

MEMS акселерометр

■ Кузнецов И.М., Турлов П.А., СРО МОО ЕАГО

Геофоны, изготавливаемые с использованием MEMS технологии, относятся к группе цифровых датчиков, к которой, в принципе, можно отнести любой датчик, в котором чувствительный элемент и АЦП размещены в одном корпусе. Отличительной особенностью MEMS акселерометров является то, что в данном акселерометре датчик ускорения встроен в сигма-дельта аналого-цифровой преобразователь и составляет с ним единое целое.

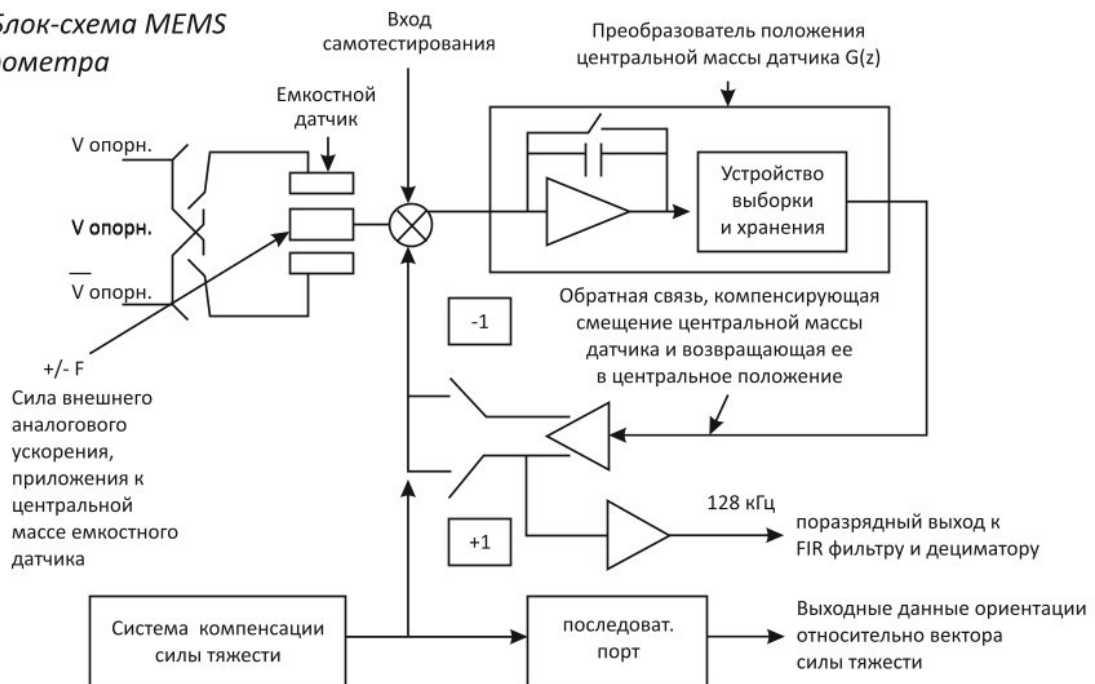
Перейдем к рассмотрению принципа работы MEMS акселерометра.

Блок-схема MEMS акселерометра представлена на рис. 1

шена к каркасу на кремниевых пружинах и является подвижным электродом конденсатора. Верхняя и нижняя пластины конденсатора прикреплены к каркасу и являются неподвижными электродами конденсатора. Для снижения влияния броуновского движения молекул газа датчик герметизирован в вакууме.

В MEMS геофонах-акселерометрах датчик используется вместо входного узла суммирования, имеющегося в стандартных сигма-дельта АЦП, являясь составной частью цепи обратной связи сигма-дельта АЦП 5-го порядка, который считается лучшим среди сигма-дельта АЦП. Подробно работа

► Рис. 1 Блок-схема MEMS акселерометра



Чувствительным элементом MEMS акселерометра является конденсатор с переменной емкостью. Две кремниевые пластины образуют каркас. Центральная эталонная масса пове-

сигма-дельта АЦП рассмотрена в разделе, посвященном АЦП.

