновой инверсии) потребует применения одиночного или двойного интегрирования. Этот простой процесс поддерживается большинством пакетов программ обработки. Поскольку этот процесс не зависит от оборудования (плоский отклик и незначительные допуски на усиление МЭМС), он оказывается намного более достоверным, чем процедура приведения формы импульса геофона, и позволяет осуществить безупречное преобразование в нужные физические единицы.

Неопределенности при преобразовании выходных данных датчиков в интересующие нас физические единицы, рассматриваются ниже в разделе “Джиттер (размытие) данных, (вызванный погрешностями измерения фаз и амплитуд)”.

Третье поколение датчиков МЭМС

Литература изобилует примерами успешного применения датчиков МЭМС для горнодобывающих отраслей (например, Meisheng et al., 2008), применения 3С наблюдений (например, Stotter, 2011),

идентификации тонкослоистых залежей газа по сохраненным амплитудам на больших удалениях для AVO (например, Shi et al., 2008 и 2009), или для разведки трудноизвлекаемых запасов нефти (Xuming et al., 2014). Датчики МЭМС также широко использовались для поиска углеводородов в таких регионах, как Китай или Северная и Южная Америка.

Однако первые два поколения датчиков МЭМС столкнулись с трудностями в обеспечении ожиданий отрасли в отношении регистрации низкочастотных сигналов, которые появились около десяти лет назад. Их минимальный уровень шума увеличивается в сторону низких частот ($\sim 120 \text{ нг} / \sqrt{\text{Гц}}$ в полосе [1-10 Гц] при спецификации МЭМС в 40-45 $\text{нг} / \sqrt{\text{Гц}}$ в полосе [10-200 Гц]), и может не позволить осуществить запись слабых сигналов в диапазоне ниже нескольких герц. Эта проблема была решена с помощью МЭМС 3-го поколения (15 $\text{нг} / \sqrt{\text{Гц}}$ при [10-200 Гц] и 30 $\text{нг} / \sqrt{\text{Гц}}$ при [1-10 Гц]), где также были продемонстрированы превосходные низкочастотные характеристики датчика (Fougerat 2018, Tellier 2020).

В дополнение низкочастотному ограничению, датчики МЭМС сравнивались с группами геофонов. Решения с одиночными датчиками МЭМС выглядели более дорогостоящими, так как требовали большего количества каналов. Однако это не тот случай, когда одиночные каналы МЭМС сравниваются с одиночными геофонами, подключенными к оцифровывающим устройствам (АЦП). Более того, усилия отрасли позволили снизить стоимость технологии МЭМС, что сделало одноканальное решение на основе МЭМС немного дешевле в сравнении с геофоном. Энергопотребление 3-го поколения также было уменьшено в два

раза по сравнению с предыдущим поколением. А это означает меньшее количество полевых блоков для цифровых каналов, чем для аналоговых каналов, следовательно, меньше батарей и проще логистика.

Чтобы дополнительно проиллюстрировать геофизические различия между датчиками МЭМС и геофонами, необходимо рассмотреть артефакты, которые представляют собой искажения, вносимые в записанный сигнал самими датчиками. В этой связи выделяются два артефакта, связанные с датчиком, которые рассматриваются в следующих аспектах: шум, вызванный записью сигнала, и джиттер (размытие) данных, вызванный погрешностями измерения фаз и амплитуд.

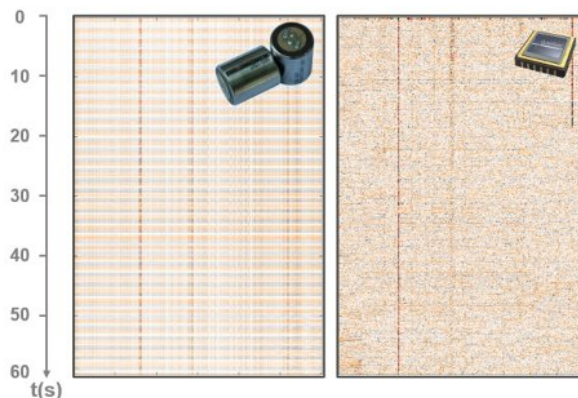
Шум, вызванный записью сигнала

Определение

Шум, вызванный записью сигнала, – это шум, вызываемый собственно регистрацией сейсмического сигнала. Этот шум не влияет на сейсмический сигнал: это дополнительный шум, непосредственно связанный с восприятием сигнала датчиком. Помимо нелинейного искажения датчика, которое для геофонов значительно больше (-62 дБ), чем для датчиков МЭМС (-90 дБ), уже были идентифицированы два типа шума, вызванного записью сигнала.

Электромагнитное загрязнение

Принцип работы геофона основан на устройстве типа катушка-магнит, что делает датчик особенно чувствительным к электромагнитному шуму окружающей среды. Хотя источники электромагнитного шума многочисленны, особенно в городских районах, основной вклад вносят линии электропередач. В настоящее время на большинстве съемок



▲ Рис. 2. 60-секундная пассивная запись, полученная геофоном 10 Гц (слева) и датчиком МЭМС (справа).

сигнал 50/60 Гц и связанные с ним гармоники создают индуцированное напряжение на чувствительном элементе геофона катушка-магнит. Этот шум становится еще сильнее при использовании несбалансированной группы геофонов. В отличие от геофонов, записи МЭМС по своей природе свободны от этого загрязнения, поскольку их работа не основана на устройстве катушка-магнит.

Это явление хорошо известно геофизикам, и примеров тому множество. На Рисунке 2 представлены результаты недавнего мониторинга железнодорожного полотна с применением пассивной сейсмики. В этом примере две линии были развернуты вдоль железнодорожного пути в окрестностях Парижа, с геофонами 10 Гц и датчиками МЭМС, расположенными совместно в каждой точке приема. Как и ожидалось, железнодорожная линия электропередачи 25000 В не повлияла на запись МЭМС, в то время как электромагнитное загрязнение преобладало на геофонной линии приема. Электромагнитное загрязнение преобладает на записи геофона, но отсутствует на записи МЭМС.

