

УДК 535.4, 681.7

## РЕГИСТРАЦИЯ ГРАДИЕНТА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

О. Т. Каменев<sup>1,2</sup>, Ю. С. Петров<sup>1</sup>, А. А. Подлесных<sup>2</sup>, В. А. Колчинский<sup>1</sup>,  
И. Н. Завестовская<sup>3,4</sup>, Ю. Н. Кульчин<sup>1,4</sup>, Р. В. Ромашко<sup>1,2</sup>

*Представлены результаты экспериментальных исследований переносной измерительной системы на основе двух инерциальных волоконно-оптических акселерометров, в которых в качестве чувствительного элемента применяется многовитковый оптомеханический преобразователь, размещенный в плече волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера. Пассивная фазовая демодуляция с использованием волоконно-оптического разветвителя  $3 \times 3$  обеспечивает возможность регистрации выходных сигналов интерферометра при наличии температурного дрейфа рабочей точки. Показана возможность регистрации с помощью такой системы градиента акустического и гидроакустического давления.*

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

В работе [1] была продемонстрирована возможность регистрации гидроакустического давления инерциальным акселерометром на основе волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера. Было показано, что при закреплении на поверхности упругой мембраны, взаимодействующей с акустической или гидроакустической волной, акселерометр способен зарегистрировать колебания, вызванные воздействием акустического давления. Такой метод приема гидроакустических сигналов требуется применять, на-

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

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, 690950 Россия, Владивосток, ул. Суханова, 8.

<sup>3</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

<sup>4</sup> НИЯУ «МИФИ», 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

пример, при развертывании систем акустического мониторинга и сейсморазведки на поверхности льда [2, 3] или при размещении акселерометра внутри подводного аппарата, корпус которого является естественным приемником гидроакустических сигналов.

В настоящей работе представлена переносная измерительная система на основе двух инерциальных волоконно-оптических акселерометров, в которых в качестве чувствительного элемента применяется многовитковый оптико-механический преобразователь, размещенный в плече волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Экспериментально показана возможность регистрации с помощью такой системы градиента акустического и гидроакустического давления.

Принципиальная схема построения многовиткового оптико-механического преобразователя на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера представлена в работе [4]. Фазовая демодуляция выходного сигнала акселерометра осуществляется с помощью метода, основанного на применении волоконно-оптического разветвителя  $3 \times 3$  [5], сигналы на выходе трех портов которого сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ . Такой подход избавляет от необходимости контроля положения рабочей точки интерферометра и обеспечивает возможность регистрации слабых сигналов даже в условиях значительных

