

УДК 535.4, 681.7

РЕГИСТРАЦИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

О. Т. Каменев^{1,2}, Ю. С. Петров¹, А. А. Подлесных², В. А. Колчинский¹,
И. Н. Завестовская^{3,4}, Ю. Н. Кульчин^{1,4}, Р. В. Ромашко^{1,2}

Создан и исследован прототип переносного волоконно-оптического акселерометра, в котором в качестве чувствительного элемента применяется многовитковый оптомеханический преобразователь, размещенный в плече волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Пассивная фазовая демодуляция с использованием волоконно-оптического разветвителя 3×3 обеспечивает стабильность работы акселерометра при наличии температурного дрейфа рабочей точки. Показана возможность регистрации волоконно-оптическим интерферометрическим акселерометром слабых гидроакустических сигналов.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, интерферометр, акселерометр, гидроакустический сигнал.

Высокая чувствительность волоконно-оптических интерферометрических акселерометров открывает перспективы для их применения в качестве приемников акустических и гидроакустических сигналов. Будучи закрепленным на поверхности, взаимодействующей с акустической или гидроакустической волной акселерометр способен зарегистрировать колебания, вызванные воздействием переменного акустического давления. Такой метод приема гидроакустических сигналов требуется применять, например, при развертывании систем сейсморазведки на поверхности льда. Также он может быть при-

¹ Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041 Россия, Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: romashko@iacp.dvo.ru.

² Дальневосточный федеральный университет, 690950 Россия, Владивосток, ул. Суханова, 8.

³ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

⁴ НИЯУ «МИФИ», 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

менен при размещении акселерометра внутри подводного аппарата, корпус которого является естественным приемником гидроакустических сигналов.

В работе [1] была показана возможность регистрации лазерным сейсмографом на основе волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера слабых сейсмических волн, распространяющихся в переходной зоне “суша-море”. Было показано, что сочетание высокой чувствительности интерферометрических методов измерения с большой длиной оптического пути применявшегося в сейсмографе многовиткового оптомеханического преобразователя обеспечивает пороговую чувствительность к ускорению $1.6 \cdot 10^{-7}$ м/с². Это обеспечивает возможность применения такого подхода к построению волоконно-оптических акселерометров для регистрации слабых гидроакустических сигналов.

В настоящей работе создан и исследован переносной волоконно-оптический акселерометр, в котором в качестве чувствительного элемента применяется многовитковый оптомеханический преобразователь, размещенный в плече волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера. Принципы построения такого преобразователя представлены в работе [2]. В качестве фазовой демодуляции в акселерометре применяется пассивная демодуляция на основе волоконно-оптического разветвителя 3×3 [3]. Этот метод демодуляции хорошо подходит для интерферометрических волоконно-оптических датчиков, применяемых во внелабораторных (полевых) условиях. Показана возможность регистрации таким акселерометром гидроакустических сигналов.

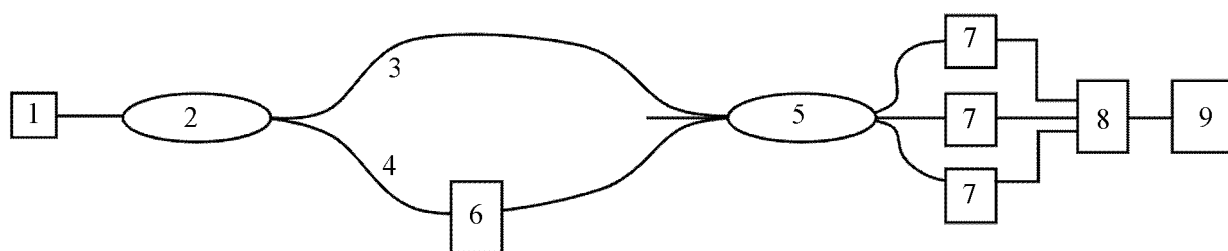


Рис. 1: Схема волоконно-оптического интерферометрического акселерометра: 1 – DFB-лазер; 2 – волоконно-оптический Y-разветвитель; 3 – опорное плечо интерферометра; 4 – сигнальное плечо интерферометра; 5 – разветвитель 3×3 ; 6 – многовитковый оптико-механический преобразователь; 7 – фотоприёмники; 8 – АЦП; 9 – компьютер.