Паразитная частота

Так называемая «паразитная частота» относится к резонансу сенсорной систе-

мы, перпендикулярному ее нормальной (вертикальной) рабочей оси, и представляет собой комбинацию нескольких режимов движения (Maxwell 1997). Поэтому ее можно также назвать «радиальной собственной частотой». Любое движение земли в поперечной или угловой проекции может вызвать резонанс геофона: самый низкий из этих резонансных режимов вызывает так называемую паразитную частоту, которая определяет ограничение верхней частоты датчика.

Для дальнейшего исследования проблемы паразитной частоты важно помнить, что измерение геофона основано на индуцированном напряжении, создаваемом смещением массы (т. е. катушки геофона) относительно магнита. Для точного измерения сейсмического сигнала осевая жесткость пружины должна быть низкой, чтобы обеспечить как длинный ход (благоприятный для чувствительности), так и низкую собственную частоту (что напрямую связано с соотношением {жесткость пружины / масса}). Однако радиальная жесткость пружины должна быть максимальной по трем причинам: 1) чтобы гарантировать подавление паразитных, невертикальных сигналов (таких как поверхностные и обменные волны); 2) для исключения паразитных режимов работы (таких как резонансные), которые могут вызывать смещения вдоль чувствительной оси; и 3) для обеспечения нечувствительности к наклону (чтобы избежать трения катушки о корпус). Несмотря на усилия производителей по обеспечению низкой осевой жесткости и высокой радиальной жесткости, номинальные паразитные частоты остаются «низкими» и ограничивают полезную полосу пропускания геофона. Типичные значения для паразитных частот колеблются от

120-150 Гц для геофонов 5 Гц и от ~ 250 Гц для геофонов 10 Гц, с более выраженным эффектом, когда геофон наклонен (качество сцепления с грунтом не влияет на явление паразитной частоты несмотря на распространенное заблуждение).

Поскольку измерение МЭМС основано на сверхмалых изменениях емкости (через электроды), вызванных микроскопическими перемещениями массы, датчики МЭМС могут быть спроектированы с соотношением {жесткость пружины / масса}, которое намного выше, чем у геофонов, что означает, что можно спроектировать колебательную систему с гораздо более высокой поперечной жесткостью. Поэтому паразитные частоты значительно превышают полезную сейсмическую полосу пропускания частот.

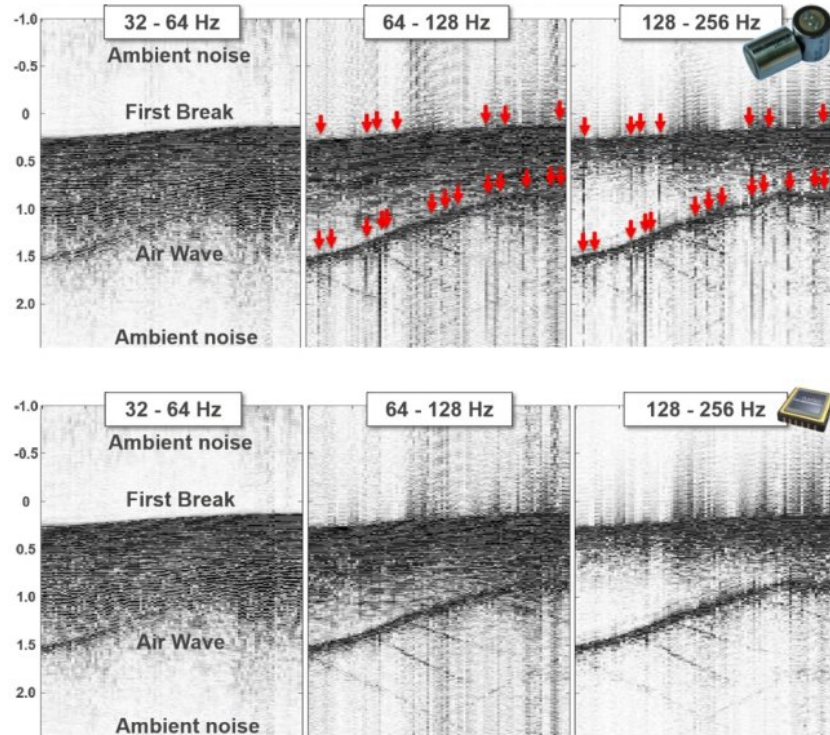
На практике попадание в паразитную частоту приводит к нарушениям в передаточной функции геофона (неожиданный фазовый сдвиг и сильное изменение чувствительности), что проявляется в сейсмических данных в виде сильного звенящего шума, проходящего через запись. На рис. 3 проиллюстрирована концепция паразитных частот. На этих двух 100-канальных секциях данных сгруппированных по общему пункту возбуждения (ОПВ) самые высокие октавы засорены паразитными частотами на многочисленных каналах геофонов (красные стрелки). Записи МЭМС в то же время остаются без артефактов.

Джиттер (размытие) данных, (вызванное погрешностями измерения фаз и амплитуд)

Определение:

Выходным сигналом датчика является результат свертки отклика датчика с приходящим сигналом колебания грунта.

► Рис. 3. Влияние паразитной частоты на полевые данные: геофоны 5 Гц (вверху) и датчики QuietSeis МЭМС (внизу). Геофон, используемый для испытания, имеет частоту паразитных искажений > 120 Гц.



Джиттер данных, индуцированный датчиком, представляет собой амплитудное и фазовое возмущение, вызванное исключительно вариациями отклика датчика, от одного датчика к другому.

Теоретически джиттер (размытие) данных можно исправить с помощью выполнения точной деконволюции отклика датчика. Однако это требует хорошего знания параметров, определяющих отклик датчика. На самом деле это невозможно для таких датчиков, как геофоны, поскольку их параметры (даже если это совершенно новые геофоны) отличаются от номинальных значений по каталогу (дисперсия индивидуальных параметров геофона из-за производственных допусков) и будут продолжать меняться на протяжении всего проекта сбора данных (из-за старения и перепадов температур).

Для геофона

Геофон - это электромагнитная система масса-пружина с откликом прибора, определяемым тремя параметрами:

- чувствительность геофона S_g (v/ms^{-1}) α ;
- собственная частота F_c (Гц);
- коэффициент затухания λ .

