

**УДК 33**

## **Экономическая составляющая разработки волоконно-оптического микрофона**

**Потапова Арина Дмитриевна**

Бакалавр,  
сотрудник лаборатории НОЦ «Фотоника и ИК-Техника»,  
Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),  
105005, Российская Федерация, Москва, ул. 2-Я Бауманская, 5;  
e-mail: potapovaarina@mail.ru

### **Аннотация**

Объектом исследования является волоконно-оптический распределенный датчик акустического воздействия, применимый для использования на протяженном участке работ. Цель работы – разработка волоконно-оптического микрофона со следующими параметрами: диапазон дальности измерения – не менее 60 км; пространственное разрешение – не хуже 20 м; частотный диапазон регистрируемого акустического сигнала – от 5 Гц до 1,5 КГц. Поставленная цель достигается за счет решения следующих задач: анализ возможных схем построения волоконно-оптического микрофона; применение слабоотражающих волоконно-оптических брэгговских решеток; разработка математической модели волоконно-оптического микрофона; разработка макетного образца волоконного микрофона для проведения экспериментальных исследований точности регистрации акустических сигналов. В ходе выполнения работы использовалось программное обеспечение для анализа и обработки оптических сигналов, получаемых в ходе исследований разрабатываемого распределенного волоконно-оптического микрофона. Разработана оригинальная схема построения волоконно-оптического микрофона для регистрации акустических сигналов с возможностью применения в местах повышенной опасности и алгоритма обработки и фильтрации сигналов, полученных в ходе от акустического датчика, а также в разработке математической модели для теоретического определения места и величины акустического воздействия несколькими точками волоконно-оптического микрофона.

### **Для цитирования в научных исследованиях**

Потапова А.Д. Экономическая составляющая разработки волоконно-оптического микрофона // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2024. Том 14. № 5А. С. 662-668.

### **Ключевые слова**

Волоконно-оптический микрофон, датчик, математическая модель, акустические сигналы.

## Введение

В настоящее время благодаря прогрессу в области электроники и волоконной оптики становится возможным применение волоконно-оптических систем с датчиком-волоконным кабелем. В некоторых случаях даже не требуется модификация кабеля, что позволяет использовать уже существующие волоконно-оптические линии в качестве сенсоров.

Установка таких систем требует лишь прокладки кабеля-сенсора вдоль контролируемого объекта и организации помещения для оператора на одном из его концов. При необходимости информация с блока обработки системы может быть передана по сетевому соединению к удаленному оператору. Вместо того, чтобы следить за множеством мониторов с изображениями с камер или графиков, оператор получает всю информацию с одного экрана, где уже была проведена предварительная компьютерная обработка для выделения интересующего сигнала.

Все волоконно-оптические измерения, независимо от измеряемого параметра (скорость, давление, перемещение, температура и т.д.), сводятся к измерению изменения фазы, частоты, амплитуды или поляризации исходного излучения.

Целью данной работы является разработка распределенного волоконно-оптического микрофона на основе фазочувствительного рефлектометра, который позволяет получать акустический сигнал с любой точки оптического волокна и точно определять место акустического воздействия с точностью до нескольких метров. Это позволит расширить функционал систем мониторинга протяженных объектов, таких как трубопроводы, железнодорожные пути, границы закрытых объектов, для предотвращения и обнаружения утечек, несанкционированного проникновения на закрытую территорию и контроля активности на контролируемой территории.

Цель работы – разработка волоконно-оптического микрофона со следующими параметрами: диапазон дальности измерения – не менее 60 км; пространственное разрешение не хуже 20 м; частотный диапазон регистрируемого акустического сигнала от 5 Гц до 1,5 КГц.

Поставленная цель достигается за счет решения следующих задач: анализ возможных схем построения волоконно-оптического микрофона; применение слабоотражающих волоконно-оптических брэгговских решеток; разработка математической модели волоконно-оптического микрофона; разработка макетного образца волоконного микрофона для проведения экспериментальных исследований точности регистрации акустических сигналов.

При анализе планируется сравнение параметров волоконно-оптических микрофонов, построенных по схемам Маха-Цендера, Майкельсона, Саньяка и Фабри-Перо, с параметрами пьезоэлектрических микрофонов.

## Основная часть

Поскольку устройства основаны на различных физических принципах, для объективной оценки необходимо выбрать критерий, который характеризует акустический датчик независимо от его типа конструкции и ширины рабочей полосы частот. В качестве такого параметра был выбран NEAP (NEAP – Noise equivalent acoustic pressure) (1). Это параметр, который измеряет минимальное акустическое давление, которое может обнаружить микрофон с заданным уровнем шума.

