

УДК 535.4, 681.7

МОБИЛЬНЫЙ АДАПТИВНЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГИДРОФОН

Р. В. Ромашко^{1,2}, М. Н. Безрук¹, С. А. Ермолаев¹,
И. Н. Завестовская^{3,4}, Ю. Н. Кульчин^{1,4}

Разработан мобильный адаптивный голографический лазерный гидрофон на основе динамической голограммы, формируемой в фоторефрактивном кристалле. Гидрофон обладает чувствительностью до -163 дБ (отн. 1 В/мкПа) или $8.6 \cdot 10^{-3}$ рад/Па в диапазоне частот $1-15$ кГц. Проведены натурные испытания гидрофона в акватории морской бухты, результаты которых подтвердили эффективность применения измерительных систем на основе адаптивных голографических интерферометров для решения задач регистрации слабых сигналов (акустических, гидроакустических и пр.) во внелабораторных условиях.

Ключевые слова: лазерный гидрофон, адаптивный интерферометр, динамическая голограмма, акустическое давление.

Современные оптические гидрофоны находят все большее применение при решении практических задач, поскольку обладают рядом преимуществ по сравнению с пьезоэлектрическими гидрофонами, такими как чувствительные элементы, выполненные из химически инертных материалов (не подверженных коррозии), невосприимчивость к электрическим помехам, малые габаритные размеры и др. [1–3]. При этом использование интерферометрических принципов при построении оптических гидрофонов открывает перспективы детектирования сверхслабых гидроакустических сигналов [4, 5]. Однако при эксплуатации интерферометрических гидрофонов в реальных условиях

¹ Институт автоматики 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 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

случайные механические воздействия, изменение температуры воды, вариации гидростатического давления и пр., приводят к дрейфу рабочей точки интерферометра и, как следствие, к ухудшению соотношения сигнал/шум и снижению чувствительности измерительной системы. Это обуславливает необходимость использования в лазерных гидрофонах специальных средств стабилизации, в частности, дополнительных компенсационных интерферометров [6], методов активного и пассивного контроля фазы [7–10], методов, основанных на использовании перестраиваемых дифракционных решеток [11], и др. Однако применение подобных методов приводит к существенному усложнению схемы интерферометрической измерительной системы, что негативным образом сказывается как на её надежности, так и функциональности. Кроме того, при создании систем, предназначенных для работы во внелабораторных условиях (в частности, гидрофоны), применение подобных методов оказывается крайне затруднено или вовсе исключено.

Вместе с тем, использование в лазерных интерферометрах динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивных кристаллах (ФРК), позволяет достаточно просто и эффективно решить проблему стабилизации рабочей точки измерительных лазерных интерферометров [12]. Адаптивность к неконтролируемым внешним воздействиям в таких системах основана на том, что постоянная перезапись динамической голограммы в ФРК позволяет интерферометру автоматически подстраиваться под изменение внешних условий, тем самым обеспечивая стабильность его рабочих характеристик.

На основе вышеизложенного принципа в работах [13–15] предложены схемы и созданы прототипы лазерных адаптивных голографических гидрофонов с применением динамических фоторефрактивных голограмм. Однако исследование их работы выполнено лишь в лабораторных условиях. В настоящей работе создан мобильный адаптивный голографический лазерный гидрофон (МАЛГ) и проведены полевые экспериментальные исследования его работы в реальных условиях морской акватории.

На рис. 1(а) представлена схема разработанного мобильного лазерного адаптивного гидрофона. МАЛГ состоит из двух переносных модулей, имеющих разъемы для коммутации между собой. Первый модуль – лазерный – содержит в себе Nd:YAG лазер ($\lambda = 1.06$ мкм, выходная мощность 0.5 Вт), драйвер лазера и блок питания фотодетектора, а также систему ввода лазерного излучения в многомодовый волоконно-оптический световод, по которому излучение от лазера подводится ко второму модулю. На боковой стенке корпуса модуля имеется разъем для подключения внешнего источника автономного электропитания.