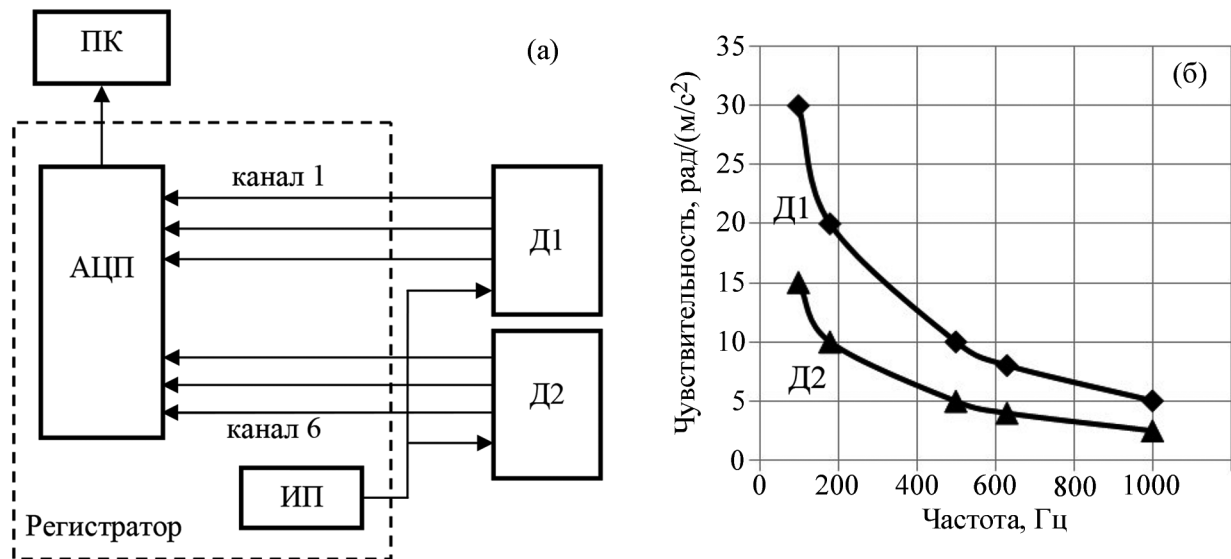


Рис. 1: Блок-схема измерительной системы на основе волоконно-оптических акселерометров (а): ПК – персональный компьютер; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ИП – источник автономного электропитания; Д1, Д2 – волоконно-оптические акселерометры и их АЧХ (б).

внешних воздействий на акселерометр (ветровая нагрузка, акустические воздействия, дрейф температуры и т. д.).

На рис. 1(а) представлена блок-схема измерительной системы.

В состав системы входят два вертикальных инерциальных волоконно-оптических акселерометра, регистратор и персональный компьютер.

Применение пассивной фазовой демодуляции на основе волоконно-оптического разветвителя  $3 \times 3$  требует регистрации трех интерферометрических сигналов, сдвинутых по фазе относительно друг друга на  $2\pi/3$ . Поэтому регистратор осуществляет запись шести сигналов, по три с каждого акселерометра, по которым затем восстанавливается изменение разности фаз  $\Delta\varphi$  сигнальной и опорной волн интерферометра Маха–Цендера [5]. Для разработанных акселерометров это изменение разности фаз оказывается пропорционально ускорению  $a$  поверхности мембраны, на которой закреплен акселерометр [1].

По результатам экспериментальных исследований акселерометров были построены их АЧХ при амплитуде виброускорения  $0.02 \text{ м/с}^2$  (рис. 1(б)). Как видно, чувствительность первого датчика в два раза превышает чувствительность второго. Так как в градиентном приемнике чувствительность пары датчиков должна быть одинаковой, то все полученные значения для датчика Д2 умножались на корректирующий коэффициент  $k$ , равный отношению чувствительностей второго и первого датчиков ( $k = 2$ ). С учетом корректировки, чувствительность акселерометров в диапазоне частот 100–1000 Гц составила 200–1.2 рад·м<sup>-1</sup>с<sup>2</sup>. На частоте, использованной в эксперименте (630 Гц), чувствительность акселерометров составила 8 рад·м<sup>-1</sup>с<sup>2</sup>. Для перевода ускорения в акустическое/гидроакустическое давление был определен коэффициент преобразования, который для представленной измерительной системы составил величину  $8.5 \cdot 10^{-7} \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}/\text{Па}$ . Таким образом, чувствительность измерительной системы к давлению на частоте 630 Гц составила  $6.8 \cdot 10^{-6} \text{ рад/Па}$ .

На первом этапе испытания измерительной системы проводились в воздушной среде. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 2.

Акустический излучатель, широкополосная головка громкоговорителя электродинамического типа ЗГДШ-8, сначала размещался в точке О – на равном расстоянии от центров датчиков (точек С и D), затем в точке А – под датчиком Д1, затем в точке В – под датчиком Д2. Расстояние  $AC = BD = 0.38 \text{ м}$ , расстояние  $AD = BC = 0.57 \text{ м}$ , расстояние  $AB = CD = 0.42 \text{ м}$ .

