

Донная сейсмическая станция на основе волоконно-оптического гидрофона и микромеханического геофона

■ Куликов А. В., Никитенко А. Н., Мешковский И.К., Плотников М. Ю.
НИУ ИТМО, Санкт-Петербург

Введение

Исследование запасов углеводородных ископаемых на арктическом шельфе лимитируется наличием аппаратуры для геофизических измерений. Одна из распространенных методик геофизических измерений предполагает применение донных сейсмических станций.

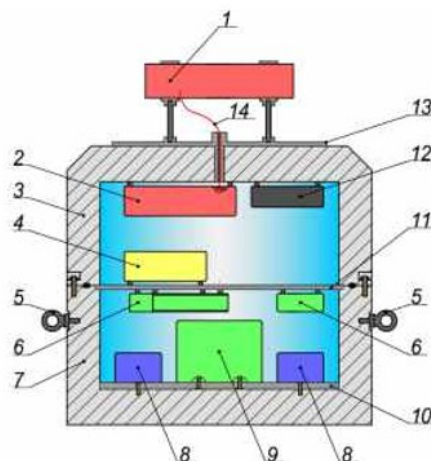
Целью настоящей работы явилась разработка и исследование донной сейсмической станции на основе волоконно-оптического гидрофона и триады микромеханических акселерометров в качестве геофона.

К достоинствам микромеханических акселерометров можно отнести высокую линейность АЧХ в области низких частот; низкий уровень шума; высокую чувствительность; большой динамический диапазон; нечувствительность к ориентации в пространстве и возможность их работы в режиме инклинометра. Наиболее существенными достоинствами волоконно-оптических гидрофонов по сравнению с пьезокерамическими являются их высокая чувствительность в области низких частот, полная электрическая пассивность, малые вес и размеры, а также низкая стоимость изготовления чувствительных элементов. Настоящая работа направлена на оценку возможностей использования указанных измерительных приборов для проведения геофизических исследований.

В статье проведен детальный анализ особенностей использования рассматриваемых измерительных приборов, рассмотрены вопросы интерпретации полученных с их помощью данных, представлены результаты теоретического и экспериментального исследования их параметров.

Общее устройство макета донной станции

На рисунке 1 приводится принципиальная схема макета разработанной донной сейсмической станции.



▲ Рис. 1. Общая схема макета ДС

Герметичный сборный корпус состоит из двух частей – верхней крышки 3 и нижней 7. Для герметизации используется уплотнительная прокладка. Соединение частей осуществляется резьбовыми втулками. Нижняя часть корпуса снабжена четырьмя кронштейнами-проушинами 5. Внутреннее пространство ДС разделено на две части перегородкой 11. В нижнем отсеке находятся аккумуляторы 8, для автономной работы макета, три АЦП 6 и датчик вибрации – аналоговый МЭМС-акселерометр 9. МЭМС-акселерометр установлен на пластине 10, которая в свою очередь закреплена в нижней крышке 7. В верхнем отсеке расположены: блок питания 4, соединенный с аккумуляторами, плата цифровой обработки сигнала 12 и оптический блок 2 – составляющая волоконно-оптического (далее – ВО) гидрофона. На кронштейне 13 установлен чувствительный элемент ВО-гидрофона 1, который соеди-

нен с оптическим блоком 2 с помощью оптического волокна 14 проложенного через загерметизированное отверстие в кронштейне.

Запись полученных данных производится на цифровую карту памяти формата Secure Digital Memory Card (SD). Плата цифровой обработки поддерживает установку карты памяти объемом до 32 Гб.