В частотной области, f (Гц), собственный выход геофона $G(f)$ связан со скоростью $v(f)$ частиц грунта как:

$$G(f) = S_g \cdot LC(f; f_c, \lambda) \cdot v(f) \quad (1a)$$

Где f (Гц) скорость частиц грунта $v(f)$
а $LC(f; f_c, \lambda)$ фильтр низких частот с минимальной фазой, определенный в соответствии с:

$$LC(f; f_c, \lambda) = -f^2 / (-f^2 + 2j\lambda f f_c + f_c^2) \quad (1b)$$

Параметры геофона (S_g, f_c, λ) определяются каталожными значениями (S_g^c, f_c^c, λ^c) с достоверностью в процентах ($\pm \Delta S_g^c, \pm \Delta f_c^c, \pm \Delta \lambda^c$). Эти отклонения связаны с:

- Производственными допусками (зависящими от особенностей производства, от наклона и от чувствительности);
- Колебаниями температур (магнитные материалы теряют магнетизм при нагревании, но восстанавливают магнетизм при охлаждении, при условии, что

максимальная температура ниже их температуры Кюри);

- Старение (магниты теряют свои свойства, изменяется жесткость пружины, влияние неправильного хранения, ударов и т. д.).

Точное знание параметров геофона (S_g, f_c, λ) требуется для получения данных о движении грунта $v(f)$ по собственному выходному сигналу геофона $G(f)$. На практике такая деконволюция выполняется с использованием значений из каталога (S_g^c, f_c^c, λ^c) без учета их фактического значения:

$$v_g(f) = (1/S_g^c \cdot LC(f; f_c^c, \lambda^c)) \cdot G(f) \quad (1c)$$

Таким образом, мы имеем приближительную оценку скорости частиц грунта $v_g(f)$:

$$v_g(f) = (S_g \cdot LC(f; f_c, \lambda) / S_g^c \cdot LC(f; f_c^c, \lambda^c)) \cdot v(f) \quad (1d)$$

Вариации отклика геофона от датчика к датчику вызываются не только разнородностями партий геофонов, доступных для данного проекта, но также и разнородностями совершенно новых датчиков, и могут изменяться в зависимости от температуры в ходе сбора сейсмических данных. Многочисленные причины отклонений в отклике датчика затрудняют восстановление истинного движения грунта, измеренного датчиком геофона.

Для МЭМС

Датчики МЭМС — это высокоточные микроэлектронные системы на основе кремния с инструментальным откликом прибора, определяемым частотно-независимым скаляром S_m . В частотной области, $f(\text{Гц})$, собственный выходной сигнал МЭМС $M(f)$ связан с ускорением частиц грунта $a(f)$ (т.е. производная по времени от скорости частиц грунта $j2\pi f \cdot v(f)$) как:

$$M(f) = S_m \cdot a(f) \quad (2a)$$

Производственный процесс для

технологии МЭМС отличается высокой точностью с чрезвычайно низкими допусками, порядка 0,25% для S_m , что примерно в десять-тридцать раз меньше допусков геофонов. Кремний - высокостабильный материал, который делает отклик МЭМС нечувствительным к колебаниям температуры. Более того, МЭМС является лишь дополнительным компонентом на электронной плате датчика, и поэтому по старению эквивалентен последней. Кроме того, для МЭМС с обратной связью (которая предотвращает устойчивое смещение массы) наклон датчика не влияет на S_m .

Как следствие вышеупомянутых характеристик, МЭМС - это широкополосные датчики, которые регистрируют все частоты на одном уровне, масштабируемые только частотно-независимым откликом датчика S_m . Чрезвычайно низкий допуск на S_m обеспечивает точное преобразование истинной фазы и почти истинной амплитуды собственных изменений МЭМС в ускорение частиц грунта:

$$a(f) = S_m^{-1} \cdot M(f) \quad (2b)$$

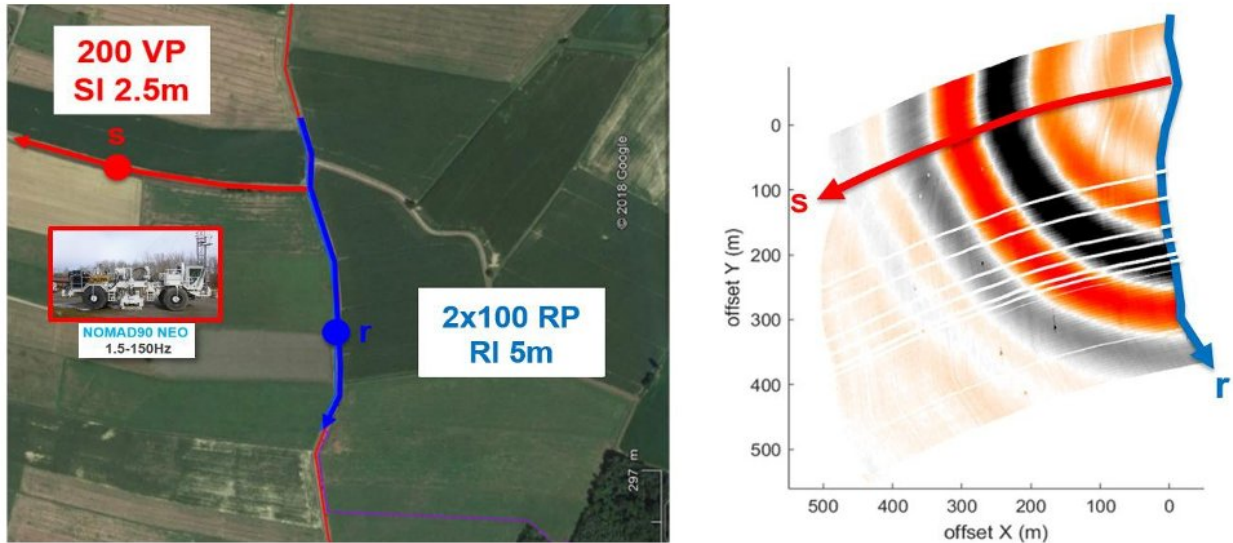
Которая в дальнейшем может быть преобразована в скорость частиц грунта с помощью интегрирования:

$$v(f) = (j2\pi f)^{-1} \cdot a(f) = (j2\pi f)^{-1} \cdot S_m^{-1} \cdot M(f) \quad (2c)$$

Подводя итог, можно сказать, что датчики МЭМС не вызывают размытия (джиттер) данных, в отличие от геофонов.