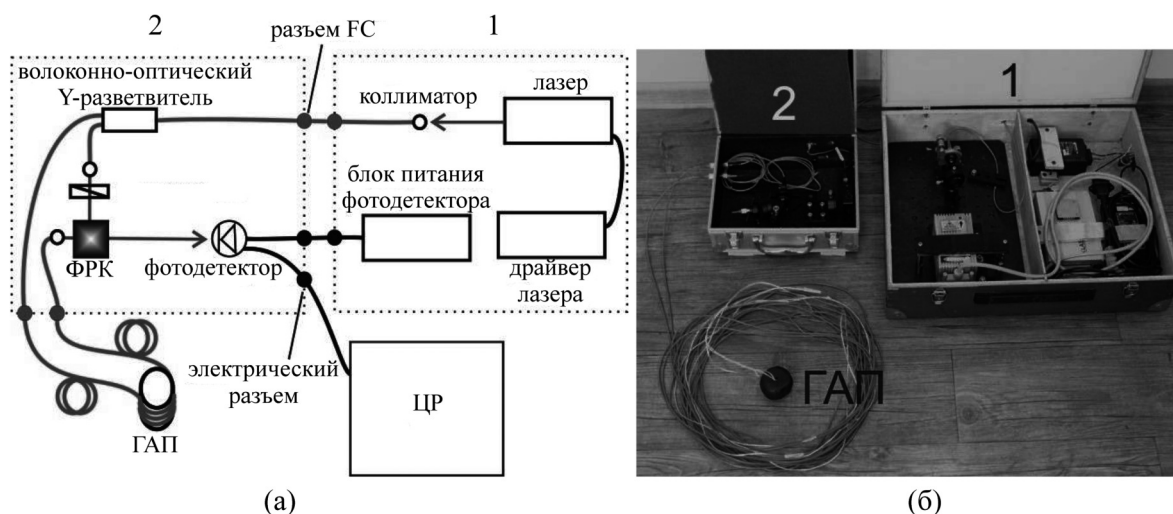


Рис. 1: Схема (а) и внешний вид (б) мобильного адаптивного лазерного гидрофона. 1 – лазерный модуль, 2 – интерферометрический модуль, ГАП – волоконно-оптический гидроакустический приемник, ЦР – цифровой регистратор, ФРК – фоторефрактивный кристалл.

Второй модуль – интерферометрический – содержит адаптивный интерферометр и фотодетектор. В схеме адаптивного интерферометра использована ортогональная геометрия записи динамической голограммы, в рамках которой объектная и опорная волны распространяются в ФРК вдоль основных кристаллографических осей. С помощью волоконного световода излучение от лазерного модуля (1) подводится к интерферометрическому модулю (2), в котором посредством волоконно-оптического Y-разветвителя разделяется на два световых пучка – опорный и объектный. Опорный пучок (интенсивность 50 мВт/мм^2) через поляризатор направляется в фоторефрактивный кристалл CdTe вдоль его основной кристаллографической оси [100]. В свою очередь, объектный пучок направляется в волоконно-оптический приемник гидроакустических сигналов (ГАП) катушечного типа, подключенный к интерферометрическому блоку посредством волоконно-оптических разъемов типа FC. После прохождения через ГАП объектная волна, предварительно ослабленная с помощью нейтрального светофильтра до интенсивности 0.8 мВт/мм^2 , направляется в ФРК вдоль кристаллографической оси [001], ортогонально опорной волне. Интерференция опорной и объектной волн в ФРК приводит к формированию в нем динамической голограммы, при этом ослабление объектной волны позволяет добиться оптимального соотношения интенсивностей взаимодействующих волн, при которых достигается ее максимальная дифракционная эффективность

[16]. Используемая геометрия формирования динамической голограммы поддерживает дифракцию волн на образовавшейся в фоторефрактивном кристалле решетке недиагональных элементов ε_{ij} . Как следствие, векторное взаимодействие линейно поляризованной опорной волны с деполяризованной объектной волной в ортогональной геометрии в ФРК кубической симметрии в условиях “анизотропной дифракции”, т.е. дифракции на решетке $\delta\varepsilon_{ij}$, обеспечивает выполнение квадратурных условий работы интерферометра, вследствие чего достигается его высокая чувствительность [17, 18].

