

УДК 535.41

Р.В. Ромашко, М.Н. Безрук, С.А. Ермолаев

Адаптивный гидрофон с использованием различных модификаций волоконно-оптических сенсоров

Исследован гидрофон на основе адаптивного голограммического интерферометра с использованием трех модификаций волоконно-оптических сенсоров и определены его характеристики.

Ключевые слова: лазерный гидрофон, адаптивный интерферометр, волоконный световод.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-46-48

Современные лазерные интерферометрические гидрофоны позволяют измерять чрезвычайно слабые гидроакустические возмущения, что способствует их активному развитию и применению [1–4]. В качестве чувствительных элементов лазерных гидрофонов обычно используются волоконно-оптические сенсоры [4, 5] или резонансные элементы в виде упругих мембран [6–8]. При эксплуатации таких гидрофонов в реальных условиях случайные механические воздействия, дрейф температуры, вариации статического давления окружающей среды и пр. могут приводить к дрейфу рабочей точки интерферометра и, как следствие, к ухудшению соотношения сигнал/шум и снижению чувствительности измерительной системы. Это обуславливает необходимость использования в интерферометрических гидрофонах специальных средств стабилизации рабочей точки. В то же время применение динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивных кристаллах (ФРК), позволяет достаточно просто и эффективно решить проблему стабилизации рабочей точки измерительных лазерных интерферометров [9].

Применение волоконных световодов в качестве чувствительных элементов обусловлено преимуществами оптоволокна по сравнению с его электрическими аналогами – невосприимчивостью к электромагнитным помехам, способностью работать в агрессивных средах, а также его высокая чувствительность. Вместе с тем использование волоконных световодов значительно упрощает оптическую схему гидрофона.

В данной работе представлено экспериментальное исследование работы адаптивного голограммического гидрофона с использованием трех модификаций волоконно-оптических (ВО) сенсоров.

Ключевым элементом лазерного гидрофона является адаптивный интерферометр на основе динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии (CdTe). Непрерывная перезапись динамических голограмм в ФРК позволяет избежать влияния медленных физических процессов, таких как случайные механические воздействия, дрейф температуры, вариации статического давления окружающей среды и пр., что позволяет эффективно стабилизировать рабочую точку интерферометра.

Чувствительным элементом лазерного гидрофона является ВО сенсор, выполненный в виде основания цилиндрической формы ($3,5 \times 5 \text{ см}^2$), на которое намотан многомодовый волоконный световод (диаметр сердцевины 62,5 мкм). Световод оконцована оптическими разъемами типа FC для подключения сенсора к адаптивному голограммическому интерферометру.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Экспериментальные исследования проводились в бассейне размером $300 \times 100 \times 50 \text{ см}^3$, стени которого выполнены из звукоглощающего материала. Для контроля акустического давления в непосредственной близости от волоконно-оптического сенсора размещался калибранный эталонный пьезоэлектрический гидрофон BC311, являющийся частью системы поверки гидрофонов ZETLAB, использованной в экспериментальных исследованиях. Акустическое давление в бассейне создавалось пьезоэлектрическим излучателем, на который подавалось синусоидальное напряжение. Излучатель располагался на одной глубине с приемным модулем адаптивного лазерного гидрофона и эталонным гидрофоном на равном расстоянии от них (20 см).

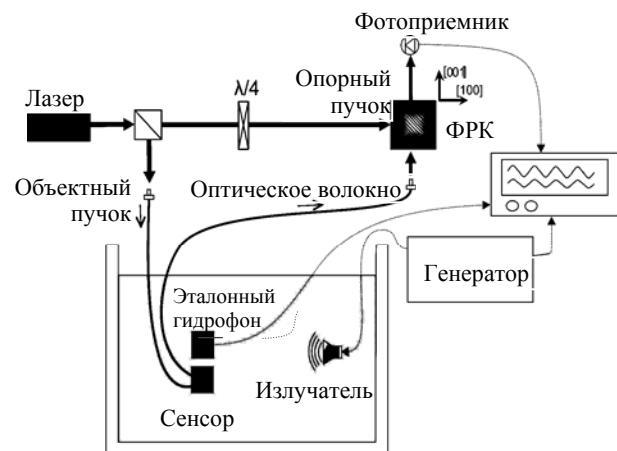


Рис. 1. Схема адаптивного лазерного гидрофона

Волоконно-оптический катушечный сенсор № 1 (рис. 2) представляет собой основание, выполненное из экструзионного пенополистирола, на основание намотан многомодовый волоконный световод длиной 10 м. Под действием гидроакустического поля основание сенсора изменяет свои размеры, что при-

водит к соответствующему изменению длины световода и модуляции фазы проходящего в нем лазерного излучения.

