

УДК 681.787+004.942

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО КОРПУСА ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИДРОФОНА

М.Ю. Плотников^а, А.В. Волков^а, С.С. Киселев^а, Е.А. Храмченко^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: avvolkov9223@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 10.07.17, принята к печати 15.08.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-767-774

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Плотников М.Ю., Волков А.В., Киселев С.С., Храмченко Е.А. Разработка и исследование защитного корпуса для волоконно-оптического гидрофона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 5. С. 767–774. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-767-774

Аннотация

Предмет исследования. Разработан и исследован защитный корпус для волоконно-оптического гидрофона, входящего в состав действующего макета донной сейсмической станции. Волоконно-оптический гидрофон построен на основе интерферометра Маха–Цендера. Чувствительное плечо намотано на эластичный сердечник, изготовленный из материала, усиливающего гидроакустическую чувствительность оптического волокна. Разработанный корпус предназначен для защиты чувствительного оптического волокна от возможных механических повреждений и пропускает акустические сигналы в водной среде без ослабления в рабочей полосе частот волоконно-оптического гидрофона (до 8 кГц). **Метод.** При проектировании защитного корпуса с требуемыми характеристиками применены расчеты, основанные на теории резонатора Гельмгольца. Математическое моделирование выполнено методом конечных элементов в среде Comsol Multiphysics. Построенные модели позволили определить конструкцию защитного корпуса, пропускающего акустические сигналы в заданной полосе частот. **Основные результаты.** Конструкция защитного корпуса представляет собой алюминиевый цилиндр с внешним радиусом 30 мм, высотой 14 см с толщиной стенок 1 мм и содержащего 1900 отверстий радиусом 1 мм. Моделирование конструкции корпуса в водной среде продемонстрировало его акустическую прозрачность на частотах до 8 кГц. Конструкция защитного корпуса изготовлена и исследована в составе действующего макета донной сейсмической станции. Результаты эксперимента подтвердили акустическую прозрачность защитного корпуса в требуемом диапазоне частот. **Практическая значимость.** Результаты работы могут найти применение при разработке и создании защитных корпусов волоконно-оптических гидрофонов с заданными частотными характеристиками. Разработанный защитный корпус используется в действующем макете сейсмической донной станции и обеспечивает защиту оптического волокна в чувствительном элементе волоконно-оптического гидрофона от механических воздействий, не влияя на его амплитудно-частотные характеристики.

Ключевые слова

волоконно-оптический гидрофон, защитный корпус, резонатор Гельмгольца, акустический фильтр, сейсмическая донная станция

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №03.G25.31.0245).

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF FIBER-OPTIC HYDROPHONE PROTECTIVE HOUSING

M.Y. Plotnikov^a, A.V. Volkov^a, S.S. Kiselev^a, E.A. Khramchenko^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: avvolkov9223@gmail.com

Article info

Received 10.07.17, accepted 15.08.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-767-774

Article in Russian

For citation: Plotnikov M.Y., Volkov A.V., Kiselev S.S., Khramchenko E.A. Development and research of fiber-optic hydrophone protective housing. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 767–774 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-767-774

Abstract

Subject of Research. The subject of research is the protective housing for the fiber-optic hydrophone that is a part of the working model of the ocean seismic bottom station. The fiber-optic hydrophone is built on the base of Mach-Zehnder interferometer. Its sensitive arm is wound on the elastic mandrel. The mandrel material increases acoustic pressure sensitivity of the optical fiber. The developed housing is designed to protect the sensitive optical fiber from mechanical damage. The housing also passes the acoustic signals in water without attenuation in the work frequency range of the fiber-optic hydrophone up to 8 kHz. **Method.** The theoretical calculations, based on the Helmholtz resonator theory, and mathematical modeling by the finite element method in the ComsolMultiphysics environment were used to develop the protective housing with required parameters. Created models enabled the definition of the protective housing final construction that passes acoustic signals in the required frequency range. **Main Results.** As a result of mathematical modeling the final construction of the protective housing was chosen. The construction is based on the aluminum cylinder with the external radius equal to 30 mm, the height - 14 cm and the wall thickness - 1 mm and it contains 1900 holes with the radius equal to 1 mm. During the modeling the frequency response of the protective housing was obtained; this response demonstrated its acoustic transparency in water at frequencies up to 8 kHz. The chosen protective housing was fabricated and studied in the working model of the ocean seismic bottom station. Experiment results confirmed the acoustic transparency of the protective housing in the required frequency range. **Practical Relevance.** The results of this work might be used for the developing and creating of protective housings for fiber-optic hydrophones with the required frequency responses. The developed protective housing is used in the working model of the ocean seismic bottom station and it provides the mechanical protection of the optical fiber in the sensitive element of the fiber optic-hydrophone without distortion of its frequency response.