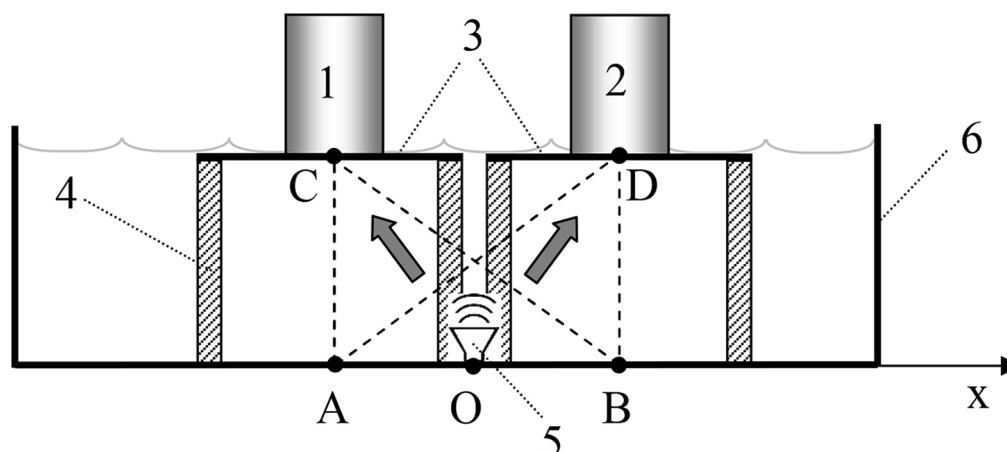


Рис. 2: Схема экспериментальной установки для регистрации градиента акустического поля: 1 – датчик Д1; 2 – датчик Д2; 3 – металлические мембраны; 4 – стойки рамы; 5 – акустический/гидроакустический излучатель; 6 – бассейн (заполнялся водой на втором этапе испытаний).

На рис. 3(а) и 3(в) представлены выходные сигналы датчиков для разных положений излучателя (в т. О и в т. А).

Временной сдвиг между сигналами датчиков Д1 и Д2, равный  $(536 \pm 11)$  мкс, наблюдаемый при размещении излучателя в точках А и В (рис. 3(в) для т. А), соответствует скорости звука в воздухе для температуры  $22^\circ\text{C}$  –  $344.2$  м/с, что полностью согласуется с условиями проведения эксперимента.

На втором этапе испытания измерительной системы проводились в заполненном на 1 м водой бассейне с заглушенными стенками размером  $1.4 \times 2.8$  м<sup>2</sup>. Акустический излучатель имел диаграмму направленности с шириной  $120^\circ$  и обеспечивал в ее центре акустическое давление 1000 Па. Аналогично процедуре, выполненной на первом этапе, излучатель сначала размещался в точке О – на равном расстоянии от датчиков, затем в точке А – под датчиком Д1, затем в точке В – под датчиком Д2. Расстояние  $AC = BD = 0.38$  м, расстояние  $AD = BC = 0.68$  м, расстояние  $CD = 0.56$  м.

На рис. 3(б) и 3(г) представлены выходные сигналы датчиков для разных положений излучателя (в т. О и т. А) при наличии воды в бассейне. Временной сдвиг между сигналами датчиков Д1 и Д2, равный  $(210 \pm 5)$  мкс, наблюдаемый при размещении излучателя в точках А и В (рис. 3(г) для т. А), соответствует скорости звука в воде для температуры  $10^\circ\text{C}$  –  $1447$  м/с, что полностью согласуется с условиями проведения эксперимента.