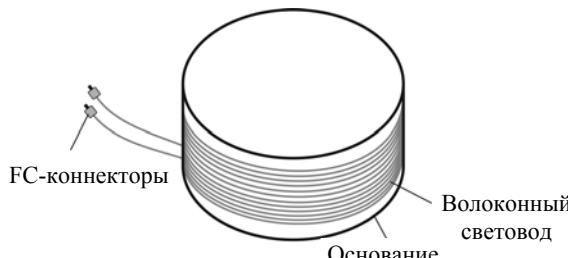


Рис. 2. Схема волоконно-оптического сенсора № 1

Волоконно-оптический сенсор с микроизгибами №2 (рис. 3) представляет собой видоизмененный сенсор №1. На основание из фторопласта, в котором предварительно было выполнено 90 поперечных углублений размером 1 мм, был намотан волоконный световод. Поверх световода напротив углублений закреплялись металлические стержни размером, соответствующим размерам углублений, с целью создания микроизгибов. Стержни фиксировались при помощи резинового кольца. Применение такого подхода должно повысить чувствительность сенсора.



Рис. 3. Схема волоконно-оптического сенсора № 2

Волоконно-оптический многослойный сенсор №3 (рис. 4) представляет собой модификацию ВО катушечного сенсора №1, на основание которого было намотано 20 м световода в полимерной оболочке в количестве пяти слоев, при этом поверх каждого слоя световода для его жесткой фиксации надевалось резиновое кольцо. В этом случае под действием акустического поля возникает не только изменение длины ВО световода, но и его радиальная деформация, что, в свою очередь, позволит увеличить чувствительность такого сенсора.

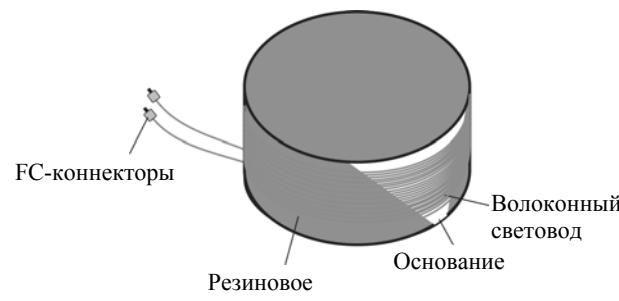


Рис. 4. Схема волоконно-оптического сенсора № 3

На рис. 5 представлены графики экспериментально полученных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) лазерного гидрофона с использованием разработанных волоконных сенсоров. Как видно из графиков, наибольшей чувствительностью обладает ВО многослойный сенсор №3. Максимальная чувствительность реализованных сенсоров наблюдается в диапазоне 1–20 кГц.

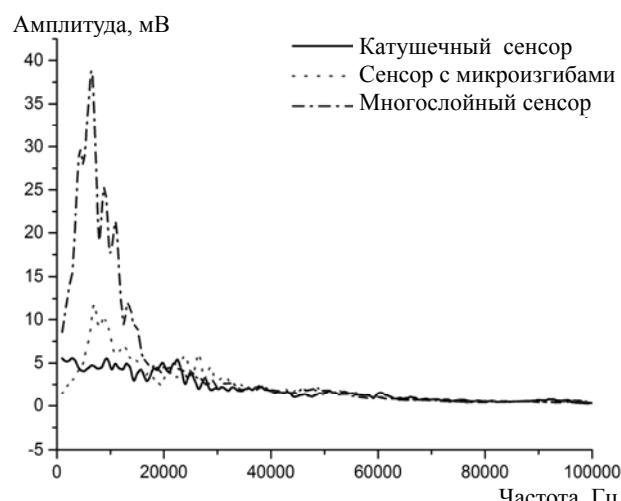


Рис. 5. АЧХ лазерного гидрофона с использованием разработанных волоконно-оптических сенсоров

Определена чувствительность лазерного гидрофона с использованием разработанных волоконных сенсоров (таблица).

