

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 681.586.4

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ
РАСПРЕДЕЛЕННОГО ВОЛОКОННОГО МИКРОФОНА
НА ОСНОВЕ ϕ -OTDR ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ¹**

© 2023 г. М. В. Орлова^{a,*}, Т. В. Гриценко^a, А. А. Жирнов^a, Ю. А. Константинов^b,
А. Т. Туров^b, А. Б. Пнев^a, В. Е. Карасик^a

^aМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

^bПермский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Россия, 614990, Пермь, ул. Ленина, 13а

*e-mail: manja254@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 12.03.2023 г.

Принята к публикации 21.04.2023 г.

Проведено исследование оптимальных параметров схемы распределенного волоконного микрофона на основе лабораторной установки фазочувствительного оптического рефлектометра (ϕ -OTDR), воспроизводящей работу ϕ -OTDR по одной точке. Исследованы различные схемы построения микрофона на основе ϕ -OTDR и различные значения частоты дискретизации аналого-цифрового преобразователя. Обоснована оптимальная конфигурация схемы ϕ -OTDR, которая позволила обеспечить высокое качество распознавания человеческой речи при регистрации голоса предложенным способом с частотой дискретизации 40 кГц. В стандартной фразе, составленной на основе гарвардских предложений, содержащей 80 слов, было распознано 71 слово, т. е. 88.75% от их общего количества.

DOI: 10.31857/S0032816223050208, EDN: ZVBEJN

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день оптическое волокно получило чрезвычайно широкое распространение. На его основе создают устройства, применяемые во многих областях науки и техники, используемые в различных сферах человеческой жизни. Одним из наиболее распространенных применений оптического волокна является его использование в качестве сенсорного элемента в волоконно-оптических датчиках для измерения различных физических параметров окружающей среды [1–3]. В 1977 году было показано [4], что акустические воздействия влияют на параметры излучения, распространяющегося в волокне, что продемонстрировало возможность создания волоконно-оптического микрофона, и на сегодняшний день такие устройства представляют высокий интерес для потенциальных пользователей. Волоконно-оптический микрофон имеет следующие существенные преимущества перед обыкновенными мембранными электронными микрофонами: компактность и малая масса, что позволяет раз-

местить его в труднодоступных местах, возможность записи звуковой информации без электромагнитных помех, поскольку оптическое волокно нечувствительно к электромагнитным наводкам, возможность размещения микрофона в пожароопасных зонах, в условиях повышенных температур, кроме того, волоконный микрофон может быть включен в волоконную линию связи для записи информации и ее непосредственной передачи, что делает волоконно-оптические микрофоны перспективными устройствами для применения в системах связи. Широкое применение в разведке полезных ископаемых на морском шельфе, системах подводной охраны периметра и гидроакустической связи нашли также волоконно-оптические гидрофоны [5]. Особенно большой интерес представляют распределенные волоконные микрофоны, поскольку такие устройства позволяют регистрировать речевые сигналы не только в одной точке объекта, но и на всем протяжении сенсорного волокна, с определением координаты акустического воздействия на волоконный кабель. Распределенный волоконный микрофон может применяться в качестве самостоятельной системы, позволяющей получать информацию о речевых сигналах и координате их

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2023”, Россия, Пермь, 24–26 мая 2023 г. (International conference “Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2023”, Russia, Perm, 24–26, May 2023).

источника, или для существенного расширения функционала охранных систем и систем мониторинга протяженных объектов — трубопроводов, железнодорожных путей, границ закрытых объектов, соответственно, для предотвращения и обнаружения утечек, несанкционированных врезок, проникновений на территорию. Примером такой системы мониторинга, широко применяющейся на данный момент, является фазочувствительный оптический рефлектометр (ф-OTDR) [6], который позволяет контролировать объекты протяженностью до 80 км с погрешностью определения координаты акустических воздействий до 10 м. Принцип формирования сигнала в ф-OTDR заключается в том, что в сенсорное волокно посылается короткий лазерный импульс, который претерпевает рэлеевское рассеяние. В результате интерференции формируется рефлектограмма, вид которой зависит от местоположения и параметров воздействия [7]. Получая в течение времени последовательность рефлектограмм, можно сформировать трехмерное представление сигнала, так же называемое водопадом, по виду которого судят о частоте, местоположении и типе источника воздействия.