МЭМС-акселерометр

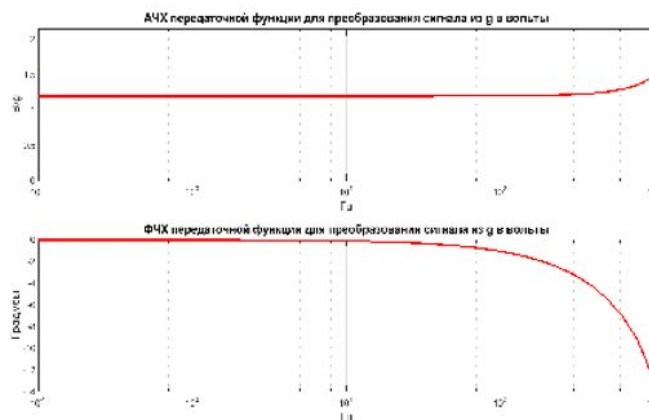
В макете ДС используется датчик вибрации акселерометрического типа в качестве альтернативы традиционно используемым индуктивным геофонам. По типу чувствительных элементов среди акселерометрических сенсоров сейсмического класса, представленных на рынке, можно выделить две группы с точки зрения практической значимости – МЭМС и пьезоэлектрические. В устройстве использован серийно выпускаемый трехкоординатный аналоговый МЭМС-акселерометр SF3600 от компании Colibrys. Основные преимущества МЭМС-датчиков: (по сравнению с индуктивными геофонами):

- линейность АЧХ в области низких частот;
- малый набег фазы в области частот существенно ниже резонансной, типичная резонансная частота для подобных систем составляет порядка 1 кГц [1];
- нечувствительность к ориентации в пространстве;
- возможность работы датчика в режиме инклинометра.

В таблице 1 приведены основные технические характеристики используемого датчика [2].

Акселерометр SF3600 состоит из трех ортогонально позиционированных одноосных сенсоров SF1600 [2]. На рисунке 1 приводятся теоретические частотные характеристики для SF1600. На рисунке 2 показаны экспериментальные характеристики, полученные для группы датчиков SF1600. В АЧХ имеется выраженный горизонтальный участок. Набег фазы минимален (по сравнению с индуктивными геофонами) и может быть приближенно описан линейной зависимостью.

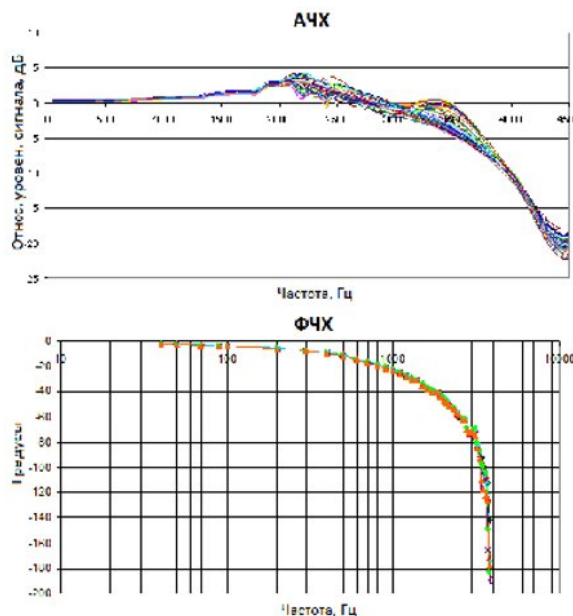
Измерительная система, состоящая из аналогового датчика и АЦП, обладает уровнем шумов одного порядка, как для случая использования индуктивного геофона, так и приведенного МЭМС-акселерометра. Сравнительный график чувствительности для используемого сенсора и геофона GS-20DX10 показан на рисунке 3. Чувствительность геофона приведена к виду В/г.



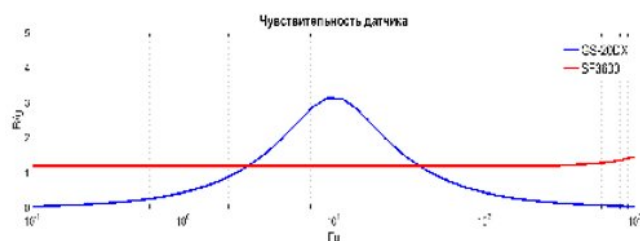
▲ Рис. 2. Теоретические АЧХ и ФЧХ для SF1600

► Табл. 1. Основные характеристики SF3600

Характеристика	SF3600
Регистрируемый диапазон ускорений, g	±3
Чувствительность, В/г	1,2 ±0,12
Динамический диапазон (0.1-100 Гц), дБ	115 ±2
Шум (СКО), μ г	3,3
Полоса, Гц	от 0,1 до 1000