На рис. 1 представлена блок-схема волоконно-оптического интерферометрического акселерометра. Излучение от полупроводникового DFB-лазера (1) (длина вол-

ны 1550 нм, мощность 1 мВт), направляется посредством волоконно-оптического Y-разветвителя (2) в два одномодовых световода, которые являются опорным (3) и сигнальным (4) плечами интерферометра Маха–Цендера. Далее опорная и сигнальная волны направляются в волоконно-оптический разветвитель 3×3 (5). Взаимодействие волн в разветвителе приводит к преобразованию модуляции фазы сигнальной волны, вызванной работой многовиткового оптомеханического преобразователя (6), в модуляцию интенсивности, которая регистрируется при помощи трех фотоприемников (7).

Особенностью фазовой демодуляции с использованием разветвителя 3×3 является формирование на его трех выходах волн, модуляция интенсивности которых сдвинута друг относительно друга по фазе на $2\pi/3$. Совместная обработка выходных сигналов разветвителя обеспечивает возможность полного восстановления изменения разности фаз сигнальной и опорной волн интерферометра Маха–Цендера [4]. Такой метод фазовой демодуляции избавляет от необходимости контроля положения рабочей точки интерферометра, обеспечивает возможность регистрации слабых сигналов даже в условиях значительных внешних воздействий на акселерометр (ветровая нагрузка, акустические воздействия, дрейф температуры и т.д.).

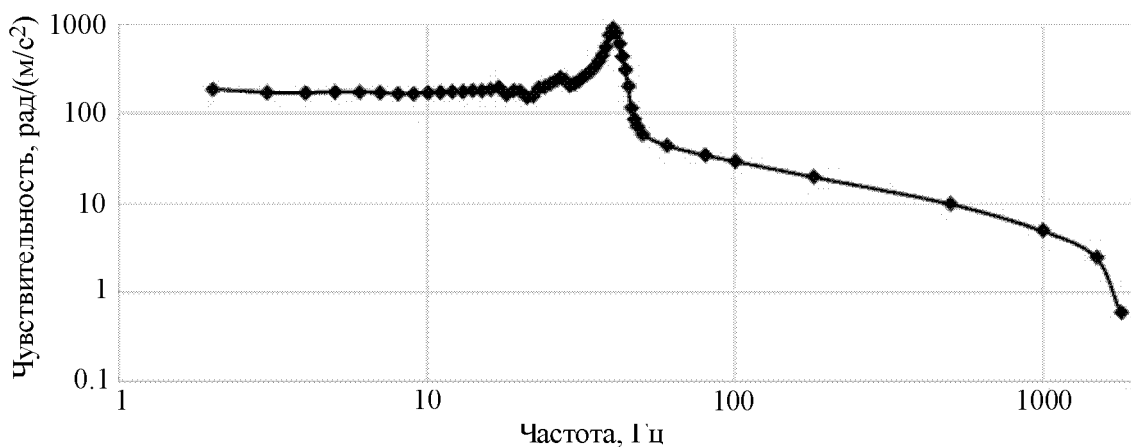


Рис. 2: Амплитудно-частотная характеристика волоконно-оптического акселерометра.

Экспериментальные исследования прототипа акселерометра проводились с использованием виброустановки ВСВ-133 компании ВиКонт. На рис. 2 представлена АЧХ акселерометра, измеренная при амплитуде виброускорения 0.02 м/с^2 .