Распределенный волоконно-оптический микروفон на основе ф-OTDR позволяет регистрировать речь вдоль сенсорного волокна с высоким разрешением [8] и в широкой полосе частот [9], при этом для мониторинга протяженного объекта не требуется устанавливать массив точечных микрофонов. За последние годы разными исследовательскими группами проводились работы с целью создания распределенного волоконного микрофона на основе ф-OTDR [10–13]. Было продемонстрировано, что ф-OTDR позволяет регистрировать звуковые воздействия колонками на заданных частотах 2–3 кГц, которые можно впоследствии восстановить из полученных сигналов и воспроизвести [11]. В работе [12] микрофоном на основе ф-OTDR был записан алфавит английского языка, продиктованный через громкоговоритель, а в работах [10, 13] авторы зарегистрировали при помощи такого микрофона речь человека, также усиленную через громкоговоритель до уровня громкости 85 дБС с частотной коррекцией С, учитывающей вклад низкочастотной и высокочастотной составляющих. В работе [14] отмечено, что в данный момент исследователи (например, [15]) используют весьма субъективные критерии для определения читаемости записанных сенсором слов, поэтому данный показатель необходимо охарактеризовать количественно. Авторы предлагают использовать для этого известные сервисы распознавания речи. Также актуальным остается вопрос подбора оптимальных параметров схемы ф-OTDR для обеспечения наиболее высокого качества регистрации речи для возможности ее дальнейшего воспроизведения и высокоточного распознавания

слов, содержащихся в ней. Данная работа посвящена исследованию влияния таких параметров схемы ф-OTDR, как частота посылки импульсов в линию и требуемое усиление излучения, направляемого в линию и рассеивающегося в ней, на качество регистрации человеческой речи.

2. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ВОЛОКОННОГО МИКРОФОНА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

Основными техническими параметрами ф-OTDR являются пространственное разрешение, определяемое длительностью посылаемого в линию импульса, и максимальная длина сенсора, связанная с частотой отправки импульсов в линию. Для создания высокоточного волоконного микрофона необходимо провести исследование качества распознавания речи фазочувствительным оптическим рефлектометром при различных значениях длительности импульсов и частоте их отправки в линию. Для того чтобы легко варьировать параметры схемы ф-OTDR, была разработана и собрана экспериментальная установка, имитирующая работу фазочувствительного рефлектометра для одной точки, т. е. для участка линии, опрашиваемого одним импульсом лазерного излучения. Схема установки представлена на рис. 1а. Излучение узкополосного лазера NKT Koheras Mikro с центральной длиной волны 1550 нм посредством циркулятора направлялось в сенсорное волокно длиной $L = 20$ м, намотанное на пьезоэлектрический преобразователь, на который подавались электрические сигналы, амплитуда которых варьировалась в соответствии с электрическим сигналом воспроизведения аудиофайла с тестовыми фразами, и, таким образом, осуществлялось модельное воздействие на одну точку рефлектометра, как если бы в линию направлялись импульсы длительностью 200 нс. Обратное-рассеянное излучение после интерференции через циркулятор поступало на приемник излучения Femto LCA-S-400K-IN-FS, далее сигнал оцифровывался АЦП L-Card E20-10 с варьiruемой частотой дискретизации $\nu_{\text{АЦП}}$ и поступал на ПК для последующей обработки по заданному алгоритму и распознавания. В схеме обычного ф-OTDR в сенсорную линию направляется импульсное излучение, формируемое акустооптическим модулятором, и один импульс опрашивает одну точку сенсора, при этом для дискретизации сигнала по оси координат, которая обычно составляет десятки МГц, требуется высокоскоростной АЦП. Поскольку установка имитирует опрос только одной точки сенсора ф-OTDR, для оцифровки сигнала по времени можно использовать весь частотный диапазон АЦП. Это упрощает схему экспериментальной установки, так как не требуется дискретизация сигнала по оси координат, и в таком случае