Полевой тест

Чтобы проиллюстрировать, оценить и сравнить уровень размытия данных, связанных с датчиками, для различных сенсорных технологий, мы разработали специальное полевое испытание, предусматривающее регистрацию данных датчиков МЭМС и высокочувствительных геофонов 5 Гц сторонних производите-



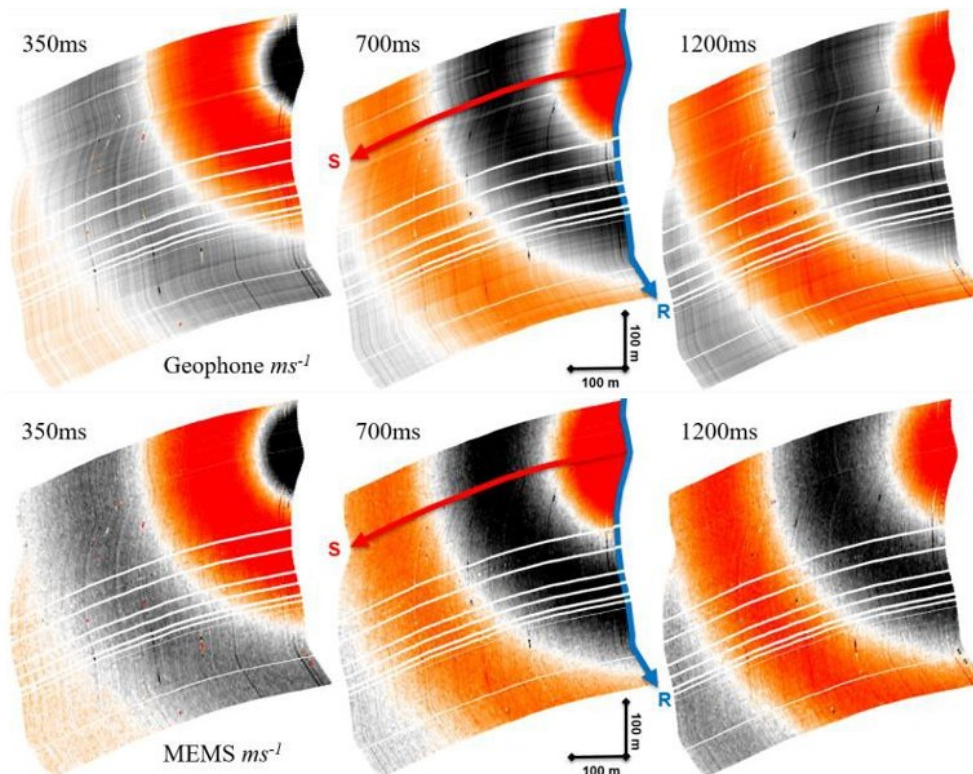
▲ Рис. 4. Конфигурация полевого теста для сбора части данных с крестообразной расстановкой с квазиперпендикулярными линиями источника и приемника.

лей (не Sercel), установленных на общих пикетах приема. (рис. 4).

Вдоль линии возбуждения было отстреляно 200 ПВ на расстоянии 2,5 м друг от друга одним вибратором Nomad 90 Neo с широкополосным свипом 1,5–150 Гц. Вдоль линии приема было 100 ПП, расположенных на расстоянии 5 м друг от друга, которые включали совместно установленные датчики