Keywords

fiber-optic hydrophone, protective housing, Helmholtz resonator, acoustic filter, ocean seismic bottom station

Acknowledgements

This research was carried out at ITMO University and was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project No.03.G25.31.0245).

Введение

В течение нескольких последних десятилетий волоконно-оптические гидрофонные системы все активнее используются в геофизической разведке полезных ископаемых на морском шельфе, системах подводной охраны периметра и гидроакустической связи [1–3]. Конструкция волоконно-оптических гидрофонов может существенно отличаться в зависимости от направления их применения, в частности, в буксируемых гидроакустических антеннах могут использоваться тонкие «протяженные» волоконно-оптические гидрофоны [4, 5], а одиночные волоконно-оптические гидрофоны обычно имеют «точечное» исполнение [6–8].

Оптическая часть одиночных волоконно-оптических гидрофонов представляет собой волоконно-оптический интерферометр, чувствительное плечо которого наматывается на сердечник, изготовленный из материала, обеспечивающего высокую чувствительность гидрофона к акустическому давлению [9–11]. Аналогичный волоконно-оптический гидрофон, построенный на основе интерферометра Маха-Цендера, входит в состав действующего макета донной сейсмической станции [12–14].

Для обеспечения максимальной чувствительности волоконно-оптического гидрофона его чувствительный элемент с намотанным на него чувствительным плечом интерферометра должен подвергаться прямому воздействию акустического давления. В то же время чувствительный элемент должен быть максимально защищен от механических воздействий для обеспечения целостности оптического волокна и сохранения работоспособности волоконно-оптического гидрофона.

Таким образом, возникает задача защиты чувствительного элемента от механических воздействий с обеспечением акустической прозрачности защитного корпуса в рабочей полосе частот волоконно-оптического гидрофона. Настоящая работа посвящена разработке, созданию и экспериментальному исследованию защитного корпуса для волоконно-оптического гидрофона.

Математическое моделирование защитного корпуса

Согласно работам [15–17], защитный корпус для волоконно-оптического гидрофона может быть построен на основе полого цилиндра с отверстиями. Подобный цилиндр, как и любой другой объем с отверстием, представляет собой резонатор Гельмгольца [18, 19]. Одним из основных параметров такого цилиндрического резонатора является его резонансная частота, которую можно определить по следующей формуле [20]:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{V_c + L^2 S_0 / 3}}, \quad (1)$$

где f_0 – собственная частота резонатора, Гц; c – скорость звука в среде, м/с; S_0 – площадь отверстия, м²; l_c – эффективная длина горла резонатора, м; V – внутренний объем резонатора, м³; L – высота резонатора (цилиндра), м.

Чувствительный элемент волоконно-оптического гидрофона в донной сейсмической станции представляет собой сердечник длиной 12 см и диаметром 48 мм [21], выполненный из эластичного материала

(RTV655) с намотанным на него чувствительным оптическим волокном длиной 20 м. Рабочая полоса частот волоконно-оптического гидрофона составляет от 50 Гц до 8 кГц. Таким образом, защитный корпус этого гидрофона должен пропускать акустические сигналы до частоты 8 кГц в воде.

В качестве защитного корпуса рассмотрим цилиндр, в котором может полностью разместиться рассматриваемый волоконно-оптический гидрофон без касания стенок цилиндра с длиной 14 см, толщиной стенки 1 мм и внутренним диаметром 50 мм.

Рассчитывая собственные резонансные частоты цилиндра в воздухе согласно формуле (1) и материалам работы [20], можно получить значения 188,8 Гц и 274,9 Гц для радиусов отверстия 2 и 4 мм соответственно.

Точная собственная частота с учетом заданной геометрии резонатора также может быть получена с использованием методов численного моделирования. Для подтверждения проведенного расчета резонансной частоты было произведено математическое моделирование рассмотренного защитного корпуса с использованием метода конечных элементов в среде Comsol Multiphysics на основе модулей Pressure Acoustic и Solid Mechanics.

В построенной модели на защитный корпус с отверстием падала плоская акустическая волна, распространявшаяся в направлении, перпендикулярном оси цилиндра. В ходе моделирования оценивалась амплитуда акустического поля внутри защитного корпуса при различных частотах с шагом в 10 Гц. На рис. 1, а, представлена модель защитного корпуса с одним отверстием на основе резонатора Гельмгольца, а на рис. 1, б – зависимость амплитуды акустического поля внутри защитного корпуса от частоты акустического излучения при разных радиусах отверстия.