Таким образом, движение корпуса акселерометра непосредственно отслеживается массой центрального

электрода конденсатора датчика. Центральный электрод смещается из своего центрального положения, что нарушает соотношение потенциалов обкладок конденсатора. Соответственно, порция заряда по цепи обратной связи поступает на центральный электрод и возвращает его в центр конденсатора. Цикл коррекции этой поразрядной системы обратной связи работает с частотой 128 кГц. Поразрядный сигнал коррекции (последовательность 1 и -1(0)) и явля-

ется выходным сигналом сигма-дельта модулятора АЦП.

После подачи питания на датчик перед началом нормального рабочего режима встроенная система компенсации осуществляет компенсацию силы тяжести с учетом значения ускорения силы тяжести в месте установки датчика, существующего угла наклона установки и смещения по постоянному току, смещая эталонную массу в центр конденсатора. Затем начинает действовать сигма-

Табл. 1 ►

Наименование технического параметра	Значение технического параметра
Функции	Измерение ускорения и передача данных с контролем циклическим кодом 24 –х разрядное преобразование
Полная шкала (Пик&пост.ток)	5 м/с@наклон 0°
Макс. наклон	+/- 180°
Шум (10 – 200 Гц)	0.4 $\mu\text{м}/\text{с}^2 / \sqrt{\text{Гц}}$
Динамический диапазон системы	120 дБ @ 4 мс
Период квантования	4, 2, 1, 0.5, 0.25 мс
Частотный диапазон	0 – 800 Гц, до 1600 Гц (с ухудшением характеристик)
КНИ	- 90 дБ
Потребляемая мощность	285 мВт @ 8 Мб/с 300 мВт @ 16 Мб/с
Точность калибровки ортогональности	+/- 0.25°
Точность калибровки амплитуды	+/- 0.25 %
Измерение наклона	+/- 0.5°
Тесты при включении (статические тесты)	Наклон, значение ускорения силы тяжести, шум
Встроенные динамические тесты датчика	КНИ, усиление, фаза
Размеры	159.2 x 70 x 194 мм
Вес	0.43 кг
Рабочий диапазон температур	- 40° - +70°C
Температура хранения	- 40° - +70°C
Глубина погружения в воду	15 м (с кабелем WPSR) 1 м (с кабелем ST+)

дельта обратная связь, динамически отслеживая приложенное ускорение, компенсируя смещения эталонной массы и удерживая ее в центре конденсатора. Система компенсации силы тяжести компенсирует любое смещение по постоянному току или любое изменение угла установки путем добавления смещения по постоянному току в поразрядный поток данных. В нормальном режиме поразрядный поток данных будет иметь смещение приблизительно равное 7 mg. Это смещение предотвращает появление гармоник состояния покоя в представляющем интерес частотном диапазоне.

Если комбинация динамического ускорения и смещения по постоянному току превышает приблизительно ± 200 mg, преобразователь перегружается. Это приводит к потере управления обратной связью эталонной массы и запускает режим автоматического восстановления датчика после перегрузки. Последовательность процедур восстановления после перегрузки включает процедуры центрирования эталонной массы и смещения по постоянному току. Обаим процедурам требуется для выполнения в среднем 650 мс. Значение смещения эталонной массы из-за силы тяжести и калибровочные значения датчика запоминаются в EEPROM в ASIC (специализированная интегральная микросхема). Отдельный микроконтроллер обеспечивает легкий доступ к регистрам ASIC через порт RS-232 и с помощью простых ASCII команд. Контроллер обеспечивает также выполнение функции запуска и

восстановления после перезагрузки.

Затем поразрядный выход ASIC может быть заведен в DSP с цифровым FIR фильтром для выполнения антиалиасной фильтрации для выбранного периода квантования и устранения высокочастотного шума квантования. Полученный сигнал может быть с помощью процедуры децимации приведен к 24-х разрядному цифровому слову для заданного периода квантования. DSP обеспечивает также ФВЧ фильтрацию.