Как видно из рис. 2, многовитковый оптомеханический преобразователь обладает достаточно высоким коэффициентом преобразования ($\sim 200 \text{ рад} \cdot \text{м}^{-1} \text{с}^2$) в низкоча-

стотном диапазоне до 30 Гц, затем следует резонансный рост до частоты резонанса 40 Гц, где чувствительность возрастает в 4.5 раза. Далее наблюдается снижение чувствительности, коэффициент преобразования убывает до величины $5 \text{ рад}\cdot\text{м}^{-1}\text{с}^2$ на частоте 1000 Гц. Затем чувствительность резко падает, составляя на частоте 2000 Гц величину $0.6 \text{ рад}\cdot\text{м}^{-1}\text{с}^2$. На частотах выше 2000 Гц регистрация колебаний прекращается.

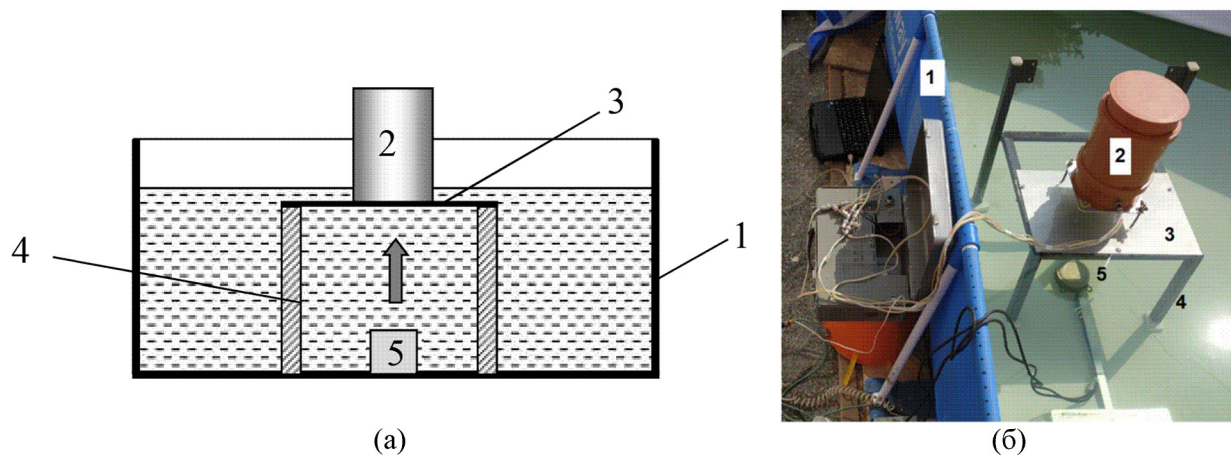


Рис. 3: Схема (а) и фото фрагмента (б) экспериментальной установки для регистрации гидроакустического сигнала волоконно-оптическим акселерометром. 1 – бассейн; 2 – волоконно-оптический акселерометр; 3 – стальная пластина; 4 – стойки рамы; 5 – гидроакустический излучатель.

Возможности многовиткового оптомеханического преобразователя по регистрации сейсмоускорения на низких частотах были продемонстрированы в работе [1]. Эффективность работы акселерометра в этом частотном диапазоне не вызывает сомнений. Однако большинство гидроакустических излучателей работает на более высоких частотах. Поэтому эксперимент по регистрации гидроакустического сигнала с использованием представленного акселерометра проводился при частоте сигнала 2000 Гц, практически на границе чувствительности. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 3, а на рис. 4 представлен выходной сигнал волоконно-оптического акселерометра после обработки.

Эксперимент проводился в бассейне размером 1.4×2.8 м (1), заполненном водой. Волоконно-оптический акселерометр (2) был установлен на стальной пластине (3), края которой были закреплены на раме со стойками (4). Пьезоэлектрический гидроакустический излучатель (5) располагался на дне бассейна под пластиной, на глубине 1 м.