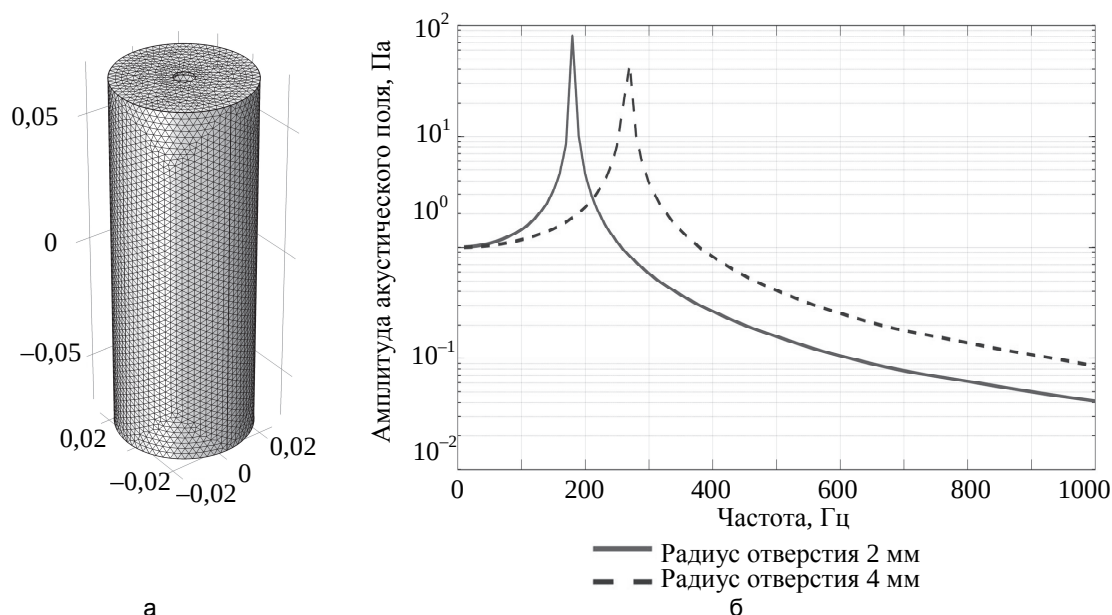


Рис. 1. Модель защитного корпуса на основе резонатора Гельмгольца (а) – размеры указаны в метрах; частотные характеристики защитного корпуса при разных радиусах отверстия (б)

Согласно результатам моделирования, представленным на рис. 1, б, полученные резонансные частоты защитного корпуса оказались близки к резонансным частотам, рассчитанным теоретически. Увеличение радиуса отверстия увеличивает собственную частоту резонатора, что согласуется с формулой (1). На частотах выше резонансной акустическое поле внутри защитного корпуса претерпевает значительное ослабление, и резонатор работает аналогично акустическому фильтру низких частот. Дополнительное математическое моделирование также показало, что в рассматриваемом диапазоне частот расположение отверстия не оказывает существенного влияния на резонансную частоту защитного корпуса. Таким образом, задача создания защитного корпуса для волоконно-оптического гидрофона сводится к определению его параметров, обеспечивающих пропускание акустических сигналов в воде с частотами до 8 кГц.

Используя формулу (1), можно показать, что для решения поставленной задачи с использованием указанных геометрических размеров защитного корпуса необходим радиус отверстия, превышающий размеры самого цилиндра. Однако, как показало математическое моделирование, эту проблему можно решить, увеличив число отверстий в защитном корпусе.

Используя этот подход, была разработана модель защитного корпуса для волоконно-оптического гидрофона, обеспечивающая требуемую полосу пропускания защитного корпуса до 8 кГц в воде. Модель такого защитного корпуса и его частотная характеристика (для воды и воздуха) изображены на рис. 2, а, и рис. 2, б, соответственно.