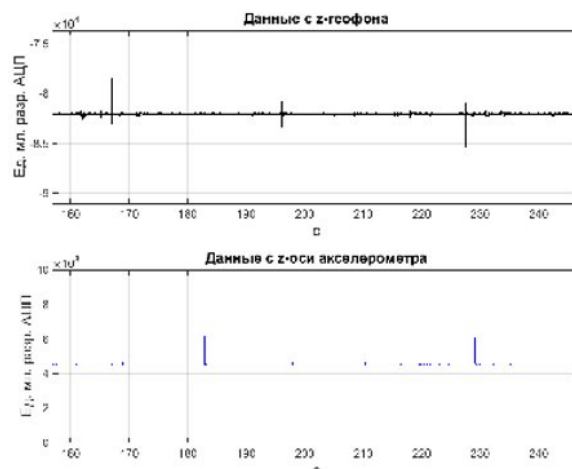
▲ Рис. 3. Экспериментальные частотные характеристики для SF1600



▲ Рис. 4. Сравнительный график чувствительности

Как видно из графика, представленного на рисунке 4, на интервале от 3 Гц до 38 Гц геофон превосходит акселерометр по чувствительности. В диапазонах от 0.1 Гц до 3 Гц и от 38 Гц до 1 кГц МЭМС-датчик чувствительнее. Кроме того, МЭМС-датчик обладает практически плоской АЧХ во всем рассматриваемом диапазоне рабочих частот.

Для определения соотношения сигнал-шум выходного сигнала МЭМС-акселерометра и выходного сигнала индуктивного геофона SM-6A-4.5 проведен следующий эксперимент. Станция, оснащенная индуктивным геофоном SM-6A-4.5 и макет ДС, были размещены в открытом водоеме на глубине около 10



▲ Рисунок 5. Фрагмент экспериментальных данных по оси Z

метров на незначительном удалении друг от друга. После проведения серии ударных акустических воздействий обе станции были извлечены из воды. Фрагменты записанных сигналов по оси z (вертикальная ось) представлены на рисунке 5.

Соотношение сигнал-шум для МЭМС-акселерометра SF3600 для выделенных воздействий составило 53-55 дБ, соотношение сигнал-шум для этих же фрагментов у индуктивного геофона SM-6A-4.5 - 41-42 дБ.

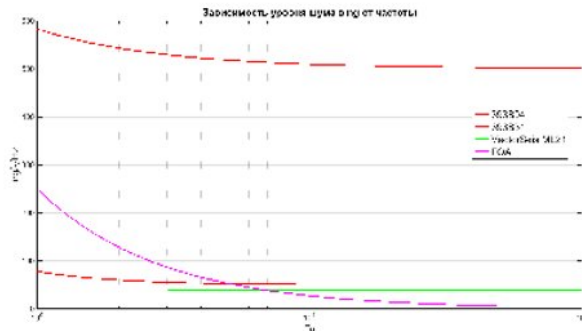
Другие типы датчиков вибрации и перспективы их применения

Пьезоэлектрические акселерометры обладают пониженным уровнем собственного шума и повышенной чувствительностью по сравнению с МЭМС-устройствами. Зависимость между чувствительностью и ориентацией прибора в пространстве также отсутствует. Особенностью датчиков такого типа является нечувствительность к постоянному уровню сигнала т.е. к ускорению свободного падения.

