

УДК 535.4, 681.7

ЛАЗЕРНЫЙ АДАПТИВНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИДРОФОН

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

Предложена и исследована схема реализации адаптивного волоконно-оптического лазерного гидрофона, чувствительным элементом которого является волоконно-оптический сенсор мембранного типа. Фазовая демодуляция сигнала сенсора осуществляется с помощью адаптивного голографического интерферометра, ключевым элементом которого является динамическая голограмма, формируемая в фоторефрактивном кристалле CdTe. Гидрофон отличается высокой помехозащищённостью и высокой чувствительностью (-117 дБ отн. 1 В/мкПа на частоте 4.9 кГц), обеспечивающая устойчивое детектирование гидроакустических сигналов со звуковым давлением от 31 дБ (отн. 20 мкПа) в динамическом диапазоне до 42 дБ на частоте 9.6 кГц.

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

На протяжении многих лет в мире ведутся активные исследования, направленные на создание систем мониторинга мирового океана. Такого рода разработки замыкаются на создание эффективных систем регистрации (обычно чрезвычайно слабых) гидроакустических сигналов. При этом в основе большинства известных гидроакустических приёмников лежат пьезоэлектрические (ПЭ) преобразователи [1], к достоинству которых следует отнести достаточно высокую технологичность при их изготовлении, отно-

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 Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

нительно невысокую стоимость, доступность пьезоэлектрических материалов. Вместе с тем ПЭ преобразователи обладают рядом недостатков, которые затрудняют, а в ряде случаев делают невозможным их практическое применение. Такими недостатками являются подверженность ПЭ сенсоров влиянию электромагнитных помех, что обусловлено электрической природой первичного сигнала, а также необходимость использования электрических кабелей для передачи сигналов, что особенно отрицательно сказывается при создании гидроакустических приемников, предназначенных для работы на больших глубинах и больших площадях. Кроме того, чувствительность ПЭ преобразователей имеет резонансный характер, что ограничивает рабочий диапазон частот измерительной системы на их основе. Подверженность металлических деталей ПЭ сенсоров коррозии при работе в агрессивной среде (морская вода, повышенная влажность и пр.) требует применения специальных защитных покрытий, эффективность которых снижается при больших гидростатических давлениях.

В то же время успешно развиваются неэлектрические системы гидрофонов. В частности, значительное развитие получили волоконно-оптические приемники гидроакустических сигналов [2, 3]. Это обусловлено тем, что оптическое волокно, используемое в качестве чувствительного элемента, не восприимчиво к электромагнитным помехам, имеет малый удельный вес и размеры, а также химически инертно. Кроме того, применение волоконных световодов позволяет создавать на их основе широкополосные приемники акустических колебаний. При этом использование интерферометрических принципов при построении волоконно-оптических гидрофонов открывает перспективы детектирования сверхслабых гидроакустических сигналов [4]. Вместе с тем интерферометрические системы в силу их высокой чувствительности оказываются в значительной степени подверженными влиянию внешних шумовых факторов (случайные механические воздействия, дрейф температуры, давления и пр.), что на практике в большинстве случаев нивелирует достоинства интерферометрических систем. Одно из возможных решений указанной проблемы заключается в использовании адаптивного голографического интерферометра, световые пучки в котором объединяются с помощью динамической голограммы, формируемой в фоторефрактивном кристалле (ФРК) [5]. Использование динамических голограмм позволяет демодулировать фазовые изменения сигнала интерферометра, обеспечивая при этом высокую стабильность его работы. Адаптивные интерферометры успешно находят свое применение в различных прикладных задачах [6–8]. В работе [9] на основе адаптивного интерферометра реализован высокочувствительный микрофон.

В настоящей работе представлен волоконно-оптический гидрофон на основе адаптивного голографического интерферометра. Проведены экспериментальные исследования разработанного адаптивного гидрофона и определены его основные характеристики.

Схема экспериментальной установки для тестирования адаптивного волоконно-оптического гидрофона представлена на рис. 1.