Схема на интерферометре Маха-Цендера имеет два существенных недостатка: нестабильность рабочей точки; любые фазовые шумы для несбалансированной схемы будут

приводить к изменению интенсивности регистрируемого светового сигнала.

Волоконно-оптические датчики на основе интерферометра Майкельсона имеют два важных преимущества перед датчиками, в основе которых лежит ИМЦ:

1. Связь с расположенным удалённо от источника и приёмника чувствительным плечом осуществляется только за счёт одного волокна, что не представляется возможным для ИМЦ.

2. Световой пучок проходит через чувствительное плечо сенсора дважды, что делает этот тип волоконно-оптического акустического датчика теоретически вдвое более чувствительным, нежели датчик, в основе которого лежит ИМЦ.

В волоконно-акустическом сенсоре, основанном на интерферометре Фабри-Перо (ИФП), световой сигнал многократно проходит через резонатор, отражаясь от его полупрозрачных зеркал. Выходная мощность светового сигнала данного интерферометра будет максимальной, когда все выходящие пучки будут в фазе, и будет быстро убывать даже от небольшого фазового изменения. Следовательно, малые фазовые изменения, вносимые в полость, будут приводить к большому изменению интенсивности света на выходе интерферометра.

Волоконно-оптический датчик, основанный на интерферометре Саньяка, имеет следующие преимущества: фазовый шум источника излучения не преобразуется в шум интенсивности, как в рассмотренных ранее интерферометрах Майкельсона и ИМЦ; можно использовать широкополосный источник излучения вместо узкополосного лазерного диода;

Однако настоящая схема также имеет и недостатки: волоконно-оптический датчик на основе интерферометра Саньяка не чувствителен к низким акустическим частотам, так как медленные изменения в чувствительном элементе будут приходиться на приёмник одновременно от пучка, движущегося по часовой стрелке, и от противонаправленного ему.

Разработка распределенного и квази-распределенного датчика акустического воздействия с диапазоном измерения 60 км и пространственным разрешением 20 м возможна только на основе схем фазочувствительного рефлектометра и схемы на СВОБР. Датчик на СВОБР обладает наилучшими показателями по минимально обнаруживаемому давлению и сложности мультиплексирования, что делает его предпочтительным выбором для создания квази-распределенного волоконно-оптического микрофона.

Моделирование системы длиной 60 км выявило значительное снижение ОСШ на участках линии, расположенных более чем в 25 км от источника. Чтобы обеспечить диапазон измерения не менее 50 км, в схеме предусмотрено два канала: первый канал работает на участке 0-25 км, а второй канал – на участке 25-50 км.

Отношение сигнал/шум (SNR) – это важный параметр, который определяет качество сигнала в различных системах связи. Чем выше SNR, тем лучше качество сигнала и меньше вероятность ошибок при его передаче.

В волоконно-оптических системах SNR определяется уровнем шума в системе и мощностью передаваемого сигнала. Шум может возникать из-за различных причин, таких как тепловое движение атомов и молекул в материалах компонентов системы, флуктуации мощности оптического сигнала и другие факторы.

Чтобы улучшить SNR в волоконно-оптических системах, можно использовать различные методы. Один из них – увеличение мощности передаваемого сигнала. Однако это может привести к увеличению потерь на волоконно-оптических компонентах и ухудшению качества сигнала. Другой метод – уменьшение уровня шума в системе. Это можно достичь путем выбора компонентов с минимальными потерями и правильного проектирования системы.

На расстоянии 25 км на первом канале отношение сигнал/шум ОСШ = 17,86.

На втором канале минимальное отношение сигнал/шум  $OSШ = 3$  регистрируется на 50 километре.

Из оценки шума ФПУ было получено значение

$S_{\varphi}(v) \approx 0,62 \cdot 10^{-9} \text{ рад} / \sqrt{\text{Гц}}$ , что на несколько порядков ниже фазовых шумов лазерного модуля NKT Photonics KOHERAS BASIK X15, фазовый шум на частоте 200 Гц которого составляет  $S_{\varphi}(v) = 2 \text{ мкрад} / \sqrt{\text{Гц}}$ , это позволит считать шум лазера основным при расчете NEAP.

По расчетам получим, что NEAP разрабатываемого датчика ( $NEAP=2000 \text{ мкПа} / \sqrt{\text{Гц}}$ ) будет лучше, чем у рассматриваемого ранее пьезоэлектрического микрофона YAOW- 27022 ( $NEAP=2530 \text{ мкПа} / \sqrt{\text{Гц}}$ )

(1)

$$\langle NEAP \rangle = \frac{\sigma_n}{M},$$

где NEAP – интегральное эквивалентное шуму акустическое давление, Па;

$\sigma_n$  – СКО шума, В (для пьезоэлектрических микрофонов), рад (для волоконно-оптических микрофонов);

$M$  – интегральная чувствительность микрофона, В/мкПа (для пьезоэлектрических гидрофонов), рад/мкПа (для волоконно-оптических микрофонов);

Для приведения шумов разной природы к одной размерности была выведена формула (2).