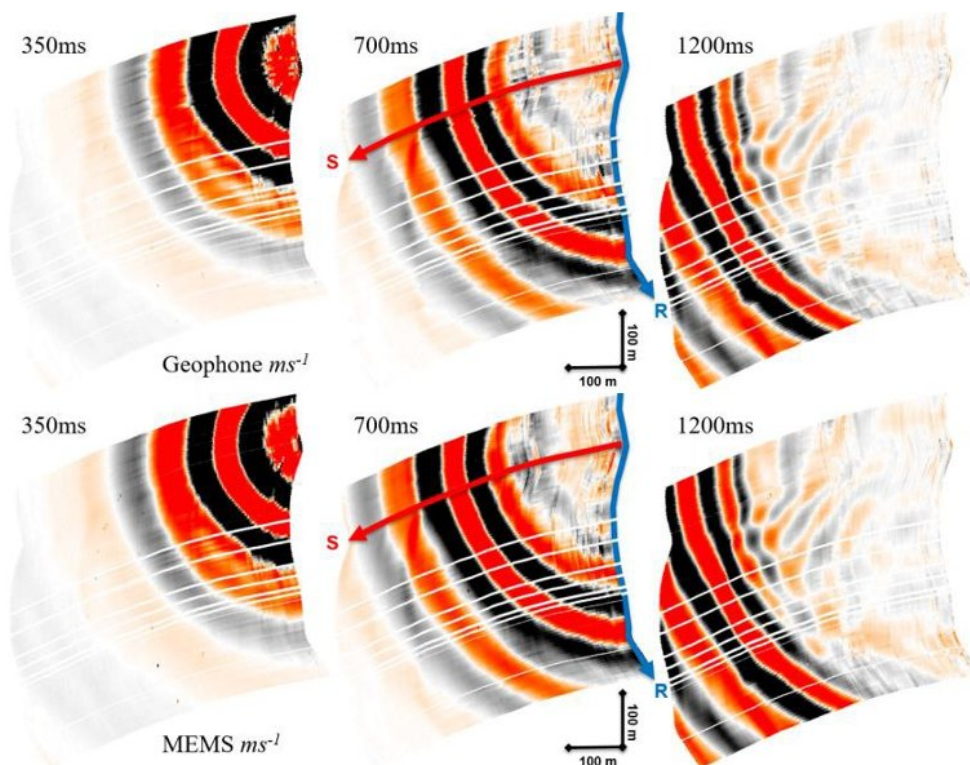
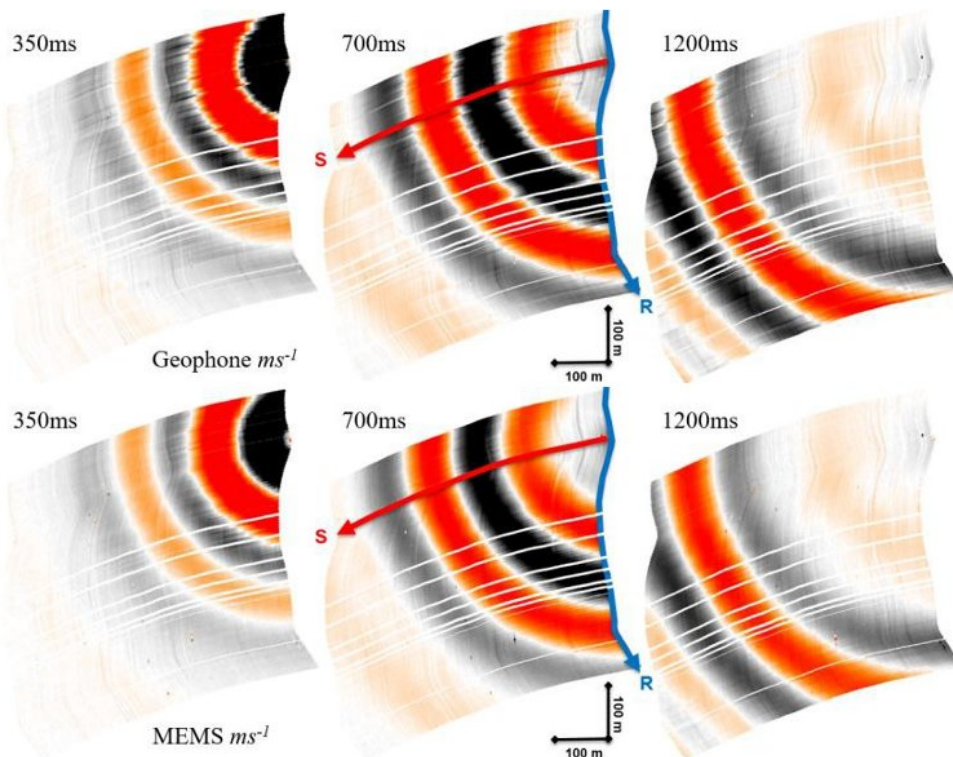
МЭМС (WiNG DFU) и геофоны сторонних производителей (не Sercel) с частотой 5 Гц (система 508XT). Отображения временных срезов расстановки отсортированных по удалениям (offset_X, offset_Y) демонстрируют круговые фронты сейсмических волн.

Этот тест позволяет измерить воздействие на сейсмоданные технологических допусков, заложенных в датчик на



◀ Рис. 5а. Геофон и МЭМС - сравнение после коррекции отклика датчика, октава [1-2Гц].

► Рис. 5б.
Геофон и МЭМС -
сравнение после
коррекции
отклика
датчика,
октава [2-4Гц].



◄ Рис. 5с.
Геофон и МЭМС -
сравнение после
коррекции отклика
датчика,
октава [4-8Гц]

этапе производства. Однако в силу того, что замер производился в течение короткого отрезка времени, этот тест не позволяет оценить влияние на данные ни изменений температуры, ни фактора старения самого датчика.

Данные крестообразной расстановки отсортированы по кросс-лайн и ин-лайн удалениям. Распространяющиеся сейсмические волновые фронты в таком пакете данных имеют дуговую форму. Изменчивость источника будет прояв-

ляться на удалениях перпендикулярных линии возбуждения, а джиттер (размытие) данных, связанный с работой датчика - перпендикулярно линии приемников. Чтобы обеспечить сопоставимое сравнение записей геофона и МЭМС, данные с обоих сенсоров были скорректированы на отклик датчика, как показано в уравнениях (1с) и (2с), для сравнения в домене скорости грунта $v(ms-1)$. На рисунке 5 приведено сравнение трех временных срезов в 350 мс, 700 мс и 1200 мс для трех октав. На каждом срезе мы видим семь белых линий, перпендикулярных к линии приема. Они соответствуют пропущенным в расстановке пикетам с датчиками.

Временные срезы геофона выявляют октавно-зависимое размытие данных, с вариациями по фазе и амплитуде колебаний между датчиками. В то же время временные срезы МЭМС не демонстрируют подобного связанного с датчиком размытия данных. На них можно обнаружить только незначительную вариацию у источника. При более внимательном рассмотрении также обнаруживается значительный сдвиг по фазе и разница в амплитуде между данными геофонов и датчиков МЭМС.

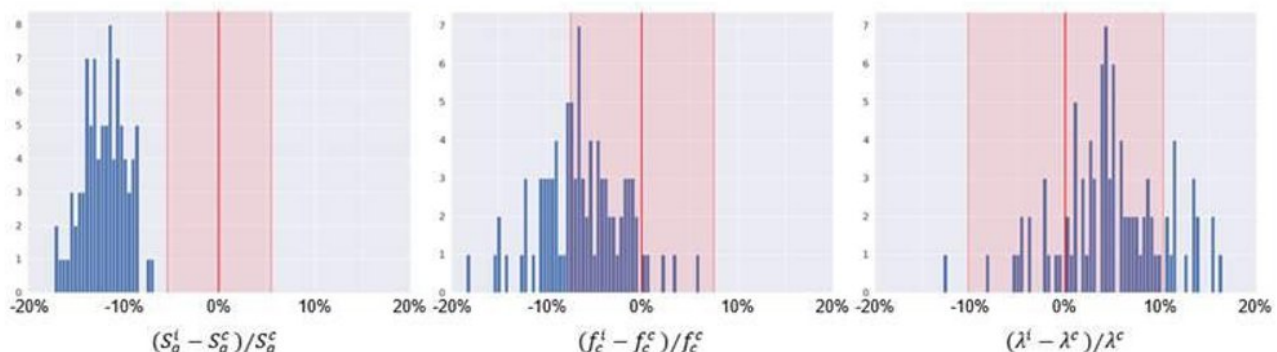
Благодаря однородности сейсмического сигнала, записанного с датчиков МЭМС, мы использовали данные МЭМС в качестве опорных для инверсии пара-