Оптические датчики, использующие косвенные интерферометрические методы регистрации сигнала, обладают большим потенциалом к созданию высокочувствительных сейсмических датчиков с большим динамическим диапазоном

(>120 дБ), которые могут применяться как в донных сейсмических станциях, так и в буксируемых косах и сухопутной сейсмической разведке. В работе [3] приводится описание трехосного волоконно-оптического акселерометра с уровнем шума $30 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ на частоте 10 Гц. Приведенная схема построения акселерометрического датчика позволяет мультиплексировать датчики на одном волокне. В работе [4] обозначен теоретический предел в $20 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ на частоте 10 Гц. Возможность мультиплексирования акселерометрических датчиков позволяет не только объединять несколько сенсоров в систему большой протяженности, обладающую низким уровнем шумов и толерантностью к электрическим помехам, но и создавать гибридные комплексы, состоящие из ВО-акселерометров и ВО-гидрофонов (которые также обладают возможностью к мультиплексированию, см раздел 2.3 Датчик гидроакустического давления). Подобные комплексные системы могут использоваться в буксируемых косах. Системе из ВО-гидрофона, объединенного с тремя одноосными ВО-акселерометрами требуется только один блок обработки сигнала, включающий в себя источник оптического излучения, приемник и схему обработки. Такое решение можно использовать при построении донных сейсмических станций.

Стоит отметить также существующую разновидность МЭМС устройств, исключаящую необходимость использования отдельного АЦП в измерительной системе – так называемые цифровые МЭМС-акселерометры. По сути, датчик представляет собой сигма-дельта АЦП, модулятор которого подключен к обратной связи емкостного МЭМС-акселерометра. Их уровень шумов много ниже приведенного к ускорению шума индуктивных геофо-



▲ Рис. 6. Сравнительные шумовые характеристики для моделей 393B04, 393B31, VectorSeis ML21 и ВО-датчика (FOA).

нов. Более подробно с этими устройствами можно ознакомиться в работах [5,6]. В качестве практического примера использования можно привести сейсмический датчик VectorSeis.

На рисунке 6 приведены теоретические шумовые характеристики для цифрового МЭМС-акселерометра, пьезоакселерометров (две модели), подключенных к 24-х битным АЦП (частота дискретизации 4 кГц, без учета шума $1/f$), и волоконно-оптического датчика из работы [3].

Красным цветом выделены графики для пьезоэлектрических акселерометров. Верхний график приводится для модели 393B04, нижний – 393B31. Малый уровень шума для последней модели, объясняется высокой чувствительностью (10 V/g). Основываясь на фундаментальной природе т.н. “розового” шума ($1/f$ -шум), можно предположить, что приведенный в спецификации [7] для цифрового МЭМС-акселерометра, используемого в модуле VectorSeis ML21, уровень шума в $40 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ в полосе частот от 3 – 375 Гц является “медианным” – усредненным шумом в полосе частот. Другими словами в области низких частот зеленый график также подвержен “загибанию” вверх. Шум оптического акселерометра показан фиолетовым цветом (обозначение “FOA”). Как видно из рисунка, уступая в области низких частот модели 393B31,

ВО-акселерометр существенно превосходит ее по шумам на частотах выше 8 Гц. Схема обработки, используемая для демодуляции сигнала в ВО-акселерометре, может обеспечить большой динамический диапазон, давая тем самым возможность регистрации сигналов порядка единиц g и более. Таким образом, ВО-акселерометр, при шумах сравнимых с шумами модели высокочувствительного пьезоакселерометра, лишен недостатка в ограничении предела измерения ниже g .

Методика приведения акселерометрических данных

Для обеспечения возможности широкого использования акселерометрических датчиков необходимо обеспечить совместимость существующих программных пакетов для обработки сейсмической информации с данными акселерометрического типа. Ниже приводится методика, позволяющая осуществить эквивалентное преобразование записанных с МЭМС-акселерометра данных для последующего анализа с помощью сейсмических программ, заточенных под работу с данными от индуктивных геофонов [1]. Подобная методика может быть получена и для других типов датчиков вибрации (пьезоэлектрические, оптические) при построении соответствующей математической модели.

Описание колебательного процесса, возбуждаемого внешним воздействием, задается для обоих типов датчиков дифференциальным уравнением гармонического затухающего осциллятора: (1).

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2\lambda\omega_0 \frac{\partial x}{\partial t} + \omega_0^2 x = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

В выражении (1): x - смещение чувствительного элемента относительно корпуса, u - внешнее воздействие (смещение земли, относительно некоторого

базового), λ - коэффициент затухания, ω_0 - резонансная частота.