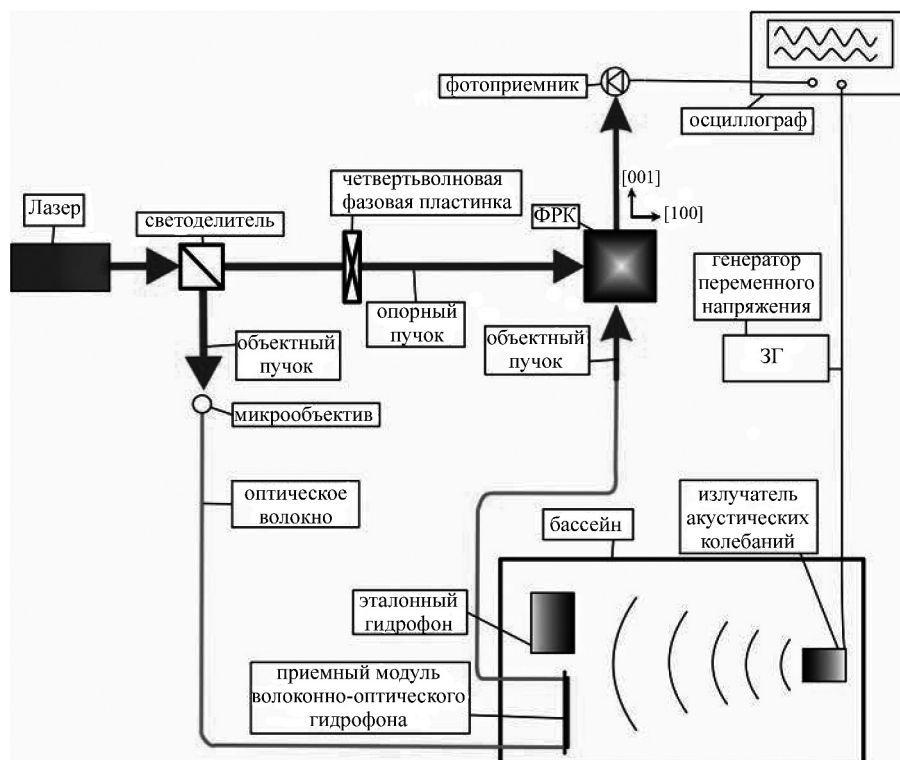


Рис. 1: Схема адаптивного волоконно-оптического гидрофона.

Излучение Nd:YAG лазера (1064 нм, 500 мВт) делится при помощи светоделителя на объектный и опорный световые пучки. Опорный пучок, эллиптически поляризованный при помощи четвертьволновой пластинки, направляется в кристалл CdTe вдоль оси [100]. В свою очередь, объектный пучок вводится посредством микрообъектива в кварцевый многомодовый волоконный световод (диаметр сердцевины 62.5 мкм). Чувствительная часть световода длиной 10 м, очищенная от защитной оболочки, уложена витками (50 витков) и закреплена на полиэтиленовой мембране толщиной 0.1 мм, которая, в свою очередь, закрепляется на металлическом каркасе размером 12×12 см² (рис. 2). Мембрана в совокупности с чувствительной частью световода представляет

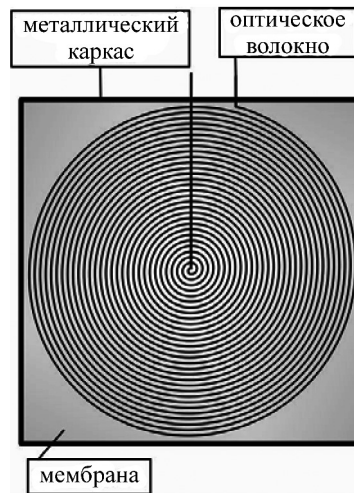


Рис. 2: Приемный модуль адаптивного волоконно-оптического гидрофона.

собой приемный модуль адаптивного гидрофона. В результате воздействия акустической волны на волоконный световод возникает фазовая модуляция проходящего в нем излучения. Фазомодулированный объектный пучок, полученный на выходе световода, направляется в ФРК вдоль его основной кристаллографической оси [001] перпендикулярно направлению распространения опорного пучка. Интерференция объектного и опорного пучков в ФРК приводит к формированию в нем динамической голограммы, дифракция на которой обеспечивает преобразование модуляции фазы объектного пучка в изменение его интенсивности, регистрируемое фотодетектором.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования разработанного адаптивного гидрофона, в ходе которых определены его основные характеристики. В качестве испытательного стенда использован заполненный на две трети водой бассейн с размерами $100 \times 50 \times 52$ см³. Источником акустических волн служил калиброванный ПЭ излучатель ЛУЗ.837.928. Излучатель и приемный модуль располагались в бассейне на одной глубине у противоположных стенок на расстоянии 80 см друг от друга (рис. 1). Генерация акустической волны осуществлялась на резонансных частотах излучателя 4.9 и 9.6 кГц. Рядом с приемным модулем адаптивного гидрофона располагался эталонный пьезоэлектрический гидрофон, с помощью которого определялось акустическое давление в месте расположения гидрофонов.