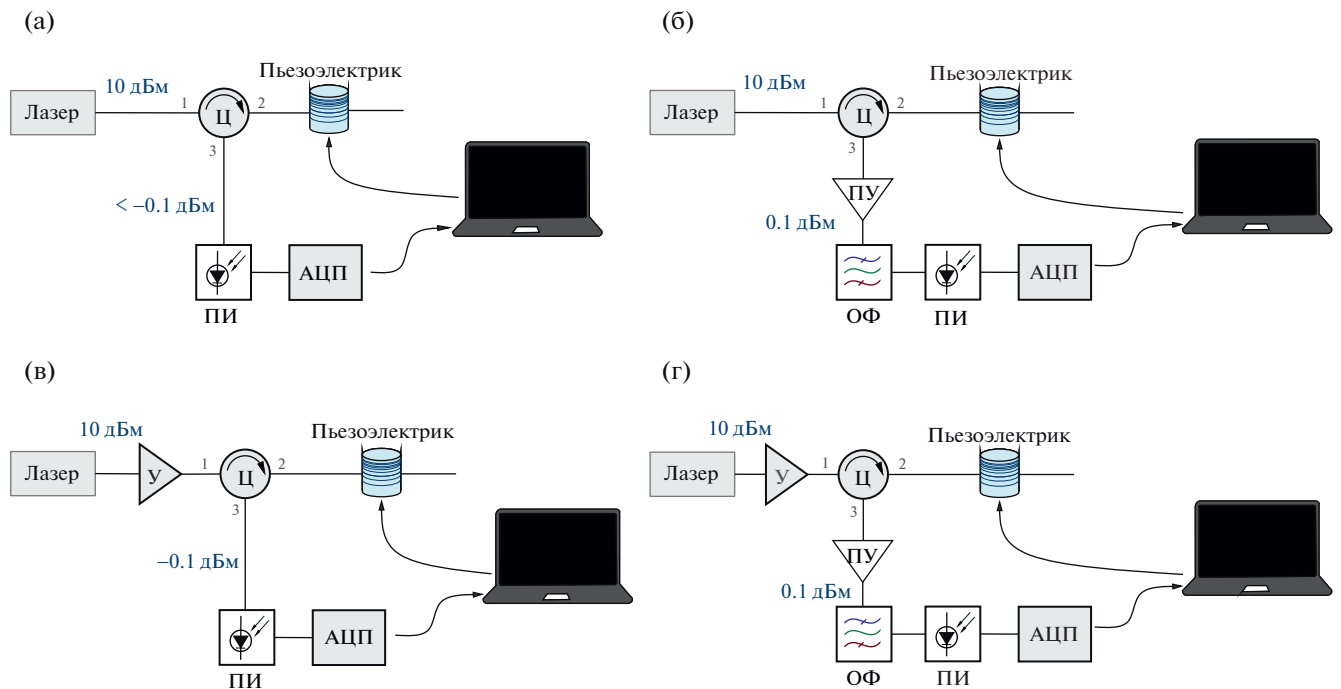


Рис. 1. Конфигурации схемы распределенного волоконно-оптического микрофона на основе ϕ -OTDR: **а** — без усиления излучения; **б** — с усилением обратно-рассеянного излучения предусилителем; **в** — с усилением направляемого в линию излучения бустером; **г** — с усилением излучения бустером и предусилителем совместно (АЦП — аналого-цифровой преобразователь, ПИ — приемник излучения, ПУ — предусилитель, Ц — циркулятор, ОФ — оптический фильтр).

достаточно использовать АЦП с частотой дискретизации до 100 кГц и непрерывное излучение лазера. Изменение $\nu_{\text{АЦП}}$ в предложенной установке эквивалентно изменению частоты посылки импульсов в линию ϕ -OTDR. Так, например, частота дискретизации 40 кГц соответствует случаю, как если бы в линию отправлялись импульсы с частотой следования 25 мкс. Подобрать $\nu_{\text{АЦП}}$ модельной установки, можно определить минимальные и оптимальные требуемые параметры электрической схемы реального ϕ -OTDR для обеспечения высокой точности распознавания речи.

Электрический сигнал аудиофайла, подаваемый на пьезоэлектрический преобразователь, представлял собой зачитываемый сервисом Google Translate текст. В качестве тестового речевого сигнала были выбраны гарвардские предложения на английском языке — фонетически сбалансированные стандартизированные фразы, разработанные для оценки качества передачи речевых сигналов по линии связи в 1965 году [16]. Из 720 гарвардских предложений были выбраны первые 10, таким образом, в тестовом речевом сигнале, воздействующем на сенсор, содержалось 80 слов.

Алгоритм обработки сигнала, получаемого с микрофона, состоял из двух этапов. Во-первых, проводилась предварительная обработка в виде фильтрации в полосе частот от 500 Гц до 4 кГц для

увеличения отношения сигнал/шум в оцифрованном с приемника сигнале. Такая полоса частот выбрана на том основании, что основной вклад в уровень шума вносят частоты, находящиеся ниже 500 Гц [13], а частоты выше 4 кГц практически не вносят вклада в разборчивость речи [17]. После предварительной обработки сигнал преобразовывался в формате WAV и загружался на открытые сервисы по распознаванию речи — “Yandex SpeechKit” и “Whisper”, — после чего полученные аудиозаписи подвергались транскрипции и вычислялось количество правильно распознанных слов.