метров геофона $(S_g^i(r), f_c^i(r), \lambda^i(r))_{r=1, \dots, 100}$, которые минимизируют целевую функцию:

$$\min_{(S_g^i, f_c^i, \lambda^i)} \sum_f \sum_s \|w(f) \cdot \left(\frac{S_{g, LC}(f; f_c, \lambda)}{S_{m, (j2\pi f)}} - \frac{G(f, s; r)}{M(f, s; r)} \right) \| \quad (3)$$

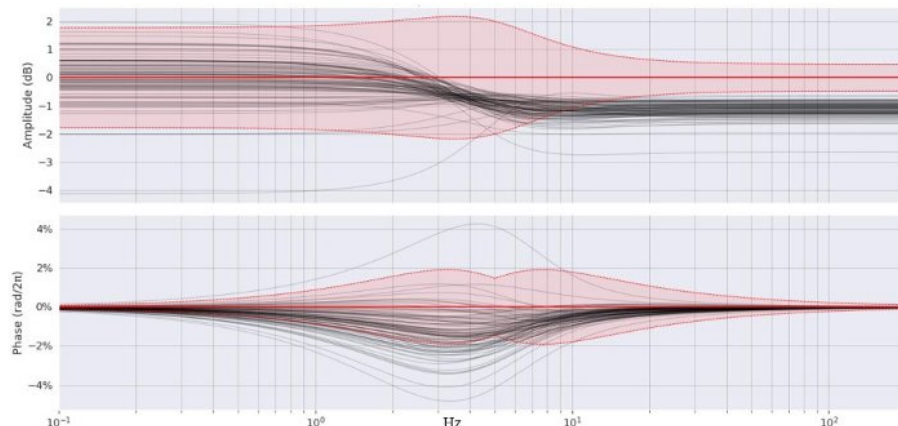
во всем диапазоне частот f и источников s , пригодных для объяснения частотно-зависимых изменений амплитуды и разности фаз между данными геофона и МЭМС, где $w(f) \sim 1/f$ выступает как частотно-зависимое средство ранжирования. Это было сделано независимо для каждого из 100 5-герцовых геофонов.

Гистограмма для 100 инвертированных параметров сейсмоприемников $(S_g^i(r), f_c^i(r), \lambda^i(r))_{r=1, \dots, 100}$, (рис. 6) наглядно демонстрирует системное смещение распределений, не центрированное на каталожных значениях $(S_g^c, f_c^c, \lambda^c)$ (сплошная вертикальная красная линия) и значения вне допуска $(\pm \Delta S_g^c, \pm \Delta f_c^c, \pm \Delta \lambda^c)$ (пунктирная вертикальная красная линия). Исходя из опыта авторов (в прошлом – руководителей сейсморайонов и ответственных за контроль качества данных), можем утверждать, что дешевые геофоны могут не соответствовать заявленным допускам (а это приведёт к ещё более значительному размытию данных). 5-герцовые геофоны, использовавшиеся для этого теста, широко используются, и оцениваются как геофоны среднего уровня качества.



▲ Рис. 6. Гистограмма отклонений 100 инвертированных параметров геофона с замкнутой цепью $(S_g^i, f_c^i, \lambda^i)$ от значения по каталогу $(S_g^c, f_c^c, \lambda^c)$, выраженное в процентах.

► Рис. 7. Амплитудные и фазовые погрешности геофонов.



Для каждого из 100 установленных геофонов может быть отображено соотношение амплитуд (дБ), а также фазовая ошибка ($\text{rad} / 2\pi$) между инвертированными и каталожными параметрами геофонов, в зависимости от частоты (Рис. 7). Сплошными горизонтальными красными линиями даны геофоны с инвертированными параметрами, соответствующими каталожным параметрам (без ошибок). Пунктирные красные кривые представляют максимальные отклонения в пределах каталожных допусков ($\pm \Delta S_g^c, \pm \Delta f_c^c, \pm \Delta \lambda^c$).

Каталожные номинальные погрешности (сплошная красная = нет погрешностей) и погрешности, вычисленные по каталогу максимальных погрешностей с использованием заданных допусков (пунктирная красная линия) в сравнении с инвертированными погрешностями (черные линии), полученным из полевых измерений по формуле:

$$S_g^i \cdot LC(f; f_c^i, \lambda^i) / S_g^c \cdot LC(f; f_c^c, \lambda^c).$$

Это соответствует соотношению амплитудных и фазовых погрешностей между скоростью грунта, исчисленной по данным геофона с использованием каталожных значений, и истинным значением скорости грунта.

Эти кривые иллюстрируют следующее поведение размытия данных геофона:

- Частотно-зависимое, с отклонения-

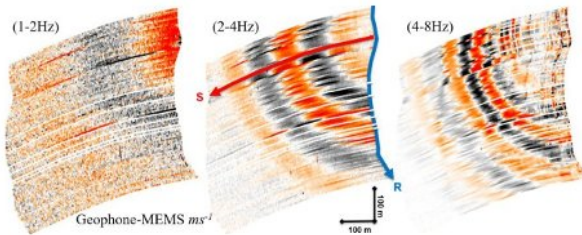
ми в районе излома собственной частоты геофона f_c

- Амплитудные и фазовые искажения:
 - асимптотически постоянны при $f/f_c \ll 1$ и при $f/f_c \gg 1$;
 - находятся за пределами заявленных характеристик датчика;
 - тенденциозное, не случайное распределение вблизи 0 дБ или 0 %.

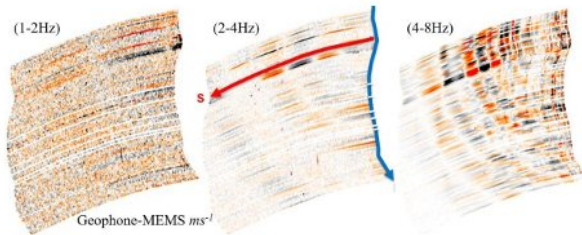
Чтобы проверить возможность коррективировки размытия данных с помощью инвертированных параметров, сравним различия во временных срезах при использовании каталожных значений (S_g^c, f_c^c, λ^c) (рис. 8a) и инвертированных значений (S_g^i, f_c^i, λ^i) (рис. 8b). В результате мы можем наблюдать значительное уменьшение разницы во временных срезах между геофоном и МЭМС во всех трех показанных октавах.