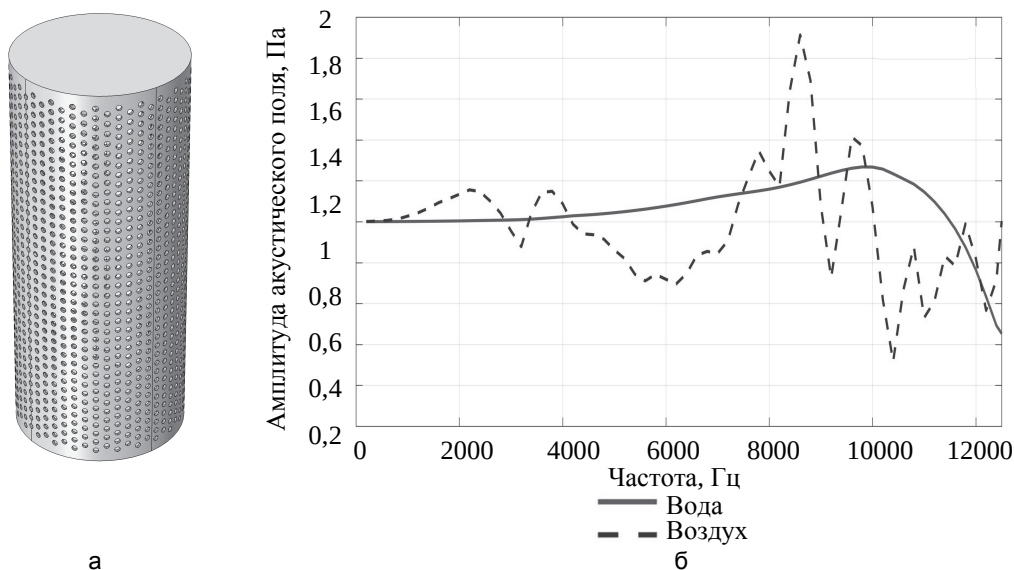


Рис. 2. Модель разработанного защитного корпуса для волоконно-оптического гидрофона (а); частотная характеристика разработанного защитного корпуса в воде и на воздухе (б)

Защитный корпус, представленный на рис. 2, а, представляет собой алюминиевый цилиндр с внешним радиусом 30 мм, высотой 14 см, толщиной стенок 1 мм и содержит 1900 отверстий с радиусом 1 мм.

Из рис. 2, б, видно, что защитный корпус является акустически прозрачным в воде вплоть до резонансной частоты 10 кГц, что удовлетворяет заданному требованию к частотной характеристике волоконно-оптического гидрофона. Кроме того, согласно результатам моделирования защитный корпус обеспечивает небольшое усиление акустического поля (до 16%) в диапазоне частот, близком к 8 кГц.

На воздухе защитный корпус имеет неравномерную частотную характеристику и в диапазоне частот 4200–7200 Гц ослабляет акустические сигналы примерно на 30%, но является акустически прозрачным для частот до 2000 Гц с небольшим усилением акустического поля. Неравномерность частотной характеристики на высоких частотах, предположительно, обусловлена появлением стоячих волн в защитном корпусе, приводящих к формированию узлов и пучностей акустического поля внутри корпуса.

Результаты экспериментального исследования защитного корпуса

На основании результатов проведенного математического моделирования был изготовлен защитный корпус для волоконно-оптического гидрофона. Он был смонтирован в действующем макете донной сейсмической станции. Для экспериментальных исследований защитного корпуса был собран стенд, изображенный на рис. 3.



Рис. 3. Экспериментальный стенд для исследования защитного корпуса: 1 – действующий макет донной сейсмической станции, 2 – чувствительный элемент волоконно-оптического гидрофона в защитном корпусе, 3 – динамик, 4 – генератор сигналов, 5 – осциллограф

Волоконно-оптический гидрофон был собран на основе интерферометра Маха–Цендера, чувствительное плечо которого было намотано на эластичный сердечник, а опорное плечо было размещено в

корпусе макета донной станции. В корпусе также размещались пьезокерамический фазовый модулятор, на который наматывался участок опорного плеча интерферометра, и оптоэлектронная плата, осуществляющая прием и демодуляцию интерференционных сигналов. Для демодуляции интерференционных сигналов использовалась схема гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса [22]. Схема демодуляции обеспечивала рабочую полосу частот волоконно-оптического гидрофона от 50 Гц до 8 кГц [23–25]. Схема также осуществляла автоматическую регулировку глубины фазовой модуляции согласно алгоритму, описанному в работах [26, 27]. Выдача данных на персональный компьютер (ПК) с оптоэлектронной платы обработки производилась через интерфейс Ethernet 100Base FX. Частота дискретизации выходных сигналов составляла 20 кГц, длительность записываемых выборок сигналов – 20 с.

Экспериментальный стенд работал следующим образом. Для получения детальных спектральных характеристик защитного корпуса с помощью генератора сигналов 4 создавался электрический сигнал – белый шум, который подавался на излучающий динамик 3. Размах электрического шумового сигнала контролировался с помощью осциллографа 5. Акустический шумовой сигнал с динамика регистрировался волоконно-оптическим гидрофоном 2 и обрабатывался оптоэлектронной платой в макете донной сейсмической станции 1. Далее данные с платы обработки выдавались на ПК, где для записанных шумовых сигналов находилось распределение спектральной плотности мощности [28].

Экспериментальное исследование защитного корпуса проходило в два этапа: производилась оценка спектральной плотности мощности выходного шумового сигнала с волоконно-оптического гидрофона без защитного корпуса (рис. 4, а) и в защитном корпусе (рис. 4, б). Поскольку единственным отличием между двумя этапами исследований было наличие защитного корпуса, любые значительные изменения спектральных характеристик регистрируемого шумового сигнала позволили бы оценить наличие собственной частотной характеристики защитного корпуса. Ввиду невозможности проведения эксперимента в воде оценка частотных характеристик защитного корпуса производилась на воздухе.