Поскольку обратно-рассеянный сигнал, поступающий на приемник излучения, мал, необходимо включать в схему усилители сигнала для увеличения отношения сигнал/шум на приемнике излучения. С одной стороны, можно производить усиление обратно-рассеянного излучения, в таком случае необходимо включить в схему предусилитель и оптический фильтр для отсека спонтанных шумов предусилителя, как показано на рис. 1б. В то же время можно увеличить мощность излучения, направляемого в линию при помощи бустера, как показано на рис. 1в. Также целесообразно использовать бустер и предусилитель совместно, как показано на рис. 1г, для повышения точности распознавания речи при подобранном оптимальном сочетании пара-

Таблица 1. Результаты транскрибации для разных конфигураций схемы распределенного волоконно-оптического микрофона на основе ф-OTDR

Конфигурация схемы ф-OTDR	Количество распознанных слов	
	Сервис распознавания речи “Yandex SpeechKit”	Сервис распознавания речи “Whisper”
Без усиления сигнала (рис. 1а)	0	0
Усиление обратно-рассеянного излучения (рис. 1б)	62	71
Усиление излучения на входе в линию (рис. 1в)	41	62
Совместное использование бустера и предусилителя (рис. 1г)	0	0

Таблица 2. Зависимость числа правильно распознанных слов от частоты дискретизации АЦП

$\nu_{\text{АЦП}}$, кГц	Количество распознанных слов	
	Сервис распознавания речи “Yandex SpeechKit”	Сервис распознавания речи “Whisper”
3	0	25
5	38	63
10	50	58
20	57	70
40	62	71

метров двух усилителей, что также является наиболее приближенным вариантом к схеме построения ф-OTDR. Шум предусилителя в таком случае будет являться основным источником помехи, если лазерный источник обладает достаточной стабильностью и меньше искажает сигнал.

Было исследовано качество распознавания речевых сигналов для четырех схем распределенного волоконно-оптического микрофона на основе ф-OTDR. В ходе каждого эксперимента было записано 10 гарвардских предложений с частотой дискретизации АЦП 40 кГц. Результаты транскрибации для каждой конфигурации схемы представлены в табл. 1.

Как видно из представленных результатов, при отсутствии усиления сигнала, а также при

совместном использовании бустера и предусилителя, не удается обеспечить правильное распознавание слов, что связано с низким и недостаточным для корректной работы отношением сигнал/шум на выходе системы, в первом случае возникающим из-за низкой мощности полезного обратно-рассеянного сигнала (менее -0.1 дБм), а во втором — из-за высокого уровня шумов при совместной работе бустера и предусилителя. Использовать два усилителя при малой протяженности линии нецелесообразно. При усилении обратно-рассеянного сигнала удается добиться более точного распознавания слов, чем при усилении излучения на входе в линию. Для схемы с усилением обратно-рассеянного сигнала предусилителем обеспечивается 77.5% и 88.75% правильно распознанных слов при использовании соответственно сервисов “Yandex SpeechKit” и “Whisper”. В случае увеличения мощности излучения на входе в линию при помощи бустера и при отсутствии предусилителя сервисы “Yandex SpeechKit” и “Whisper” позволяют получить соответственно 51.25% и 77.5% правильно распознанных слов. Результаты для схемы с бустером значительно хуже, однако для обеспечения достаточного отношения сигнал/шум на приемнике излучения необходимо значительно усиливать излучение лазера: требуемая мощность излучения на выходе бустера достигает 30 дБм для длины линии 20 м. При дальнейшем увеличении длины линии требуется также увеличивать усиление бустера, что нецелесообразно, так как допустимый уровень мощности на входе в линию ограничен порогом возникновения нелинейных эффектов и эксплуатационными характеристиками волокна. Таким образом, по техническим параметрам установки и по количеству распознанных слов схема, представленная на рис. 1б, была выбрана как оптимальная.

Для выбранной конфигурации схемы было проведено исследование качества распознавания речи в зависимости от частоты дискретизации АЦП $\nu_{\text{АЦП}}$. Было выбрано пять значений $\nu_{\text{АЦП}}$ в диапазоне 3–40 кГц, для каждого из которых был записан сигнал на выходе микрофона на основе ф-OTDR и проведено распознавание речи. Результаты представлены в табл. 2.