В соответствии с законом Фарадея-Ленца величина индуцируемой в катушке геофона Э.Д.С. пропорциональна скорости относительного смещения, т.е. производной относительного смещения катушки и магнитной инертной массы (2). Вводя коэффициент пропорциональности - чувствительность геофона S_G (В·с/м), получаем (3). Для МЭМС-сенсора напряжение на выходе пропорционально смещению чувствительного элемента и описывается выражением (4)[1], где S_A (В/м).

$$v \sim \frac{dx}{dt} \quad (2), \quad v = S_G \frac{dx}{dt} \quad (3), \quad V_A = S_A x \quad (4)$$

Решая уравнение (1) в частотной области, получаем выражение (5). В частотной области используемые переменные обозначаются заглавными буквами.

$$X(\omega) = \frac{-\omega^2}{-\omega^2 + 2j\lambda\omega_0\omega + \omega_0^2} U(\omega) \quad (5)$$

Дифференцируя и используя (3) получаем связь между выходным напряжением (В) и скоростью (м/с, выражение 6) или ускорением (м/с², выражение 7) внешнего воздействия для индуктивного геофона.

$$V_G^v(\omega) = -S_G \frac{\omega^2}{-\omega^2 + 2j\lambda\omega_0\omega + \omega_0^2} \frac{\partial U}{\partial t}(\omega) \quad (6)$$

$$V_G^a(\omega) = S_G \frac{j\omega}{-\omega^2 + 2j\lambda\omega_0\omega + \omega_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}(\omega) \quad (7)$$

Аналогичным путем получаем выражение (8) - связь между выходным напряжением (В) и ускорением (м/с²) внешнего воздействия для МЭМС-акселерометра.

$$V_A^a(\omega) = S_A \frac{j\omega}{-\omega^2 + 2j\lambda\omega_0\omega + \omega_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}(\omega) \quad (8)$$

Учитывая, что частоты, интересующие

при сейсмическом анализе, много меньше резонансной частоты для МЭМС-акселерометра (которая составляет порядка нескольких килогерц), т.е. $\omega \ll \omega_0$, последнее выражении можно упростить (выражение 9). В формуле 9 входное воздействие задается в м/с^2 , величина выхода V_A^a – вольты, S_A^g – чувствительность, выраженная в В/г , g – безразмерная величина, численно равная ускорению свободного падения (9.81 м/с^2)

$$V_A^a(\omega) = \frac{S_A}{\omega_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial^2 t}(\omega) = g \cdot S_A^g \frac{\partial^2 U}{\partial^2 t}(\omega) \quad (9)$$

Разделив (7) на (9), получим искомую функцию, связывающую показания индуктивного геофона и МЭМС-акселерометра в частотной области (выражение 10).

$$\frac{V_G(\omega)}{V_A(\omega)} = \frac{S_G}{g \cdot S_A^g} \frac{j\omega}{(-\omega^2 + 2j\lambda\omega_0\omega + \omega_0^2)} \quad (10)$$

Преобразовав выражение 10, получаем выражение 11, связывающее скорость (V_G/S_G), для модели геофона, к которому выполняется приведение (характеризуется параметрами ω_0 и λ) с напряжением, полученным с акселерометра с напряжением, полученным с акселерометра V_A (характеризуется чувствительностью S_A^g).

$$\frac{V_G(\omega)}{S_G} = \frac{V_A(\omega)}{g \cdot S_A^g} \frac{j\omega}{(-\omega^2 + 2j\lambda\omega_0\omega + \omega_0^2)} \quad (11)$$

Согласно изложенному выше алгоритму для интерпретации акселерометрических данных необходимо выполнить следующие шаги:

1) Используя обратное преобразование Фурье преобразовать интересующий сегмент данных из частотной области во временную. В результате имеем набор комплексных точек $V_A(\omega)$:

2) Осуществить коррекцию Фурье-

образа (полученного набора точек), используя выражение (11);

3) Осуществить прямое Фурье-преобразование скорректированного образа из частотной области во временную.