Рис. 4. Чувствительный элемент волоконно-оптического гидрофона: без защитного корпуса (а); в защитном корпусе (б)

Результаты оценки спектральной плотности мощности шумовых сигналов, полученных в ходе экспериментальных исследований, представлены на рис. 5.

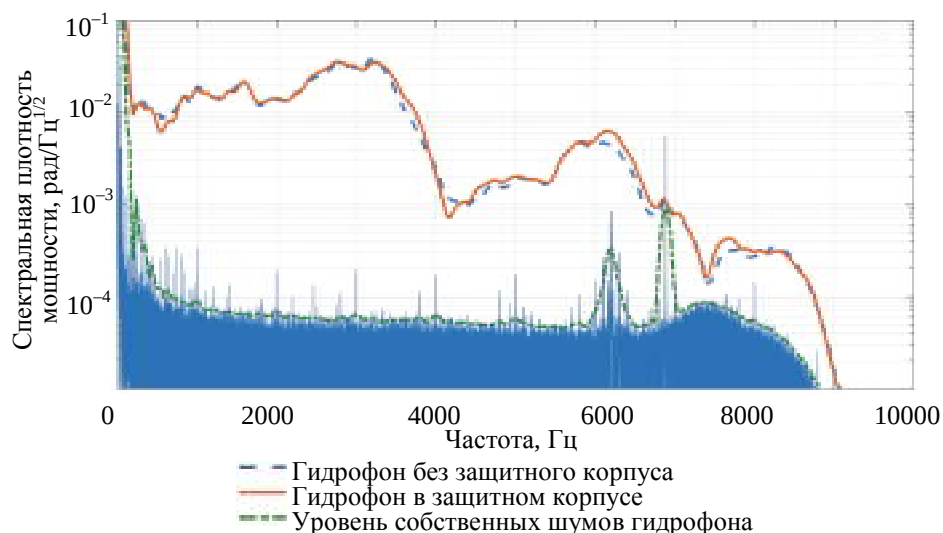


Рис. 5. Спектральная плотность мощности шумовых сигналов с волоконно-оптического гидрофона в защитном корпусе и без него

Согласно результатам эксперимента, представленным на рис. 5, уровень собственных шумов волоконно-оптического гидрофона (нижнее сплошное заполнение и ближайшая огибающая) на один-два порядка ниже, чем уровень шумовых сигналов, зарегистрированных в ходе время проведения эксперимента, поэтому собственные шумы волоконно-оптического гидрофона не оказывают значительного влияния на результаты эксперимента. Дискретные компоненты в собственных шумах гидрофона вызваны влиянием шумов вспомогательного оборудования, расположенного в помещении, в котором производился эксперимент.

Распределение спектральной плотности мощности зарегистрированных с помощью гидрофона шумовых сигналов (сплошная и пунктирная линии на рис. 5) неравномерно по частоте, что объясняется наличием собственных амплитудно-частотных характеристик динамика, помещения, в котором производились измерения, и волоконно-оптического гидрофона. В то же время распределение спектральной плотности мощности шумовых сигналов с волоконно-оптического гидрофона в защитном корпусе и без него практически совпадают, что говорит о приемлемой акустической прозрачности рассматриваемого защитного корпуса в диапазоне частот до 8 кГц. Спад значений уровня спектральной плотности мощности на частотах выше 8,5 кГц вызван наличием в схеме обработки интерференционных сигналов фильтра низких частот.

Отсутствие ослабления акустических сигналов в диапазоне частот 4200–7200 Гц в соответствии с результатами моделирования защитного корпуса (см. рис. 2, б), предположительно, обусловлено негерметичным креплением торцевых пластин защитного корпуса к боковым стенкам цилиндра с отверстиями, что представляло дополнительную площадь (кроме отверстий) для прохождения акустического поля внутрь защитного корпуса.

Согласно полученным результатам, разработанный защитный корпус является акустически прозрачным для акустических сигналов в диапазоне частот до 8 кГц на воздухе. Поскольку в воде собственная резонансная частота защитного корпуса выше, чем на воздухе, разработанный защитный корпус обеспечит пропускание акустического поля в заданном диапазоне частот и в воде, что удовлетворяет поставленной задаче.

Заключение

Настоящая работа посвящена разработке, созданию и экспериментальному исследованию защитного корпуса для волоконно-оптического гидрофона.