Конструкция волоконно-оптического гидроакустического приемника содержит основание цилиндрической формы высотой 5 см и диаметром 3.5 см, выполненное из экструзионного пенополистирола, на которое в пять слоев уложено 20 м многомодового волоконного световода (диаметр сердцевины 62.5 мкм, $NA = 0.22$) в полимерной оболочке. При этом каждый слой волоконных световодов фиксировался упругой прорезиненной лентой толщиной 1 мм [14]. В центре основания ГАП располагался свинцовый груз, обеспечивающий отрицательную плавучесть приемника. Погружение ГАП под воду осуществлялось при помощи прочного гибкого шпагата, на котором также фиксировались подводящий и отводящий волоконные световоды.

Перед проведением полевых испытаний работа МАЛГ была исследована в лабораторных условиях с целью определения его рабочих параметров. Амплитудно-частотная характеристика МАЛГ представлена на рис. 2. Как видно из АЧХ, наибольшая чувствительность мобильного адаптивного голографического лазерного гидрофона приходится на диапазон частот от 1 до 15 кГц, при этом максимальная чувствительность достигается на частоте 5 кГц, составляя -163 дБ (отн. 1В/мкПа) или $8.6 \cdot 10^{-3}$ рад/Па. Динамический диапазон измерения акустического давления составил 10.3 дБ.

В работе выполнены полевые испытания мобильного адаптивного лазерного гидрофона в условиях реальной морской акватории при температуре окружающей среды -3 °С, температуре воды 1 °С, ветре 13 м/с и среднем волнении. Изображение оборудования на причальной стенке акватории показано на рис. 3. Пьезоэлектрическим излучателем ЛУЗ.837.928, погруженным на глубину 1 м, в акватории создавалось гидроакустическое поле на частоте 5 кГц. На расстоянии 15 метров от излучателя на такой же глубине размещался ГАП. Для контроля давления в области расположения приемника использовался калиброванный пьезоэлектрический гидрофон ZETLAB BC 311.

Полевые испытания проводились в течение 45 мин. На рис. 4(а) и 4(б) представлен выходной сигнал МАЛГ на временной базе 1 мин и 2 мс соответственно. Из рис. 4(а) видно, что постоянная составляющая регистрируемого сигнала содержит низкочастот-

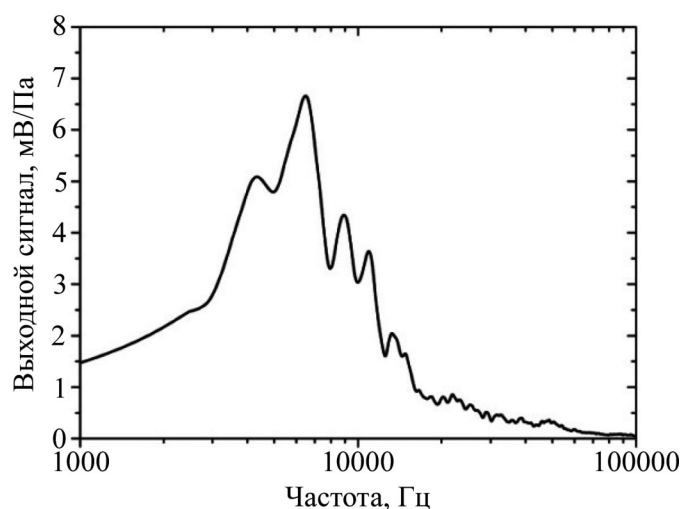


Рис. 2: Амплитудно-частотная характеристика МАЛГ.

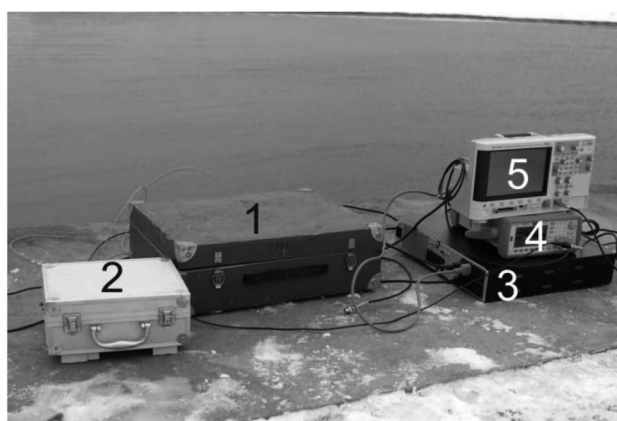


Рис. 3: МАЛГ, установленный на причальной стенке акватории, во время полевых испытаний. 1 — лазерный модуль, 2 — интерферометрический модуль, 3 — внешний источник автономного электропитания, 4 — генератор, применяемый для формирования гидроакустического поля, 5 — осциллограф.