Используя данные МЭМС в качестве опорных, мы установили, что трехчленная инверсия для фактических параметров геофонов значительно уменьшает разницу между данными геофона и датчика МЭМС. Это подтверждает, что наблюдаемые различия в основном связаны с отклонением параметров геофонов от номинальных каталожных значений (S_g^i, f_c^i, λ^i).

Авторы намерены в дальнейшем провести тесты и исследования с тем, чтобы проиллюстрировать влияние температуры и фактора старения на



▲ Рис. 8а. Различия временных срезов (700 мс) геофонов и датчиков МЭМС при использовании каталожных параметров (S_g^c, f_c^c, λ^c) для корректировки отклика геофона.



▲ Рис. 8б. Различия временных срезов (700 мс) геофонов и датчиков МЭМС при использовании инвертированных параметров (S_g^i, f_c^i, λ^i) для корректировки отклика геофона.

размытие данных для обоих датчиков, хотя предварительный анализ и показывает их меньшее влияние в сравнении с влиянием производственных допусков. Однако такое размытие будет накапливаться, объединяясь с тем, которое обусловлено производственными допусками, что создаст еще более значительные неопределенности.

Размытие данных, вызванное свойствами датчика - новая концепция, которая до сегодняшнего дня не получила должного освещения. И вот шесть причин, объясняющих, почему именно:

- Использование групп геофонов усредняет показания конкретного геофона;
- Регистрируемые отклонения параметров сигнала от датчика к датчику традиционно объяснялись качеством сцепления с грунтом и изменчивостью свойств грунта в пределах проекта;
- Низкочастотные источники раскрыва-

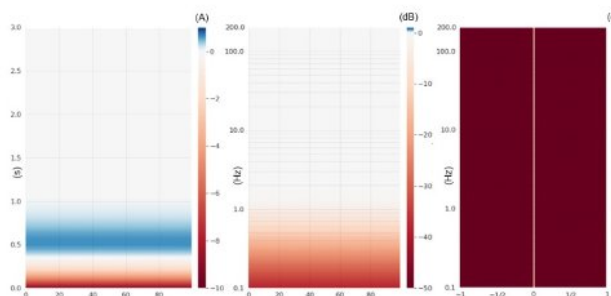
ют низкочастотные характеристики геофона;

- Дизайн съемки с точной пространственной дискретизацией облегчает обнаружение феномена размытия данных;
- Отсутствие эталонных датчиков на коммерческих съемках;
- Размытие данных, наблюдаемое в отношении геофонов, порождается не только геофонами, но и всей цепочкой сбора данных до «общей точки» с цифровыми каналами (включая, например, кабель, соединяющий геофон с АЦП).

Влияние эффекта размытия на сейсмические изображения

Геофоны вызывают эффект размытия данных, который напрямую связан с погрешностями в параметрах геофона (S, f_c, λ). Это приводит к возникновению частотно-зависимых амплитудных и фазовых искажений в записанном сигнале. Для коррекции этих искажений требуется знать фактический отклик геофона в процессе сбора данных, чтобы разработать специальный оператор для каждого канала, для приведения записи к истинному значению. Это едва ли осуществимо на практике, даже если дополнительные ресурсы выделяются в ходе полевых работ и на этапе обработки. В дополнение к этому, при разработке оператора приведения итоговой записи необходимо учитывать температурные изменения, особенно для данных, полученных в проектах со значительным разбросом температур, в частности, в Арктике или в условиях жарких пустынь.

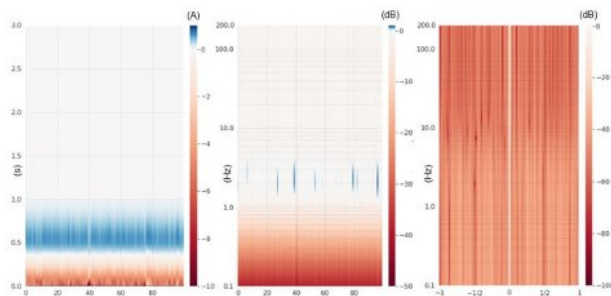
Размытие данных, связанное с датчиком, оказывает пагубное влияние на сохранение сигнала, начиная с самых ранних этапов обработки, когда фильтры скорости применяются для удаления



▲ Рис. 9а. Отклик 100 датчиков МЭМС (в м/с), с поправкой на отклик датчика (уравнение 2с) к синтетической горизонтальной плоской волне: временной отклик (слева), частотный отклик (в середине), и (справа) временная частотная характеристика (в логарифмической шкале) в зависимости от волнового числа (нормализованного по Найквисту).

поверхностных волн, т.е. еще до того, как могут быть получены какие-либо поверхностно-согласованные поправки. На рис. 9а представлены временные (слева) и частотные (в середине) отклики 100 последовательных датчиков МЭМС к синтетической горизонтальной плоской волне с минимальной фазой и плоским амплитудным спектром выше 1 Гц. На рис. 9а (справа) представлен его спектр $(\log(f), k)$, где вся энергия сконцентрирована вокруг $k=0$, как следствие латеральной инвариантности как плоской волны, так и отклика МЭМС. Эта спектральная фокусировка обеспечивает отличное сохранение сигнала отражения после фильтрации по скорости. С геофонами ситуация совершенно иная (рис. 9b): вариации характеристик датчиков приводят к разбросу сигнала в спектрах $(\log(f), K)$, и, как следствие, искажению сигнала после применения скоростного фильтра, особенно на низких частотах. Этот разброс сигнала в спектрах $(\log(f), K)$ также делает менее эффективным удаление поверхностных волн, проникающих в конус сигнала.