В работе произведен теоретический расчет резонансной частоты защитного корпуса на основе цилиндрического резонатора Гельмгольца. Для подтверждения результатов расчета в среде Comsol Multiphysics построена математическая модель защитного корпуса с различными радиусами отверстия. С помощью математической модели получены зависимости амплитуды акустического поля в защитном корпусе от частоты и радиуса отверстия. Показано совпадение теоретических рассчитанных резонансных частот корпуса с результатами математического моделирования.

Полученная модель позволила подобрать конструкцию защитного корпуса для волоконно-оптического гидрофона, обеспечивающую пропускание акустических волн в водной среде в диапазоне частот до 8 кГц. Выбранная конструкция защитного корпуса представляла собой алюминиевый цилиндр с внешним радиусом 30 мм, высотой 14 см, толщиной стенок 1 мм и содержала 1900 отверстий с радиусом 1 мм.

Выбранная конструкция защитного корпуса изготовлена и исследована в составе действующего макета донной сейсмической станции. Результаты эксперимента подтвердили акустическую прозрачность защитного корпуса в требуемом диапазоне частот.

Литература

1. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S. *Fiber Optic Sensors*. 2nd ed. CRC Press, 2008. 492 p.
2. Cole J.H., Kirkendall C., Dandridge A., Cogdell G., Giallorenzi T.G. Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the Naval Research Laboratory // *Washington Academic Science Journal*. 2004. V. 90(3). P. 40–57.
3. Hu Y. et al. Recent progress toward fiber optic hydrophone research, application and commercialization in China // *Proc. of SPIE*. 2012. V. 8421. P. 84210Q-1. doi: 10.1117/12.981130
4. Ames G.H., Maguire J.M. Miniaturized mandrel-based fiber optic hydrophone // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2007. V. 121. N 3. P. 1392–1395. doi: 10.1121/1.2431340
5. Lavrov V.S., Plotnikov M.Y., Aksarin S.M. et al. Experimental investigation of the thin fiber-optic hydrophone array based on fiber Bragg gratings // *Optical Fiber Technology*. 2017. V. 34. P. 47–51. doi: 10.1016/j.yofte.2017.01.003
6. Chen G.Y., Brambilla G., Newson T.P. Compact acoustic sensor

References

1. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S. *Fiber Optic Sensors*. 2nd ed. CRC Press, 2008. 492 p.
2. Cole J.H., Kirkendall C., Dandridge A., Cogdell G., Giallorenzi T.G. Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the naval research laboratory. *Washington Academy of Sciences Journal*, 2004, vol. 90, pp. 40–57.
3. Hu Y. et al. Recent progress toward fiber optic hydrophone research, application and commercialization in China. *Proc. of SPIE*, 2012, vol. 8421, pp. 84210Q-1. doi: 10.1117/12.981130
4. Ames G.H., Maguire J.M. Miniaturized mandrel-based fiber optic hydrophone. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, vol. 121, no. 3, pp. 1392–1395. doi: 10.1121/1.2431340
5. Lavrov V.S., Plotnikov M.Y., Aksarin S.M. et al. Experimental investigation of the thin fiber-optic hydrophone array based on fiber Bragg gratings. *Optical Fiber Technology*, 2017, vol. 34, pp. 47–51. doi: 10.1016/j.yofte.2017.01.003