Подавая на вход описанного алгоритма значения в вольтгах, полученные с акселерометрического датчика (определяемого чувствительностью S_A^g в В/г), на выходе имеем значения в м/с для заданного индуктивного геофона (определяемого параметрами λ – коэффициент затухания и ω_0 – собственная частота).

Волоконно-оптический гидрофон

Одним из перспективных направлений в гидроакустике в настоящее время является создание волоконно-оптических интерферометрических датчиков давления, к достоинствам которых можно отнести: высокую чувствительность, устойчивость к электромагнитным помехам, полную электрическую пассивность, малые вес и размеры, легкость мультиплексирования (что особенно важно при построении распределенных измерительных систем), а также, что крайне немаловажно – низкую стоимость изготовления чувствительных элементов.

На кафедре Световодной Фотоники Санкт-Петербургского Национального Исследовательского Университета Информационных Технологий, Механики и Оптики был разработан и создан действующий образец подобного датчика – волоконно-оптический гидрофон (ВО-гидрофон.).

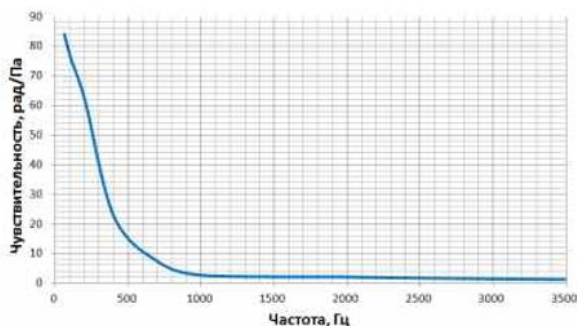
Чувствительный элемент ВО-гидрофона представляет собой сердечник, выполненный из специального материала, усиливающего гидроакустическую чувствительность оптического волокна. Помимо усиления гидроакустической чувствительности, материал чувствительного элемента обладает механичес-

кими свойствами, позволяющими сохранить его характеристики при больших уровнях гидростатического давления в широком диапазоне температур.

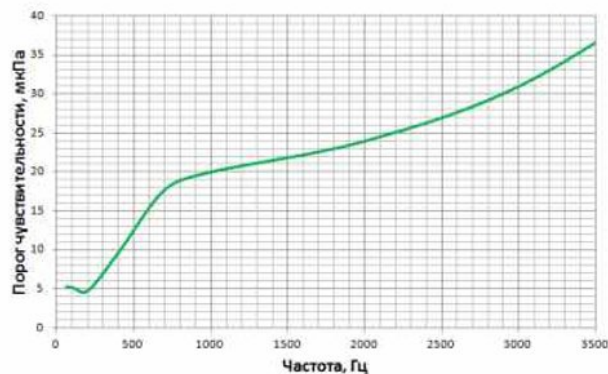
В силу существенной нелинейности выходного сигнала ВО-гидрофона, восстановление информации об исходном акустическом воздействии требует выполнения ряда специальных преобразований над оптическим интерференционным сигналом, которые могут осуществляться согласно алгоритму демодуляции [8] на основе быстродействующей ПЛИС. При этом частотный диапазон работы рассматриваемого ВО-гидрофона зависит от конструкции чувствительного элемента и параметров используемого алгоритма демодуляции сигналов [9]. В настоящее время рабочая полоса частот ВО-гидрофона составляет от долей герца до трех с половиной килогерц. При этом верхняя граница частотного диапазона определяется параметрами алгоритма обработки и может быть расширена.

Разработанный ВО-гидрофон прошел ряд испытаний, направленных на определение его основных эксплуатационных характеристик: чувствительности, порога чувствительности, стойкости к воздействиям гидростатического давления и температуры.

В связи с отсутствием технической возможности оценка чувствительности ВО-гидрофона на частотах ниже одного



▲ Рис. 7. Характеристика чувствительности ВО-гидрофона



▲ Рис. 8. Порог чувствительности ВО-гидрофона

килогерца производилась на воздухе. Результаты оценки чувствительности рассматриваемого ВО-гидрофона представлены на рисунке 7.