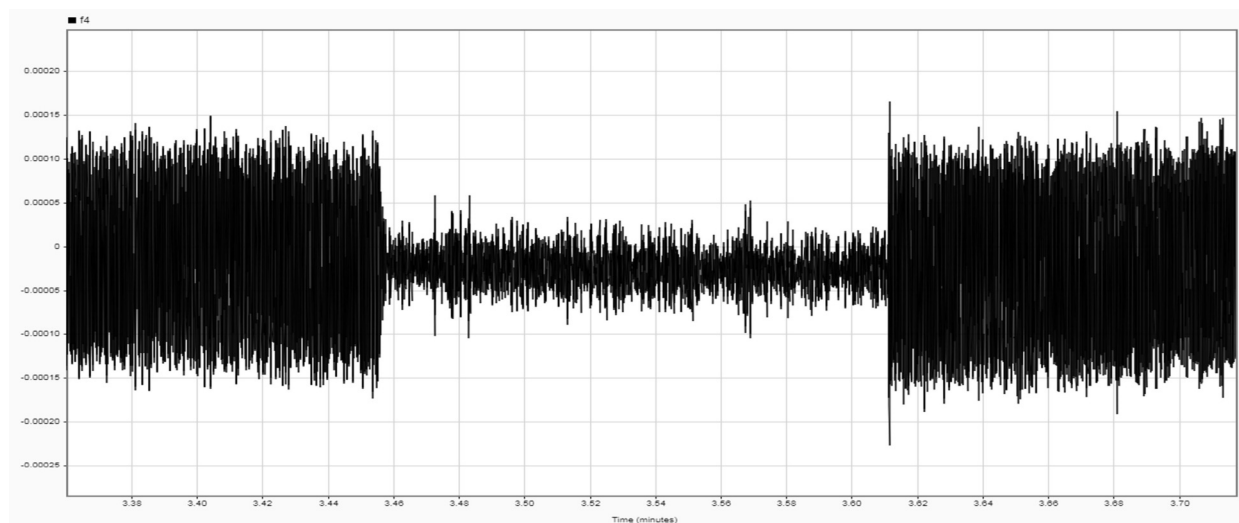


Рис. 4: Выходной сигнал волоконно-оптического акселерометра, зарегистрированный во время работы гидроакустического излучателя на частоте 2000 Гц. Центральная часть соответствует периоду “молчания” гидроакустического излучателя.

Величина гидроакустического давления на расстоянии 1 м от излучателя составляла 200 Па. При такой интенсивности излучателя уровень регистрируемого сигнала в 3 раза превышал уровень шумов (рис. 4). Как видно из рис. 4, амплитуда изменения разности фаз в интерферометре составляет 10^{-4} рад. Так как чувствительность оптомеханического преобразователя на частоте 2000 Гц равна 0.6 рад/(м/с²), амплитуда колебательного ускорения мембраны составила величину $1.7 \cdot 10^{-4}$ м/с². Так как пороговая чувствительность акселерометра в низкочастотном диапазоне на три порядка ниже, то можно получить, при низких частотах порог детектирования, т. е. минимальная измеримая величина гидроакустического давления представленным акселератором, составит 0.2 Па.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 19-12-00323).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] О. Т. Каменев, Ю. С. Петров, Р. В. Хижняк и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **44**(7), 27 (2017).
- [2] O. T. Kamenev, Yu. N. Kulchin, Yu. S. Petrov, et al., Sensors and Actuators A **244**, 133 (2016).
- [3] S. K. Sheem, T. G. Giallorenzi, K. P. Koo, Appl. Opt. **21**, 689 (1982).

- [4] D. A. Brown, C. B. Cameron, R. M. Keolian, et al., Proc. SPIE **1584**, 328 (1991).

Поступила в редакцию 13 декабря 2019 г.

После доработки 25 марта 2020 г.

Принята к публикации 26 марта 2020 г.