- based on air-backed mandrel coiled with optical microfiber // *Optics Letters*. 2012. V. 37. N 22. P. 4720–4722. doi: 10.1364/ol.37.004720
7. Yin K., Zang M., Ding T. et al. An investigation of a fiber-optic air-backed mandrel hydrophone // *Optics Communications*. 2008. V. 281. N 1. P. 94–101. doi: 10.1016/j.optcom.2007.09.029
8. Cuneo S., Plotnikov A., Repetto L., Anghinolfi M. A passive hydrophone for high-frequency application // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2006. V. 567. N 2. P. 518–520. doi: 10.1016/j.nima.2006.05.178
9. *The Ocean Engineering Handbook* / Ed. F. El-Hawary. Boca Raton: CRC Press, 2001. 416 p.
10. De Freitas J.M. Recent developments in seismic seabed oil reservoir monitoring applications using fibre-optic sensing networks // *Measurement Science and Technology*. 2011. V. 22. N 5. P. 052001. doi: 10.1088/0957-0233/22/5/052001
11. Лиюкумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Часть 2. Волоконный интерферометрический чувствительный элемент. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 110 с.
12. Плотников М.Ю. Волоконно-оптический гидрофон: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: НИУ ИТМО, 2015. 155 с.
13. Плотников М.Ю., Никитенко А.Н., Мешковский И.К., Куликов А.В. Донная сейсмическая станция на основе волоконно-оптического гидрофона и микромеханического геофона // Приборы и системы разведочной геофизики. 2015. Т. 52. № 2. С. 56–65.
14. Ефимов М.Е., Плотников М.Ю., Куликов А.В. Моделирование и экспериментальное исследование чувствительного элемента волоконно-оптического гидрофона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 5 (93). С. 158–163.
15. Wang Z., Hu Y., Meng Z., Ni M. Fiber-optic hydrophone using a cylindrical Helmholtz resonator as a mechanical anti-aliasing filter // *Optic Letters*. 2008. V. 33. N 1. P. 37–39. doi: 10.1364/ol.33.000037
16. Wang Z., Hu Y., Meng Z., Luo H., Ni M. Novel mechanical anti-aliasing fiber-optic hydrophone with fourth order acoustic low pass filter // *Optic Letters*. 2008. V. 33. N 11. P. 1267–1269. doi: 10.1364/ol.33.001267
17. Zhang M., Ma X., Wang L., Lai S., Zhou H., Zhao H., Liao Y. Progress of optical fiber sensors and its application in harsh environment // *Photonic Sensors*. 2011. V. 1. N 1. P. 84–89. doi: 10.1007/s13320-010-0012-1
18. Ingard U. On the theory and design of acoustic resonators // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1953. V. 25. N 6. P. 1037–1061. doi: 10.1121/1.1907235
19. Аграфонова А.А., Комкин А.И. Анализ факторов, определяющих собственную частоту резонатора Гельмгольца // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 12. С. 220–231. doi: 10.7463/1214.0742764
20. Komkin A.I., Mironov M.A., Yudin S.I. Eigenfrequency of a Helmholtz resonator at the wall of a rectangular duct // *Acoustical Physics*. 2014. V. 60. N 2. P. 142–145. doi: 10.1134/s1063771014020109
21. Ефимов М.Е., Плотников М.Ю., Мехренгин М.В., Лавров В.С. Исследование характеристик направленности двоячного волоконно-оптического гидрофона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 6. С. 1115–1120. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-1015-1020
22. Беликин М.Н., Плотников М.Ю., Стригалева В.Е., Куликов А.В., Киреев А.Ю. Экспериментальное сравнение алгоритмов гомодинной демодуляции сигналов для фазового волоконно-оптического датчика // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 6. С. 1008–1014. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-1008-1014
23. Плотников М.Ю., Куликов А.В., Стригалева В.Е. Исследование зависимости амплитуды выходного сигнала в схеме гомодинной демодуляции для фазового волоконно-
6. Chen G.Y., Brambilla G., Newson T.P. Compact acoustic sensor based on air-backed mandrel coiled with optical microfiber. *Optics Letters*, 2012, vol. 37, no. 22, pp. 4720–4722. doi: 10.1364/ol.37.004720
7. Yin K., Zang M., Ding T. et al. An investigation of a fiber-optic air-backed mandrel hydrophone. *Optics Communications*, 2008, vol. 281, no. 1, pp. 94–101. doi: 10.1016/j.optcom.2007.09.029
8. Cuneo S., Plotnikov A., Repetto L., Anghinolfi M. A passive hydrophone for high-frequency application. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2006, vol. 567, no. 2, pp. 518–520. doi: 10.1016/j.nima.2006.05.178
9. *The Ocean Engineering Handbook* / Ed. F. El-Hawary. Boca Raton, CRC Press, 2001, 416 p.
10. De Freitas J.M. Recent developments in seismic seabed oil reservoir monitoring applications using fibre-optic sensing networks. *Measurement Science and Technology*, 2011, vol. 22, no. 5, p. 052001. doi: 10.1088/0957-0233/22/5/052001
11. Liokumovich L.B. *Fiber-Optic Interferometric Measurements. Part 2. Fiber Interferometric Sensing Element*. St. Petersburg, SPbSTU Publ., 2007, 110 p. (In Russian)
12. Plotnikov M.Yu. *Volokonno-Opticheskiy Gidrofon*. Dis. kand. tekhn. nauk. [Fiber-Optic Hydrophone. PhD Eng. Sci. Diss.]. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2015, 155 p.
13. Kulikov A.V., Nikitenko A.N., Meshkovsky I.K., Plotnikov M.Ju. Seismic subsea node on basis of fiber-optic hydrophone and MEMS geophone. *Devices and Systems of Exploration Geophysics*, 2015, vol. 52, no. 2, pp. 56–65. (In Russian).
14. Efimov M.E., Plotnikov M.Yu., Kulikov A.V. Modeling and experimental study of a fiber optic hydrophone sensing element. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 5, pp. 158–163. (In Russian)
15. Wang Z., Hu Y., Meng Z., Ni M. Fiber-optic hydrophone using a cylindrical Helmholtz resonator as a mechanical anti-aliasing filter. *Optic Letters*, 2008, vol. 33, no. 1, pp. 37–39. doi: 10.1364/ol.33.000037
16. Wang Z., Hu Y., Meng Z., Luo H., Ni M. Novel mechanical anti-aliasing fiber-optic hydrophone with fourth order acoustic low pass filter. *Optic Letters*, 2008, vol. 33, no. 11, pp. 1267–1269. doi: 10.1364/ol.33.001267
17. Zhang M., Ma X., Wang L., Lai S., Zhou H., Zhao H., Liao Y. Progress of optical fiber sensors and its application in harsh environment. *Photonic Sensors*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 84–89. doi: 10.1007/s13320-010-0012-1
18. Ingard U. On the theory and design of acoustic resonators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1953, vol. 25, no. 6, pp. 1037–1061. doi: 10.1121/1.1907235
19. Agrafovna A.A., Komkin A.I. Analysis of factors determining the Helmholtz resonator eigenfrequency. *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 12, pp. 220–231. doi: 10.7463/1214.0742764
20. Komkin A.I., Mironov M.A., Yudin S.I. Eigenfrequency of a Helmholtz resonator at the wall of a rectangular duct. *Acoustical Physics*, 2014, vol. 60, no. 2, pp. 142–145. doi: 10.1134/s1063771014020109
21. Efimov M.E., Plotnikov M.Yu., Mekhregin M.V., Lavrov V.S. Directivity pattern investigation of dual fiber optic hydrophone. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 1015–1020. (In Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-1015-1020
22. Belikin M.N., Plotnikov M.Yu., Strigalev V.E., Kulikov A.V., Kireenkov A.Yu. Experimental comparison of homodyne demodulation algorithms for phase fiber-optic sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 1008–1014. (In Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-1008-1014
23. Plotnikov M.Yu., Kulikov A.V., Strigalev V.E. Investigation of output signal amplitude dependence in homodyne demodulation scheme for phase fiber-optic sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6, pp. 18–22. (In Russian)
24. Volkov A.V., Oskolkova E.S., Plotnikov M.Yu., Mekhregin