(2)

$$\sigma_n = \sqrt{(2 \cdot K_u \cdot P_0 \cdot T_R(k) \cdot T_{\alpha}(z))^2 (2\sigma_{\varphi_{\text{ФШ}}}^2 + M_{\text{Фаз}} \cdot 2d \cdot \sigma_{\varphi_{\text{ШМ}}}^2) + \sigma_{U_{\text{Ш}}}^2}$$

где  $\sigma_{\varphi_{\text{ФШ}}}^2$  – фазовый шум лазера, рад<sup>2</sup>;

$\sigma_{\varphi_{\text{ШМ}}}^2$  – внешние шумы, Па<sup>2</sup>;

$\sigma_{U_{\text{Ш}}}^2$  – шум ФПУ, В<sup>2</sup>.

Для высокоточного распознавания акустического сигнала, полученного с установки, необходимо подвергнуть предварительной обработке. Предварительная обработка заключается в следующем.

Сигнал, который поступает с АЦП, подвергается восстановлению фазы (если схема с двумя приемниками, фильтруется фильтром Батерворда 5-го порядка, происходит увеличение громкости сигнала, данные преобразуются в wav формат).

В экспериментальной схеме излучение лазера проходит по сенсорному волокну, частично отражается от первой волоконной Брэгговской решетки (ВБР1) и возвращается на волоконный разветвитель, а частично проходит к следующей волоконной Брэгговской решетке (ВБР2), отражается от нее и также возвращается на волоконный разветвитель, где происходит интерференция с первой частью излучения, отраженного от ВБР1. Интерференционный сигнал регистрируется приемником излучения и представляет собой зависимость интенсивности излучения от времени.

Каждый отдельный микрофон представляет из себя оптическое волокно с записанными на него СВОБР, намотанное на поликарбонатную катушку, закрепленную в корпус.

Спектрограммы представляют собой зависимость спектральной мощности сигнала от времени и частоты. По горизонтальной оси показано время, по вертикальной – частота, а в псевдоцветах – спектральная плотность мощности (демонстрирует то, насколько интенсивны те или иные компоненты в сигнале): максимум мощности соответствует жёлтому цвету, а минимум – фиолетовому. При воздействии на волоконный микрофон спектр сигнала, который он формирует, изменяется, и в нём возникают новые спектральные компоненты. Таким образом, на спектрограммах фиолетовым цветом обозначено отсутствие воздействия, а желтым – наличие его. Моменты времени начала жёлтых областей являются началом изменения спектра сигнала, то есть, начала воздействия. Чем ярче желтый свет, тем интенсивнее происходило воздействие на данной частоте.

Исходя из видов зарегистрированных сигналов, может быть предложено два варианта алгоритмов для автоматизированного определения наличия дрона: пороговый метод (обнаружение во временной области) и анализ спектра (распознавание в частотной области). Пороговый метод позволяет определить начало воздействия по срезу интенсивности по координате микрофона. Экспериментально устанавливается определенный порог по интенсивности, так чтобы превышал шумы и не было ложных воздействий, но и не слишком высокий, чтобы не пропустить воздействие. Когда интенсивность сигнала превышает пороговое значение, программа сообщает о наличии воздействия на определенный микрофон. Таким образом, происходит обнаружение дрона (без его распознавания, так как форма сигнала в такой конфигурации не зависит от типа дрона).

На графиках спектрограмм также можно определить, что микрофоны более чувствительны к низким частотам. Результаты для микрофона с расстоянием между брэгговскими решетками 5 м и для микрофона с расстоянием между брэгговскими решетками 10 м похожи между собой, микрофон с расстоянием между брэгговскими решетками 10 м более чувствителен к высоким частотам. Для использования микрофона для регистрации речевых сигналов необходимо использовать другой фильтр шума или нейросеть для фильтрации и распознавания голоса, поскольку в настоящей версии фоновые шумы различной природы, накладываясь на полезный сигнал частично могут перекрывать его.

## Заключение

В рамках данной статьи выполнена разработка волоконно-оптического микрофона на слабоотражающих волоконно-оптических брэгговских решетках, данный датчик направлен на решение задач мониторинга состояния трубопроводов и охраны подводных и надводных периметров.

Проведен анализ современных схем волоконно-оптических микрофонов. На основе анализа выбрана схема построения волоконно-оптического квази-распределенного датчика акустических воздействий (волоконно-оптического микрофона). Описан и смоделирован процесс преобразования сигнала в рассматриваемой системе, на основе теоретической проработки и математического моделирования разработаны структурно-функциональная и оптическая схемы прибора.