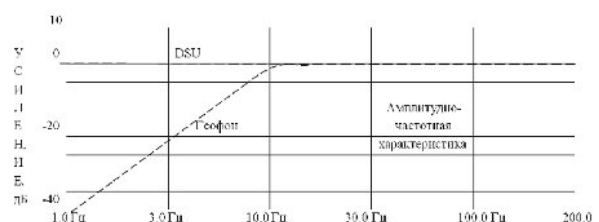
В настоящее время лишь две геофизические компании – Sercel (Франция) и ION (США) поставляют Заказчикам сейсморегистрирующие системы с MEMS геофонами-акселерометрами.

Sercel

Датчик Sercel DSU - это результат совместной работы трех компаний: LETI (ведущая европейская лаборатория в области микротехнологий) - научно-технические исследования; TRONIC's Microsystems – изготовитель; Sercel – Заказчик и испытания датчика. Работы были начаты в 1995 г. Технические параметры DSU представлены в таблице 1 [1].

Датчик DSU выпускается как в однокомпонентном варианте – DSU-1, так и трехкомпонентном варианте – DSU-3.

На рисунке 2 представлены сравни-



▲ Рис. 2 Линейная характеристика: Низкочастотные характеристики геофона и DSU

Табл. 2 ▼

Наименование технического параметра	Значение технического параметра
Цифровое преобразование	324 разряда (23 + знак) LSB=0.39 $\mu\text{м/с}$
Период квантования	4, 2, 1 мс
Полная шкала	+/- 3.3 м/с(при любом наклоне)
Шум (3 – 375 Гц)	0.44 $\mu\text{м/с}^2 / \sqrt{\text{Гц}}$
Динамический диапазон	118 дБ @ 4 мс, 115 дБ @ 2 мс, 112 дБ @ 1 мс (от 3 Гц до $\frac{3}{4}$ частоты Найквиста при любом наклоне)
Частотный диапазон	1450 Гц @ 4 мс, 1463 Гц @ 2 мс, 1470 Гц @ 1 мс (до $\frac{3}{4}$ частоты Найквиста)
Цифровые антиалиасные фильтры	93.8 Гц @ 4 мс 187.5 Гц @ 2 мс 375 Гц @ 1 мс подавление выше частоты Найквиста -128 дБ
Цифровой ФВЧ	32 частоты среза (диапазон 3–90 Гц) Крутизна подавления - 12 дБ/окт
Цифровой фильтр смещения	Либо постоянный фильтр: 1450 Гц @ 4 мс 1463 Гц @ 2 мс 1470 Гц @ 1 мс Крутизна подавления 6 дБ/окт Компенсация смещения по пост.току
КНИ	< 0.002% @ 12 Гц, 68.4 мг пик.уск.
Идентичность датчиков	+/- 0.4 % при любом наклоне ⁴
Развязка от поперечных воздействий	6 дБ
Установка	Любая ориентация
Встроенные тесты при включении	Проверка включения датчика и выполнения операции конфигурации Контроль цепи обратной связи Измерение гравитационной постоянной Потребляемая мощность Проверка True Digital характеристики системы тестом обратной связи цифрового датчика
Тесты, контролируемые оператором	Ориентация по вертикали Шум расстановки Проверка работоспособности канала передачи данных и цифровых фильтров Подсчет ошибок в телеметрическом канале
Тесты по окончании каждой записи	Перегрузка Вертикальная ориентация Смещение датчика Наличие признаков ошибок
Рабочий температурный диапазон	- 40° - +70°С
Глубина погружения в воду	До 15 м
Размеры	165 x 50 x 69 мм
Вес	0.625 кг

тельные амплитудно-частотные характеристики низкочастотного электродинамического геофона и датчика DSU.

ION

Разработка MEMS акселерометра VectorSeis компании ION (ранее Input-Output) длилась 15 лет. Технические параметры VectorSeis представлены в таблице 2 [2].