Возможно, кто-то усомнится в приме-



▲ Рис. 9b. Отклик 100 геофонов (в м/с) с поправкой на отклик датчика (уравнение 1d) к синтетической горизонтальной плоской волне: временной отклик (слева), частотный отклик (в середине), и (справа) временная частотная характеристика (в логарифмической шкале) в зависимости от волнового числа (нормализованного по Найквисту).

ности поверхностно-согласованных поправок для коррекции размытия данных, обусловленного свойствами датчика. Вот необходимые условия для их успешного применения:

- Соотношение сигнал/шум достаточно высокое для правильной оценки фазы.
- Отсутствие многоканального подавления шума между геофонами для получения индивидуальных параметров геофонов.
- Введение дополнительной трехчленной параметрической формы $(S_g^c, f_c^c, \lambda^c)$ (уравнение 1d) для оператора приемника. Это позволяет работать с длинными операторами без перенастройки инверсии.
- Отсутствие замещения амплитуд спектра на низких частотах на основе каталожных значений для операторов геофонов-приемников.

Соблюсти все четыре перечисленные условия затруднительно: недостаточная поверхностно-согласованная коррекция будет иметь следствием наличие систематических погрешностей в измерениях геофонами, которые будут сохранятся

при накапливании независимо от плотности трасс. В отличие от геофонов, МЭМС-датчики обладают тем преимуществом, что не требуют компенсации размытия данных датчика.

Выводы

В отношении приемников, тенденция сейсморазведочной отрасли развивается в направлении нодальных систем с одиночными широкополосными датчиками для регистрации сигнала. И хотя по мере применения одиночных датчиков плотность трасс в проектах продолжает расти, мы наблюдаем в лучшем случае неизменное, а зачастую и меньшее количество датчиков, по сравнению с предыдущими съемками.

Индивидуальный отклик каждого датчика становится столь же важным, как и знание точных свойств сигнала источника, с тем основным различием, что параметры сигнала источника записываются непрерывно, в отличие от отклика датчиков.

Для точного преобразования зарегистрированных данных в параметры движения частиц грунта в широком диапазоне частот необходимо работать с датчиками, имеющими точный, заранее известный и инвариантный отклик. Как показывают полевые тесты, это справедливо для датчиков МЭМС, но не для геофонов (даже совершенно новых). Эта концепция размытия данных до сих пор не была идентифицирована по нескольким причинам (использование групп, которые смешивают индивидуальные характеристики датчиков, вариации сигнала от датчика к датчику, ошибочно приписываемые сцеплению и различным свойствам местности, отсутствие эталонных датчиков на коммерческих съемках и конкретных экспериментов,

предназначенных для освещения этого явления, и т. д.).

Учитывая точно известный и неизменный отклик датчиков МЭМС, они, следовательно, являются предпочтительным датчиком для извлечения всей полноты преимуществ от внедрения всех сейсмических инноваций. Благодаря точности и стабильности датчиков МЭМС возможно избежать эффекта размытия в зарегистрированных данных, что дает лучшую сохранность сигнала и удаление шума. Применительно к требованиям FWI датчики МЭМС обладают неотъемлемой способностью записывать высокоточный низкочастотный сигнал, а третье поколение МЭМС также преодолело ограничение низкочастотного минимального уровня шума предыдущих поколений: таким образом, современные датчики МЭМС позволяют точно измерять широкополосные колебания грунта в любых единицах.

В Sercel убеждены в преимуществах МЭМС-технологии для всех вариантов применения в сейсморазведке, от наземных и морских донных проектов до структурного мониторинга зданий и сооружений, и рассматривают его как ультрасовременный сейсмический датчик, наилучшим образом способный дать беспрецедентные выгоды сейсмической отрасли.

Литература:

Fougerat, A., Guérineau, L. and Tellier, N. [2018]. High-quality signal recording down to 0.001 Hz with standard MEMS accelerometers. 88th SEG annual meeting, расширенная аннотация. DOI: <https://doi.org/10.1190/segam2018-2995544.1>

Maxwell P. and Faber, K. [1997] Geophone Spurious Frequency - What Is It and How Does It Affect Seismic Data Quality. EAGE 59th

Conference & Exhibition, расширенная аннотация. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.131.GEN1997_P046

Lainé, J. and Mougenot, D. [2014] A high-sensitivity MEMS-based accelerometer. The Leading Edge, Vol 33 Issue 11, стр. 1210–1308. DOI: <https://doi.org/10.1190/tle33111234.1>

Shi S., Du Y., Yao Z., Wang D., Zhang M., Cheng S., Gan L., Gao L., Li M. and Qin Z. [2008] Digital point receiver seismic acquisition and pre-stack reservoir characterization at Sulige gas field, China. 70th EAGE Conference & Exhibition, расширенная аннотация. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20147566>

Shi S., Du Y., Zhang M., Cheng S., Gan L., Gao L., Yao Z. and Li M. [2009] Seismic acquisition with digital point receiver and prestack reservoir characterization at China's Sulige gas field. The Leading Edge, 28/3, стр. 324-331. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.3104079>

Stotter C. and Angerer E. [2011] Evaluation of 3C microelectromechanical system data on a 2D line: Direct comparison with conventional vertical-component geophone arrays and PS-wave analysis. Geophysics 76/3, B79-B87. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.3561769>

Tellier N., and Lainé, J. [2017]. Understanding MEMS-based digital seismic sensors: First Break, Vol 35, No.1, стр. 93-100. DOI: <https://doi.org/10.3997/1365-2397.35.1.87386>

Tellier, N., Laroche, S., and Herrmann, Ph. [2020]. Native true amplitude and phase broadband sensing now available with the latest MEMS sensors. 90th SEG annual meeting, расширенная аннотация. DOI: <https://doi.org/10.1190/segam2020-3423114.1>

Xuming B., Shenglui Y., Zedan W., Jingguo C., Xiaodong W., Qing H. [2014] Digital geophones and exploration of tight oil. 84th annual meeting, SEG, расширенная аннотация. DOI: <https://doi.org/10.1190/segam2014-0406.1>

Подробнее об авторах



Николя
Тэлье

Sercel



Стефан
Лярош

Sercel



Хань
Ван

Sercel



Филипп
Эрман

Sercel