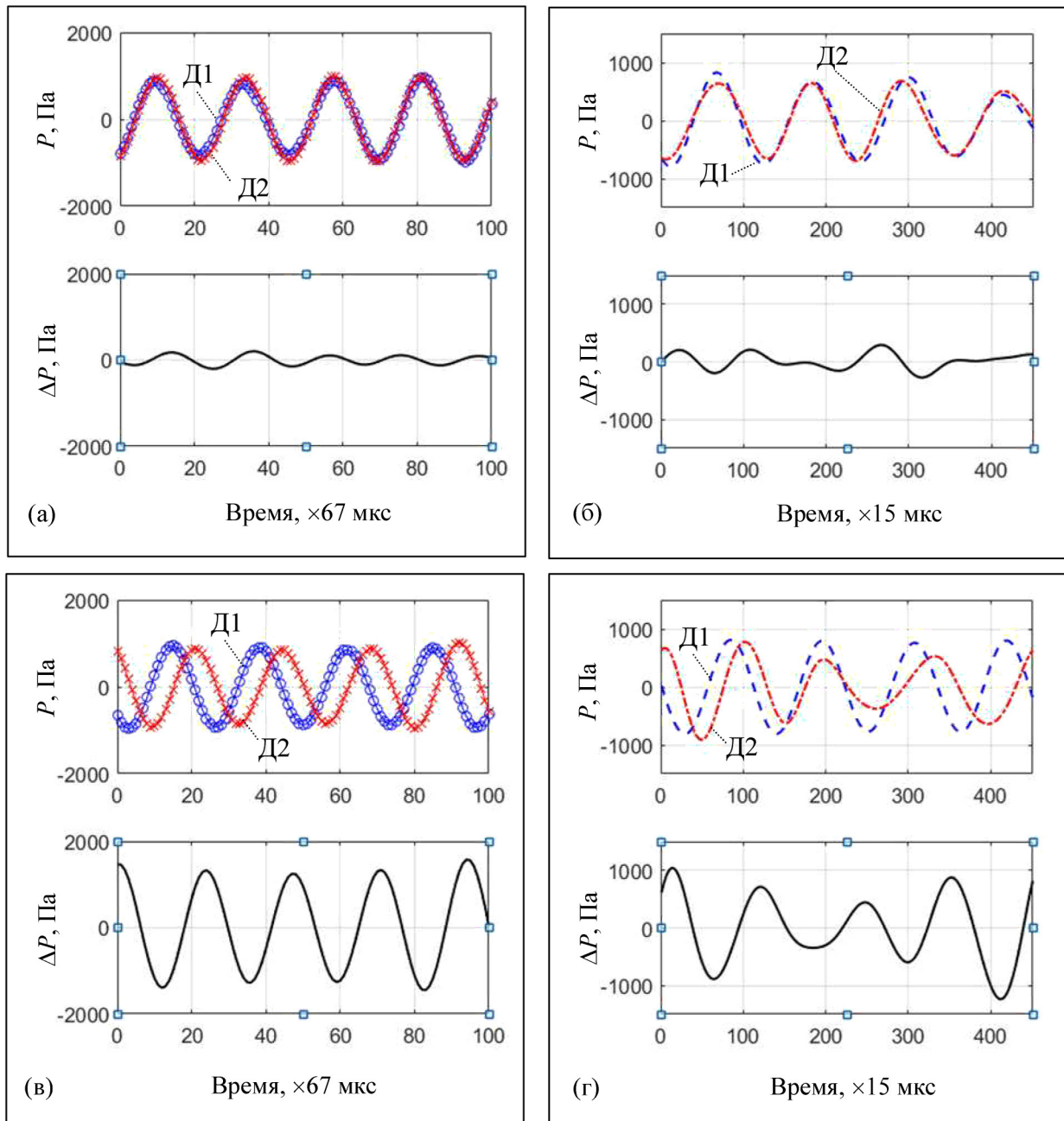


Рис. 3: Выходные сигналы, зарегистрированные двумя датчиками измерительной системы, и их разность для разных положений акустического излучателя: (а), (б) – в точке  $O$ ; (в), (г) – в точке  $A$ , при распространении акустической волны в воздухе (а), (в) и в воде (б), (г).

Данные разности давления  $\Delta P_t$ , представленные на рис. 3, используются для получения проекции градиента акустического давления на ось  $X$ , рассчитываемого как:

$$\nabla P_\omega = |\nabla P_\omega| \exp i\phi_\omega = \frac{F(\Delta P_t)}{\Delta x}, \quad (1)$$

где  $F(\dots)$  – преобразование Фурье;  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота акустического поля,  $\Delta x$  – расстояние между центрами акселерометров (расстояние  $CD$ ).