Чувствительность лазерного гидрофона с разработанными волоконно-оптическими сенсорами

Сенсор	Чувствительность, мВ/Па
№ 1 катушечный	5,1
№ 2 с микроизгибами	3,4
№ 3 многослойный	8,6

Таким образом, в данной работе представлены результаты исследования трех модификаций волоконных сенсоров для адаптивного голограммического гидрофона. Определены АЧХ и чувствительность лазерного гидрофона с тремя модификациями волоконно-оптических сенсоров. Чувствительность гидрофона с применением катушечного сенсора составляет 5,1 мВ/Па, сенсора с микроизгибами – 3,4 мВ/Па и многослойного сенсора – 8,6 мВ/Па.

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

Литература

1. Bucaro J.A. Fiber-optic hydrophone / J.A. Bucaro, H.D. Dardy, E.F. Carome // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1977. – Vol. 62, No. 5. – P. 1302–1304.
2. Wilkenfeld T. Deep tropospheric refractivity profile for correcting satellite data //J. of Geophysical Research. – 2010. – T. 98, №. 13. – C. 4487.

3. Posada-Roman J. Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems / J. Posada-Roman, J.A. Garcia-Souto, J. Rubio-Serrano // Sensors. – 2012. – Vol. 12, No. 4. – P. 4793–4802.

4. Fiber optic acoustic hydrophone with double Mach-Zehnder interferometers for optical path length compensation / T.K. Lim et al. // Optics communications. – 1999. – Vol. 159, No. 4. – P. 301–308.

5. A Fabry-Pérot fiber-optic ultrasonic hydrophone for the simultaneous measurement of temperature and acoustic pressure / P. Morris et al. // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2009. – Vol. 125, No. 6. – P. 3611–3622.

6. Лазерный измеритель вариаций давления гидросфера в гидроакустических и океанологических исследованиях / Г.И. Долгих и др. // Подводные исследования и робототехника. – 2007. – №. 1. – С. 40–45.

7. Долгих Г.И. Лазерный гидрофон / Г.И. Долгих, А.А. Плотников, В.А. Швец // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 1. – С. 159–160.

8. Staudenraus J. Fibre-optic probe hydrophone for ultrasonic and shock-wave measurements in water / J. Staudenraus, W. Eisenmenger // Ultrasonics. – 1993. – Vol. 31, No. 4. – P. 267–273.

9. Kamshilin A.A. Continuous reconstruction of holographic interferograms through anisotropic diffraction in photorefractive crystals / A.A. Kamshilin, M.P. Petrov // Optics communications. – 1985. – Vol. 53, No. 1. – P. 23–26.

Ромашко Роман Владимирович

Д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. лаб. прецизионных оптических методов измерений Института автоматики и процессов управления (ИАПУ) ДВО РАН, профессор каф. теоретической и экспериментальной физики Дальневосточного федерального ун-та (ДВФУ)
Тел.: +7-902-555-51-74
Эл. почта: romashko@iacp.dvo.ru

Безрук Михаил Николаевич

Мл. науч. сотр. лаб. прецизионных оптических методов измерений ИАПУ ДВО РАН
Тел.: +7 (950-2) 97-74-65
Эл. почта: bezmisha@list.ru

Ермоляев Сергей Александрович

Аспирант лаб. прецизионных оптических методов измерений ИАПУ ДВО РАН
Тел.: +7 (908-9) 70-92-14
Эл. почта: nekker2@gmail.com

Romashko R.V., Bezruk M.N., Ermolaev S.A.

Adaptive hydrophone using various modifications of optical fiber sensors

In this paper we investigate the hydrophone based on adaptive holographic interferometer using three modifications of fiber optic sensors and determine its characteristics.

Keywords: laser hydrophone, adaptive interferometer, optical fibers.