ные флуктуации с периодом около 6.5 с. Эти флуктуации вызваны волнами на водной поверхности, воздействие которых на волоконно-оптический гидроакустический приемник приводило к амплитудной модуляции прошедшего через него излучения. Несмотря на то, что амплитуда флуктуаций постоянной составляющей достигала 90% от величины регистрируемого сигнала, на фоне столь сильных изменений наблюдается устойчивый переменный сигнал на частоте генерации гидроакустического поля в акватории (5 кГц), флуктуация которого не превышала 5% (рис. 4(б)). Устойчивое детектирова-

ние достигается за счет адаптивных свойств динамической голограммы, время записи которой в кристалле CdTe составило 10 мс, что намного меньше периода волнения. Это позволило компенсировать все фазовые флуктуации световой волны, вызванные волнением, амплитудные же остались некомпенсированными. Однако это не снизило метрологические характеристики гидрофона. На рис. 5 представлен спектр выходного сигнала МАЛГ, из которого видно, что тестовый гидроакустический сигнал на частоте 5 кГц регистрируется с хорошим отношением сигнал/шум $SNR = 26$ дБ, не снижаемым наличием в сигнале низкочастотных флуктуаций постоянной составляющей на частоте волнения (0.16 Гц).

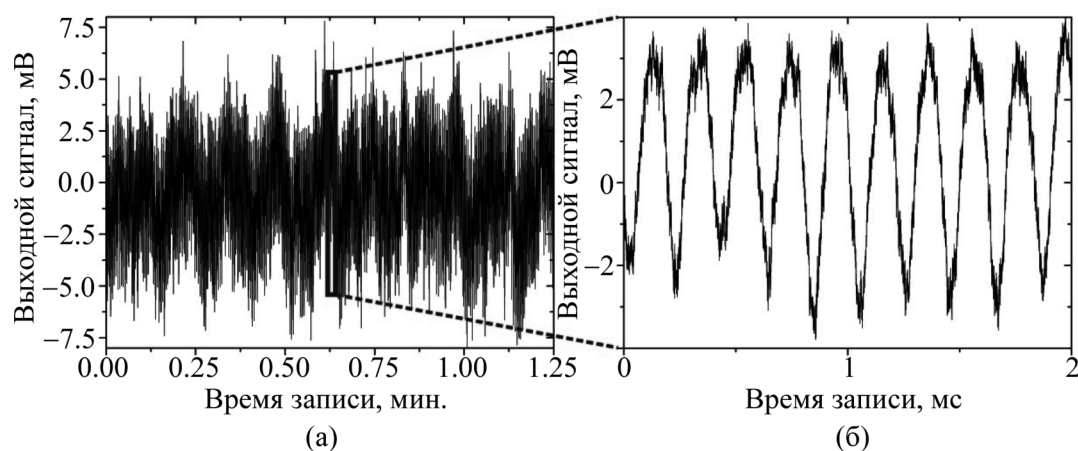


Рис. 4: Выходной сигнал МАЛГ на частоте 5 кГц на временной базе измерений 1 мин (а) и 2 мс (б).

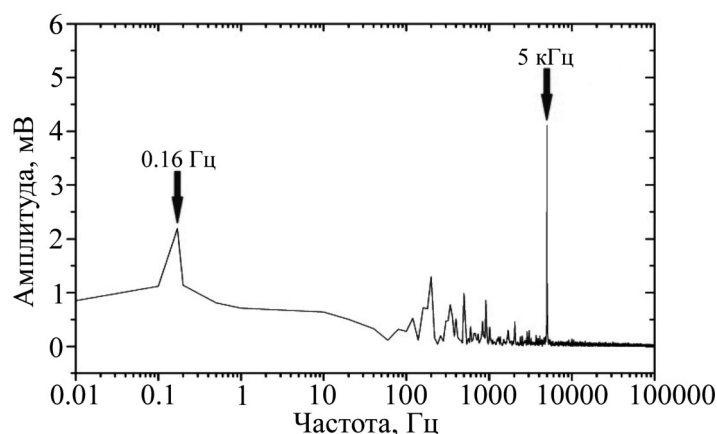


Рис. 5: Спектр выходного сигнала МАЛГ.