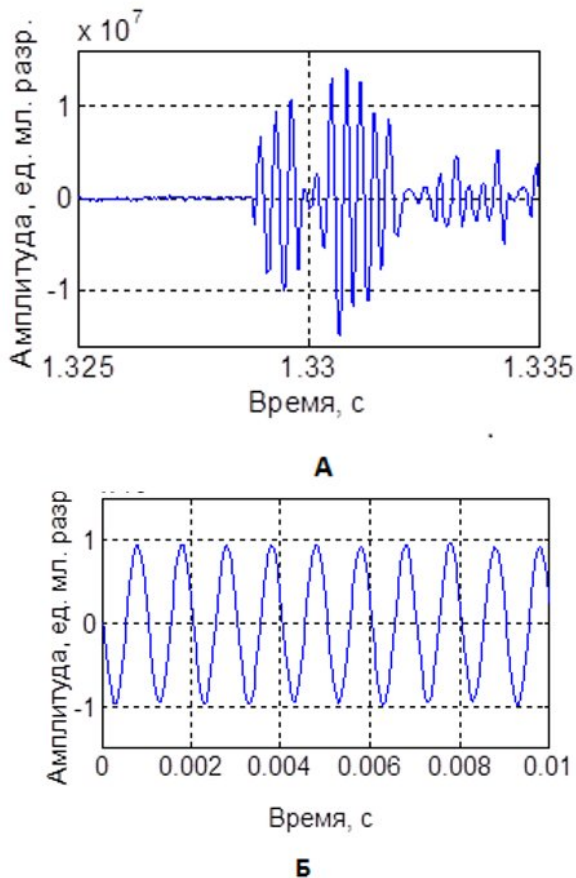
Полученные в ходе измерений результаты оценки порога чувствительности ВО-гидрофона, исходя из уровня его собственных шумов, представлены на рисунке 8. Результаты математических расчетов и математического моделирования позволяют утверждать, что чувствительность ВО-гидрофона ИТМО будет и дальше расти на акустических частотах менее 50 Гц, что делает его особенно привлекательным в качестве измерительного прибора для решения задач геофизики и поиска полезных ископаемых, требующих использования высокочувствительных приемников акустических волн в низкочастотной области.

На рисунке 9 представлены сигналы, полученные в ходе экспериментальных исследований ВО-гидрофона.

Рассматриваемый гидрофон успешно прошел температурные испытания (в диапазоне от 0 °С до 30 °С), а также испытания на гидроакустическое давление (на 63 атм.), не показав при этом ухудшения характеристик.

Единицы измерения для пьезокерамических и ВО-гидрофонов

Как известно, принцип действия пьезоэлектрических гидрофонов осно-



▲ Рис. 9. Сигналы с волоконно-оптического гидрофона - а) в импульсном режиме акустического излучения (частота 3 кГц – амплитуда 1,5 Па), б – в непрерывном режиме акустического излучения (частота 1 кГц – амплитуда 0,35 Па)

ван на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта – возникновения поверхностных электрических зарядов при деформации чувствительного элемента гидрофона, выполненного из специального пьезоэлектрического материала - например, титаната бария. В результате прямого пьезоэффекта чувствительный элемент гидрофона генерирует напряжение на своих электродах, пропорциональное акустическому давлению, действующему на его поверхность. Поэтому чувствительность пьезоэлектрических гидрофонов измеряется в Вольтах/Паскаль [В/Па].

В отличие от пьезокерамических гидрофонов в основе работы волоконно-

оптических интерферометрических датчиков гидроакустического давления (ВО-гидрофонов) лежит измерение разности фаз между лучами в плечах волоконного интерферометра, вызываемой воздействием на чувствительное волокно гидроакустического давления. Поэтому общепринятой единицей измерения чувствительности ВО-гидрофонов является радианы/Паскаль [рад/Па].