На рис. 4 показаны значения амплитуды градиента давления  $|\nabla P_\omega|$  и его фазы  $\phi_\omega$ , полученные для разных положений акустического излучателя на оси  $X$ . Как видно, они с высокой степенью точности (в пределах погрешности измерения) совпадают с соответствующими данными, рассчитанными на основе геометрии эксперимента.

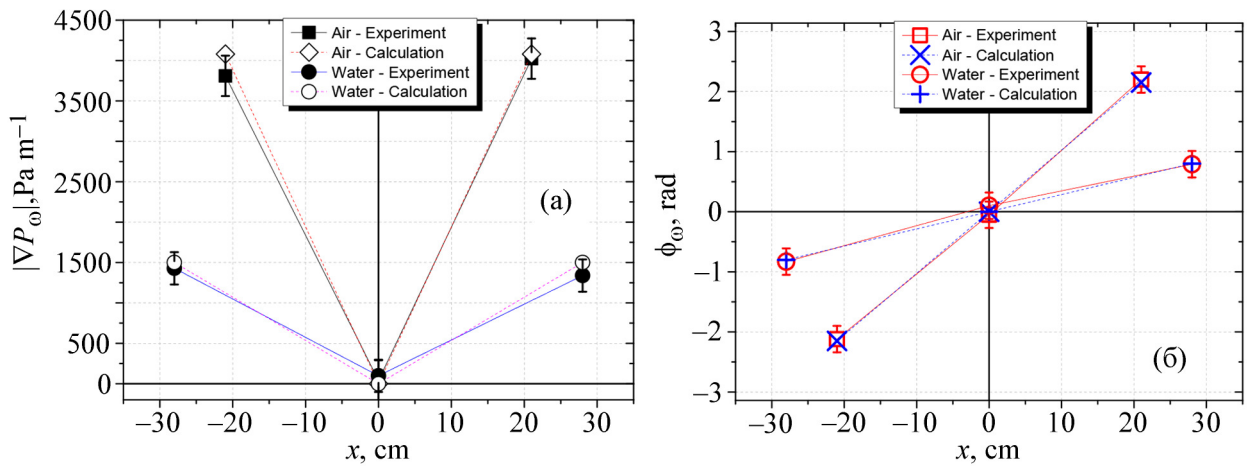


Рис. 4: Значения амплитуды градиента акустического давления (а) и его фазы (б) в зависимости от положения акустического излучателя, полученные с помощью измерительной системы, и рассчитанные исходя из геометрии эксперимента.

Таким образом, в работе предложена и исследована двухканальная измерительная система на основе двух инерциальных волоконно-оптических акселерометров, в которых в качестве чувствительного элемента применяется многовитковый оптико-механический преобразователь, размещенный в плече волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера. Экспериментально продемонстрирована возможность регистрации с помощью такой системы градиента акустического и гидроакустического давления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00323).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] О. Т. Каменев, Ю. С. Петров, А. А. Подлесных и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **47**(5), 30 (2020). DOI: 10.3103/s1068335620050048.
- [2] Ю. Н. Кульчин, С. С. Вознесенский, Е. Л. Гамаюнов и др., Квантовая электроника **50**(5), 475 (2020). DOI:10.1070/QEL17222.
- [3] Ю. Н. Кульчин, О. Т. Каменев, Ю. С. Петров, Известия Российской академии наук. Серия физическая **82**(5), 556 (2018). DOI: 10.3103/S1062873818050192.
- [4] O. T. Kamenev, Yu. N. Kulchin, Yu. S. Petrov, et al., Sensors and Actuators A **244**, 133 (2016). DOI: 10.1016/j.sna.2016.04.006.
- [5] S. K. Sheem, T. G. Giallorenzi, and K. P. Koo, Appl. Opt. **21**, 689 (1982). DOI: 10.1364/AO.21.000689.
- [6] D. A. Brown, C. B. Cameron, R. M. Keolian, et al., Proc. SPIE **1584**, 328 (1991). (10.1117/12.50954).

Поступила в редакцию 14 декабря 2020 г.

После доработки 26 марта 2021 г.

Принята к публикации 29 марта 2021 г.