Сравнение электродинамических геофонов и MEMS акселерометров

MEMS акселерометры по своей природе являются точечными приборами. Этот факт накладывает определенные ограничения на использование данного типа датчиков при выполнении 1-С наблюдений, поскольку использование дорогих одиночных датчиков, изготовленных с использованием MEMS технологии, с высокой плотностью размещения для решения проблем, связанных с поверхностными волнами, является достаточно дорогим удовольствием. Вот почему возможность широкого использования MEMS акселерометров в основном связывают с выполнением 3С наблюдений. Некоторые рекламируемые свойства MEMS акселерометров, связанные с их использованием при многокомпонентных наблюдениях, в целом выглядят так:

- прямой цифровой выход;
- улучшенная векторная точность; хорошая линейная амплитудно-фазовая характеристика в широком частотном диапазоне;
- низкий уровень собственных шумов датчика;
- измерение наклона датчика;

- большой динамический диапазон; незначительное потребление питания;
- рабочая эффективность; точечная регистрация.

Оценим вышеперечисленные утверждения с учетом того, что могут предложить современные электродинамические геофоны [3].

Прямой цифровой выход

При достаточно плотном размещении датчиков аналоговые связи должны быть короткими. Таким образом, едва ли это утверждение для цифровых датчиков дает им большое преимущество по сравнению с 3С геофоном с небольшим соединительным кабелем.

Улучшенная векторная точность

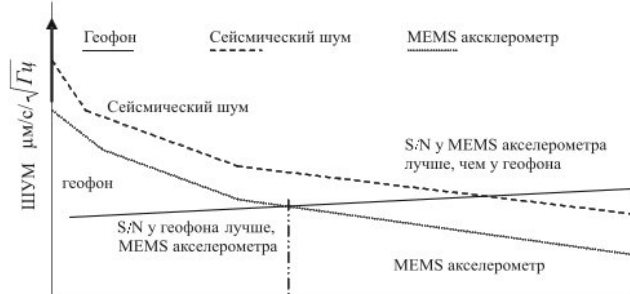
Алгоритмы векторной точности предназначены для обеспечения точной ориентации 3С данных путем их преобразования с использованием данных о G, регистрируемых MEMS акселерометрами, и здесь многое определяется возможностями адаптивных фильтров. Они могут быть хорошим инструментом распознавания сигналов, имеющих трехкомпонентные характеристики поведения, таких как поверхностные волны.

При этом, согласно [4] интервалы одиночных датчиков должны быть не более половины интервала группы геофонов. Уменьшение интервала между приемниками в 2 – 3 раза является эффективным решением для устранения случайного шума. Для подавления когерентного шума, такого как поверхностная волна, имеется два решения. Одно решение заключается в уменьшении интервала

между одиночными приемниками до значения, меньшего половины периода поверхностной волны. Это решение очень дорогое. Особенно для 3D наблюдений. Другое решение связано с использованием поляризационных фильтров [5]. Поляризационные фильтры используют зарегистрированные горизонтальные компоненты данных для подавления поверхностной волны в вертикальной компоненте и наоборот. Но многие коротковолновые шумы, такие как граничные волны, рассеянная прямая волна и головные волны, зачастую имеют одну моду колебаний и не могут быть отфильтрованы поляризационными или адаптивными фильтрами. Так что возможности и этой методики ограничены.

Линейная амплитудно-фазовая характеристика в широком частотном диапазоне

Низкочастотная характеристика MEMS акселерометров является одним из основных их преимуществ и в этой области геофоны с их ослаблением 12 дБ/октава могут конкурировать с трудом. Правда, извлечь пользу из очень низких частот из-за различного вида поверхностных волн, которые доминируют в этой части спектра, зачастую не



▲ Рис. 3 Сравнение электрического шума геофона с шумом MEMS акселерометра (область скорости)

представляется возможным.