Следует отметить, что во время проведения исследований мощность излучателя была установлена таким образом, что уровень акустического давления в окрестности расположения ГАП составил 41 Па – предел детектирования эталонного пьезоэлектрического гидрофона ZETLAB BC311. При этом МАЛГ, как показано выше, обеспечивал устойчивое детектирование акустического сигнала. Учитывая значение отношения сигнал/шум $SNR = 26$ дБ, можно получить значение акустического давления, минимально детектируемое с помощью МАЛГ, которое составило 2 Па.

Максимальная длительность автономной работы мобильного адаптивного голографического лазерного гидрофона с внешним источником автономного электропитания мощностью 1500 ВА составила 3 часа. Срок автономной работы МАЛГ может быть увеличен без изменения мощности электропитания за счет использования менее мощного лазера при оптимальном подборе параметров световых пучков, взаимодействующих в фоторефрактивном кристалле.

Таким образом, в настоящей работе создан и исследован мобильный адаптивный голографический лазерный гидрофон, обеспечивающий чувствительность к акустическому давлению до -163 дБ (отн. 1В/мкПа) или $8.6 \cdot 10^{-3}$ рад/Па в диапазоне частот 1–15 кГц. Проведены полевые испытания гидрофона в акватории морской бухты, результаты которых подтвердили эффективность применения измерительных систем на основе адаптивных голографических интерферометров для решения задач регистрации слабых сигналов (акустических, гидроакустических и пр.) во внелабораторных условиях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14–12–01122).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. A. Bucaro, H. D. Dardy, and E. F. Carome, *The Journal of the Acoustical Society of America* **62**(5), 1302 (1977).
- [2] F. El-Hawary, *The Ocean Engineering Handbook* (CRC Press, New York, London, 2000).
- [3] J. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, *Sensors* **12**(4), 4793 (2012).
- [4] H. B. Lee, Y. H. Kim, K. S. Park, et al., *Sensors* **12**, 2467 (2012).

- [5] T. K. Lim, Y. Zhou, Y. Lin, et al., *Opt. Comm.* **159**(4), 301 (1999).
- [6] P. Morris, A. Hurrell, and P. Beard, *Proc. of the Institute of Acoustics* **28**, 717 (2006).
- [7] Г. И. Долгих, С. С. Будрин, С. Г. Долгих и др., *Подводные исследования и робототехника* **1**, 40 (2007).
- [8] J. Staudenraus and W. Eisenmenger, *Ultrasonics* **31**(4), 267 (1993).
- [9] A. A. Freschi and J. Frejlich, *Opt. Lett.* **20**, 635 (1995).
- [10] C. H. Shi, J. P. Chen, G. L. Wu, et al., *Optics Express* **14**(12), 5098 (2006).
- [11] O. Karhade, L. Degertekin, and T. Kurfess, *Opt. Lett.* **34**(19), 3044 (2009).
- [12] A. A. Kamshilin and M. P. Petrov, *Opt. Comm.* **53**, 23 (1985).
- [13] Р. В. Ромашко, М. Н. Безрук, С. А. Ермолаев и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **42**(7), 14 (2015).
- [14] Р. В. Ромашко, Ю. Н. Кульчин, М. Н. Безрук, С. А. Ермолаев, *Квантовая электроника* **46**(3), 277 (2016).
- [15] M. N. Bezruk, S. A. Ermolaev, Yu. N. Kulchin, and R. V. Romashko, *Proceedings of SPIE* **10176**, 1017614 (2016).
- [16] S. Di Girolamo, A. A. Kamshilin, R. V. Romashko, et al., *Optics Express* **15**(2), 545 (2007).
- [17] S. Di Girolamo, R. V. Romashko, Yu. N. Kulchin, and A. A. Kamshilin, *Optics Communications* **283**(1), 128 (2010).
- [18] R. V. Romashko, S. Di Girolamo, Yu. N. Kulchin, and A. A. Kamshilin, *JOSA B* **27**(2), 311 (2010).

Поступила в редакцию 12 декабря 2016 г.