Экспериментальная зависимость выходного сигнала адаптивного гидрофона от величины акустического давления представлена на рис. 3.

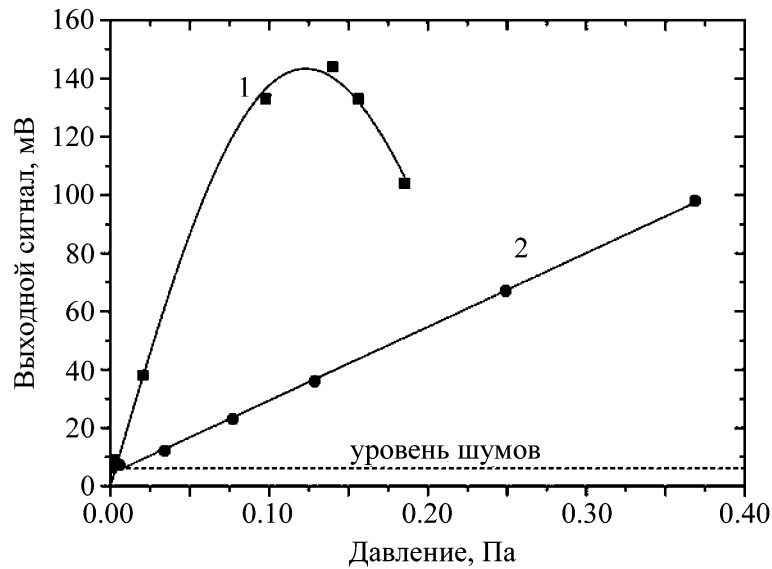


Рис. 3: Экспериментальная зависимость выходного сигнала адаптивного гидрофона от величины акустического давления на разных частотах. 1 – 4.9 кГц; 2 – 9.6 кГц.

Чувствительность адаптивного волоконно-оптического гидрофона (в дБ отн. 1 В/мкПа) на линейном участке представленных на рис. 3 зависимостей найдена в соответствии с выражением:

$$S = 20 \lg \left(\frac{\Delta U}{\Delta P} \sigma^{-1} \right), \quad (1)$$

где ΔU – величина изменения выходного сигнала адаптивного гидрофона, вызванного приращением акустического давления ΔP ; $\sigma = 1$ В/мкПа – эталонный уровень чувствительности. Таким образом, чувствительность адаптивного гидрофона на частотах 4.9 и 9.6 кГц составила –117 дБ и –132 дБ (отн. 1В/мкПа), соответственно.

Данные, представленные на рис. 3, позволили определить минимальное детектируемое акустическое давление P_{\min} , при котором выходной сигнал адаптивного гидрофона находится на уровне шумов. На частотах 4.9 и 9.6 кГц P_{\min} составило 0.77 и 5.6 мПа (или 31 и 48.9 дБ отн. уровня 20 мкПа), соответственно.

Максимальное значение акустического давления, которое может быть измерено с помощью адаптивного голографического гидрофона, определяется нелинейным характером переходной зависимости (рис. 3), в основе которой лежит зависимость изменения интенсивности от разности фаз интерферирующих пучков. Определив максимальное значение акустического давления P_{\max} в пределах линейного участка переходной зависимости, найдем динамический диапазон D измерения акустического давления с

помощью адаптивного голографического гидрофона с помощью выражения:

$$D = 20 \lg \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right). \quad (2)$$

Для частот 4.9 и 9.6 кГц динамический диапазон измерения акустического давления составил 36.3 и 42 дБ, соответственно.

На рис. 4 представлена диаграмма направленности разработанного адаптивного гидрофона, полученная на частоте 4.9 кГц. Как видно, чувствительность гидрофона имеет анизотропный характер – диаграмма направленности имеет два выраженных максимума при 0° и 180° , при этом за 0° взято положение приемного модуля, при котором плоскость мембраны направлена по нормали к фронту акустической волны. При повороте приемного модуля на 90° относительно фронта акустических волн сигнал уменьшается более чем в 2 раза.