Шум датчика

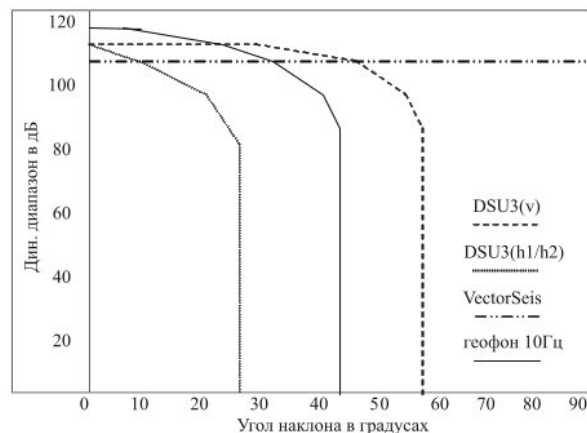
На рисунке 3 представлены зависимости шума от частоты для геофона и MEMS акселерометра. При сравнении электрического шума одиночного геофона и шума MEMS акселерометра с типовым сейсмическим шумом видно, что до 40–50 Гц геофоны ведут себя лучше MEMS акселерометра. Но в то время как MEMS акселерометры могут использоваться в поле лишь как точечные датчики, геофоны такого ограничения не имеют и при использовании короткой группы уровень шума может быть снижен.

Наклон датчика

MEMS акселерометры имеют возможность путем измерения G определять отклонение их установки от вертикали. Конечно, знание наклона в некоторых случаях очень полезно.

На рисунке 4 показана зависимость динамического диапазона геофона и MEMS акселерометра от угла наклона [3].

Из Рис. 4 видно, что зависимости динамического диапазона от угла наклона у различных вариантов MEMS



▲ Рис. 4 Зависимость динамического диапазона геофона и MEMS акселерометров от угла наклона

акселерометров отличаются друг от друга.

Согласно [3] при регистрации вертикальной составляющей допускается отклонение геофона от вертикали, по меньшей мере, до 35°.

Динамический диапазон

Общий динамический диапазон MEMS акселерометров примерно равен 120 дБ. Механика обеспечивает геофону общий динамический диапазон равный 140 дБ. Однако мгновенный динамический геофона, с учетом КНИ, существенно ниже, достигая 80 дБ при КНИ, равном 0.01%. Вместе с тем, при регистрации слабых сигналов в присутствии сильных шумов группа геофонов в основном более эффективна, чем одиночный датчик. Группа геофонов улучшает динамический диапазон в $10 \times \log N$ дБ, поскольку окружающий шум уменьшается в N , в то время как одиночный датчик не в состоянии ослабить окружающий шум или шум, связанный с возбуждением.

Потребление питания

Геофоны, даже при 3С наблюдениях, не требуют для работы аккумуляторов, в то время как для MEMS акселерометров питание необходимо постоянно. Для систем с передачей питания через кабели приемных линий это является проблемой, поскольку общая используемая энергия не просто соотносится со временем, в течение которого включены MEMS акселерометры, она также пропорциональна длине кабеля и квадрату используемого тока. По этой причине в системах с подачей питания по кабелю аккумуляторы разряжаются значительно быстрее, чем это можно

было бы ожидать, исходя из их параметров потребляемой мощности. В целом, проблема потребления энергии может стать даже более критичной для работ, в которых используются появившиеся системы с «непрерывной регистрацией». Здесь каждый наземный модуль имеет внутреннюю память и работает автономно до 3 недель.

Подводя итог выше сказанному, можно констатировать, что MEMS акселерометры, по крайней мере в существующем исполнении, могут использоваться лишь как точечные датчики для выполнения 3С наблюдений. Имеются примеры, когда уникальные технические возможности MEMS акселерометров могут быть очень полезными для выполнения 3С наблюдений и есть примеры, когда недостатки, присущие этой технологии, препятствуют этому применению. Можно также отметить, что до тех пор, пока на данную технологию будет монополия двух компаний, о широком применении MEMS акселерометров в выполнении геофизических работ говорить не приходится.

Литература

1. Sercel 428XL Specifications, 2008
2. System Four, проспект компании ION, 2004
3. Heath R.G., Time to re-evaluate our approach to 3C land seismic acquisition, V.25, February, 2007
4. M.Lansley, M.Laurin, S.Ronen. Land 3D: groups or single sensors? Cables or radio? Geophysical and operational considerations
5. D.E. Meersman, K., R.Kendall. A complex SVD-polarization filter for ground roll attenuation on multi-component data: 67th Annual