- оптического датчика // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6 (88). С. 18–22.
24. Волков А.В., Осколкова Е.С., Плотников М.Ю., Мехреньгин М.В., Шуклин Ф.А. Исследование влияния фазового сдвига сигнала опорного генератора на выходной сигнал схемы гомодинной демодуляции сигналов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 608–614. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-4-608-614
 25. Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K. Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation technique // *Advances in Optical Technologies*. 2014. V. 2014. Art. 815108. doi: 10.1155/2014/815108
 26. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhregin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors // *IEEE Sensors Journal*. 2017. V. 17. N 13. P. 4143–4150. doi: 10.1109/jsen.2017.2704287
 27. Мешковский И.К., Мирошнichenko Г.П., Мехреньгин М.В., Плотников М.Ю. Способ контроля параметров сигнала волоконно-оптического интерферометрического фазового датчика с перестраиваемым источником оптического излучения. Патент РФ № 2595320, опубл. 16.06.2016 Бюл. № 24.
 28. Schmid H. How to use the FFT and Matlab's pwelch function for signal and noise simulations and measurements. Institute of Microelectronics, University of Applied Sciences NW Switzerland, 2012.
 - M.V., Shuklin P.A. Phase shift influence research of the reference oscillator signal on the output signal in homodyne demodulation scheme. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 4, pp. 608–614. (In Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-4-608-614
 25. Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K. Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation technique. *Advances in Optical Technologies*, 2014, vol. 2014, art. 815108. doi: 10.1155/2014/815108
 26. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhregin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, no. 13, pp. 4143–4150. doi: 10.1109/jsen.2017.2704287
 27. Meshkovskij I.K., Miroshnichenko G.P., Mekhregin M.V., Plotnikov M.Yu. *Method for Controlling Signal Parameters of Fibre-Optic Interferometric Phase Sensor with Adjustable Optical Radiation Source*. Patent RU 2595320, 2016.
 28. Schmid H. *How to use the FFT and Matlab's pwelch function for signal and noise simulations and measurements*. Institute of Microelectronics, University of Applied Sciences NW Switzerland, 2012.

Авторы

Плотников Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, plotnikov-michael@yandex.ru

Волков Антон Валерьевич – инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, avvolkov9223@gmail.com

Киселев Сергей Степанович – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kiselev@mail.ifmo.ru

Храмченко Екатерина Анатольевна – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, elle_ysl@icloud.com

Authors

Mikhail Yu. Plotnikov – PhD, Scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, plotnikov-michael@yandex.ru

Anton V. Volkov – Research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, avvolkov9223@gmail.com

Sergey S. Kiselev – PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kiselev@mail.ifmo.ru

Ekaterina A. Khrumchenko – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, elle_ysl@icloud.com