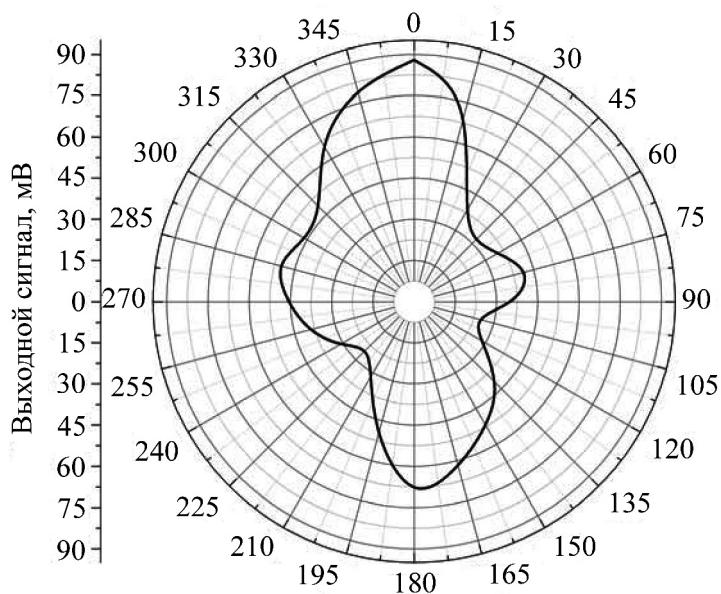


Рис. 4: Диаграмма направленности адаптивного волоконно-оптического гидрофона на частоте 4.9 кГц.

Сравнение параметров разработанного гидрофона с существующими аналогами представлено в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Параметры гидрофонов

Тип гидрофона	Частота акустической волны, Гц	Пороговое звуковое давление, дБ отн. 20 мкПа	Динам. диапазон, дБ	Чувствительность, дБ отн. 1 В/мкПа	Ссылка
Пьезо-электрический 1П1	–	–	–	–189	[10]
Пьезо-электрический ГИ50Э в составе ГУ 21	80	60	73	–152	[10]
Пьезо-электрический ГИ54 в составе ГУ 21	80	60	94	–148	[10]
Пьезо-электрический ВС312	–	–	–	–192	[11]
Волоконно-оптический гидрофон	–	–	–	–180	[3]
Адаптивный гидрофон	4900	31	36.3	–117	Настоящая работа
	9600	48.9	42	–132	

Таким образом, в настоящей работе представлен адаптивный волоконно-оптический гидрофон. Чувствительным элементом разработанного адаптивного гидрофона является волоконно-оптический сенсор мембранного типа. Фазовая демодуляция сигнала сенсора осуществляется с помощью адаптивного голографического интерферометра. Разработанный гидрофон обладает высокой чувствительностью за счет применения интерферометрических принципов детектирования сигнала и, в то же время, высокой помехозащищенностью за счет использования динамических голограмм, делающих интерферометр адаптивным. Проведены экспериментальные исследования адаптивного гидрофона, в ходе которых определены его характеристики. Наибольшую чувствитель-

ность, которая составила -117 дБ отн. 1 В/мкПа, гидрофон проявил на частоте 4.9 кГц. Динамический диапазон составил 36.3 дБ, а минимальное детектируемое звуковое давление 31 дБ отн. 20 мкПа. Следует отметить, что помимо высокой чувствительности гидрофон в силу адаптивных свойств обладает высокой помехозащищенностью, что делает его перспективным для решения задач, связанных с регистрацией слабых акустических сигналов в условиях высокой зашумленности и изменения внешних условий.

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

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Г. М. Свердлин, *Прикладная гидроакустика* (Ленинград, Судостроение, 1990).
- [2] В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов, *Волоконно-оптические датчики* (М., Энергоатомиздат, 1990).
- [3] J. A. Bucaro, H. D. Dardy, E. F. Carome, *The Journal of the Acoustical Society of America* **62**(5), 1302 (1977).
- [4] J. W. Wagner, J. Spicer, *J. Opt. Soc. Am.* В **4**, 1316 (1987).
- [5] S. I. Stepanov, *International Trends in Optics* (New York, Academic, 1991).
- [6] М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко, *Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике* (С.-Пб, Наука, 1992).
- [7] L. Solymar, D. J. Webb, A. Grunnet-Jepsen, *The physics and applications of photorefractive materials* (Oxford University Press, 1996).
- [8] A. A. Kamshilin, R. V. Romashko, Y. N. Kulchin, *Journal of Applied Physics* **105**, 031101 (2009).
- [9] R. V. Romashko, Y. N. Kulchin, E. Nippolainen, *Laser Physics* **24**, 115604 (2014).
- [10] Центр комплектации «СпецТехноРесурс». Каталог «гидроакустические СИ» – URL: <http://td-str.ru/tbl.aspx?categ=78>.
- [11] Предприятие «Электронные технологии и метрологические системы» (ZETLAB). Каталог «Датчики давления воды, гидрофоны» – URL: <http://zetlab.cl121865.tmweb.ru/goods/gidrofony/gidrofon-pogruzhnoy-vs-312/>

Поступила в редакцию 25 мая 2015 г.