---

## Библиография

1. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 324 с.
2. Бутусов М.М., Галкин С.Л., Оробинский С.П., Пал Б.П. Волоконная оптика и приборостроение. Л., 1990. 88 с.
3. Гладких Б.А. Информатика: Введение в специальность. Томск: Издательство научно-технической литературы, 2002. 350 с.
4. Ветров А. А. и др. Виброакустические волоконно-оптические микромеханические системы //Биотехносфера. – 2011. – №. 1-2 (13-14). – С. 53-65.
5. Андрианов С. Н. и др. Оптический микрофон на основе суженного волокна //Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84. – №. 12. – С. 1735-1738.
6. Дианов Е. М. Волоконная оптика: сорок лет спустя //Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – №. 1. – С. 1-6.
7. Мунконов Д. С., Шашев Д. В., Юрченко В. И. Исследование технологии оптического микрофона //Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты. – 2017. – С. 362-366.
8. Удд Э. Волоконно-оптические датчики: вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
9. Дианов Е. М., Прохоров А. И. Лазеры и волоконная оптика //Фотон-экспресс. – 2016. – №. 1 (129). – С. 8-17.
10. Headley C., Agrawal G.P. Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems. New York: Academic Press, 2005. 374 p.

## Development of a fiber optic microphone

**Arina D. Potapova**

Bachelor,  
Employee of the Laboratory of the Scientific Educational Centre  
“Photonics and IR-Technology”,  
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman  
(National Research University),  
105005, 5 2-Ya Baumanskaya str., Moscow, Russian Federation;  
e-mail: potapovaarina@mail.ru

### Abstract

The object of the study is a fiber-optic distributed acoustic impact sensor, applicable for use over an extended work area. The goal of the work is to develop a fiber-optic microphone with the following parameters: measurement range - at least 60 km; spatial resolution – no worse than 20 m; the frequency range of the recorded acoustic signal is from 5 Hz to 1.5 KHz. This goal is achieved by solving the following problems: analysis of possible schemes for constructing a fiber-optic microphone; the use of low-reflective fiber-optic Bragg gratings; development of a mathematical model of a fiber-optic microphone; development of a prototype fiber microphone for experimental studies of the accuracy of recording acoustic signals. During the work, software was used to analyze and process optical signals obtained during research into the distributed fiber-optic microphone being developed. An original scheme has been developed for constructing a fiber-optic microphone for recording acoustic signals with the possibility of application in high-risk areas and an algorithm for processing and filtering signals received during the course of an acoustic sensor, as well as in the development of a mathematical model for theoretically determining the location and magnitude of acoustic impact at several points of the fiber -optical microphone.

**For citation**

Potapova A.D. (2024) Razrabotka volkonno-opticheskogo mikroфона [Development of a fiber optic microphone] *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 14 (5A), pp. 662-668.

**Keywords**

Fiber optic microphone, sensor, mathematical model, acoustic signals.

**References**

1. Agraval G. (1996) *Nelineinaya volokonnaya optika* [Nonlinear fiber optics]. Moscow: Mir Publ.
2. Butusov M.M., Galkin S.L., Orobinskii S P., Pal B.P. (1990) *Volokonnaya optika i priborostroenie* [Fiber optics and instrumentation]. Leningrad
3. Gladkikh B.A. (2002) *Informatika: Vvedenie v spetsial'nost'* [Computer science: Introduction to the specialty]. Tomsk: Izdatel'stvo nauchno-tekhnicheskoi literatury Publ.
4. Andrianov S. N. et al. Optical microphone based on a narrowed fiber // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. The series is physical.* – 2020. – vol. 84. – no. 12. – pp. 1735-1738.
5. Dianov E. M. Fiber optics: forty years later // *Quantum electronics.* - 2010. – Vol. 40. – No. 1. – pp. 1-6.
6. Munkonov D. S., Shashev D. V., Yurchenko V. I. Investigation of optical microphone technology // *Fundamental scientific research: theoretical and practical aspects.* - 2017. – pp. 362-366.
7. Udd E. *Fiber-optic sensors: an introductory course for engineers and scientists.* M.: Technosphere, 2008. 520 p.
8. Dianov E. M., Prokhorov A. I. *Lasers and fiber optics* // *Photon Express.* – 2016. – №. 1 (129). – Pp. 8-17.
9. Headley C., Agrawal G.P. (2005) *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems.* New York: Academic Press.
10. Udd E. (2008) *Volokonno-opticheskie datchiki: vvodnyi kurs dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Fiber optic sensors: an introductory course for engineers and scientists]. Moscow: Tekhnosfera Publ.