Следует отметить, что пересчет [рад/Па] в традиционные [В/Па] вполне возможен. Как правило, для обработки сигналов с волоконно-оптических датчиков используются сигнальные процессоры или программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), выходные сигналы с которых представляют собой последовательность цифровых отсчетов, выраженных в единицах младших разрядов и следующих с заданной частотой дискретизации. При этом измеряемый фазовый сигнал в 1 радиан соответствует конкретному числу ед. мл. разр. Подавая эти цифровые отсчеты на ЦАП с заданным опорным напряжением, можно осуществить переход от [рад/Па] к [В/Па].

Основным критерием сравнения волоконно-оптических и пьезокерамических гидрофонов является их порог чувствительности в [Па] и максимальное измеряемое акустическое давление [Па] на линейном участке амплитудной характеристики, фактически определяющие их динамический диапазон работы.

Заключение

На кафедре Световодной Фотоники Университета ИТМО создан действующий макет донной сейсмической станции, в состав которой входит волоконно-оптический гидрофон оригинальной конструкции и микромеханический геофон сейсмического класса.

Согласно экспериментальным данным оценки характеристик волоконно-оптического гидрофона, его чувствительность составляет порядка 2 рад/Па на частоте 1000 Гц и по оценке, полученной в ходе экспериментов на воздухе, возрастает с уменьшением частоты акустического излучения до значений 84 рад/Па на частоте 56 Гц. При этом порог чувствительности волоконно-оптического гидрофона снижается до 5 мкПа. Очевидно, что область низких частот является наиболее перспективной для использования ВО-гидрофонов по сравнению с пьезокерамическими гидрофонами.

Установленный в макет донной сейсмической станции МЭМС-акселерометр обладает такими принципиальными особенностями, как: высокая чувствительность, линейность АЧХ в области низких частот, малый набег фазы в полосе частот, нечувствительность к ориентации в пространстве. Это открывает возможности его использования в качестве высокочувствительного приемника сейсмических колебаний.

Для приведения акселерометрических данных (измеряемых в единицах g) в единицы измерения индуктивных геофонов (м/с), широко используемых в программных пакетах обработки сейсмических данных, разработана методика эквивалентного быстрого преобразования. Описание настоящей методики с математической точки зрения приведено в настоящей статье.

В работе рассмотрены перспективы использования волоконно-оптического акселерометра в качестве приемника сейсмических колебаний, которые обусловлены его высокой чувствительностью и возможностью мультиплексирования с другими волоконно-оптическими датчиками.

Для обработки и записи зарегистрированных сигналов в макете ДС используется электронная плата, которую можно легко модифицировать для работы как с пьезоэлектрическими акселерометрами, так и с индуктивными геофонами.

Литература

1. M. S. Hons, "Seismic sensing: Comparison of geophones and accelerometers using laboratory and field data", MoS Thesis, 2008
2. Colibrys SF3600.A Datasheet
3. Y. Shindo, T. Yoshikawa and H. Mikada, "A Large Scale Seismic Sensing Array on the Seafloor with Fiber Optic Accelerometers", Sensors. Proceedings of IEEE (Volume 2), 2002
4. R. D. Pechstedt, D. A. Jackson, "Performance analysis of a fiber optic accelerometer based on a compliant cylinder design", Rev. Sci. Instrum. 66, p. 207, 1995
5. C. P. Singh, "MEMS Based Digital Geophones with Onboard Sigma Delta Modulator", 6th Exploration Conference & Exposition on Petroleum Geophysics "Kolkata 2006"
6. Y. Dong, P. Zwahlen, A. M. Nguyen, R. Frosio, F. Rudolf Colibrys (Switzerland) Ltd, Ultra-high Precision MEMS Accelerometer, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (Transducers), 16th International, 2011
7. VectorSeis Digital Sensors – Vectorseis ML21/MT21 Datasheet
8. L.Wang, M. Zhang, X. Mao, Y.Liao "The Arc tangent Approach of Digital PGC Demodulation for Optic Interferometric Sensors", Proc. SPIE 6292, Interferometry XIII: Techniques and Analysis, 2006
9. M. J. Plotnikov, A. V. Kulikov, V. E. Strigalev, and I. K. Meshkovsky, "Dynamic Range Analysis of the Phase Generated Carrier Demodulation Technique", Advances in Optical Technologies Volume 2014