Анализируя представленные результаты, можно заметить, что с увеличением частоты дискретизации АЦП и, следовательно, с увеличением частоты посылки импульсов в сенсорное волокно, количество распознаваемых слов увеличивается и достигает 77.5% и 88.75% для сервисов соответственно “Yandex SpeechKit” и “Whisper”. При значении $\nu_{\text{АЦП}}$ меньше 5 кГц качество распознавания речи значительно снижается, в то же время при $\nu_{\text{АЦП}}$ более 20 кГц качество распознавания увеличивается незначительно.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами были изучены различные подходы макетирования распределенного микрофона для распознавания речи на основе ф-ОТДР. Исследование было проведено при варьировании частоты дискретизации аналого-цифрового преобразования. Представлен макет ф-ОТДР, обеспечивающий адекватное распознавание голоса при частоте дискретизации 40 кГц. В стандартной фразе, составленной на основе гарвардских предложений, содержащей 80 слов, было распознано 71 слово, т. е. 88.75% от их общего количества. Эти результаты обнадеживают и дают мотивацию для проведения новых экспериментов в данном направлении. Вариациям могут быть подвержены иные блоки оптического рефлектометра: могут меняться способ восстановления фазы излучения, типы детекторов и другие элементы. К тому же необходимо выработать единые критерии, которые бы характеризовали качество распознавания речи, записанной с помощью фазочувствительного оптического рефлектометра временной области.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа Т.В. Гриценко и А.А. Жирнова в части исследования шумов установки, координации работ (раздел 2) выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-00225); работа Ю.А. Константинова и А.Т. Турова в части идеи исследования и обсуждения результатов (разделы 2, 3) выполнена в рамках государственного задания № АААА-А19-119042590085-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhirnov A.A., Choban T.V., Stepanov K.V., Koshelev K.I., Chernutsky A.O., Pnev A.B., Karasik V.E. // *Sensors*. 2022. V. 22. P. 2772. <https://doi.org/10.3390/s22072772>
2. Nordin N.D., Abdullah F., Zan M.S.D., A Bakar A.A., Krivosheev A.I., Barkov F.L., Konstantinov Y.A. // *Sensors*. 2022. V. 22. P. 2677. <https://doi.org/10.3390/s22072677>
3. Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Sazonkin S.G., Choban T.V., Koshelev K.I., Chernutsky A.O., Pnev A.B., Novikov A.O., Yagodnikov D.A. // *Sensors*. 2021. V. 21. P. 7836. <https://doi.org/10.3390/s21237836>
4. Bucaro J.A., Dardy H.D., Carome E.F. // *J. Acoust. Soc. Am.* 1977. V. 62. P. 1302. <https://doi.org/10.1121/1.381624>
5. Bruno F.A., Janneh M., Gunda A., Kyselica R., Stajanca P., Werzinger S., Gruca G., Rijnveld N., Persiano G.V., Cutillo A., Pisco M., Cusano A. // *Opt. Las. Eng.* 2022. V. 160. P. 107269. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107269>
6. Stepanov K.V., Zhirno, A.A., Chernutsky A.O., Koshelev K.I., Pnev A.B., Lopunov A.I., Butov O.V. // *Sensors*. 2020. V. 20. P. 6431. <https://doi.org/10.3390/s20226431>
7. Choban T.V., Zhirnov A.A., Chernutsky A.O., Stepanov K.V., Pniiov A.B., Galzerano G., Karasik V.E., Svelto C. // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1410. P. 012108. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012108>
8. Peng F., Wu H., Jia X.-H., Rao Y.-J., Wang Z.-N., Peng Z.-P. // *Opt. Express*. 2014. V. 22. P. 13804. <https://doi.org/10.1364/OE.22.013804>
9. Liu K., Jin X., Jiang J., Xu T., Ding Zh., Huang Y., Sun Zh., Xue K., Li S., Liu T. // *IEEE Sens. J.* 20227 V. 22. P. 21428. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3213036>
10. Franciscangelis C., Margulis W., Kjellberg L., Soderquist I., Fruett F. // *J. Opt. Soc. Am.* 2016. V. 24. P. 29597. <https://doi.org/10.1364/OE.24.029597>
11. Zamarreno C.R., Martelli C., Daciuk R., Dutra G., Dreyer U.J., Cardozo Da Silva J.C., Matias I.R., Arregui F.J. // *IEEE Sensors*. 2017. V. 17. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8234126>
12. Wu Y., Gan J., Li Q., Zhang Z., Heng X., Yang Z. // *IEEE Photonics J.* 2015. V. 7. P. 1. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2499539>
13. Hao H., Pang Z., Wang G., Wang B. // *Opt. Express*. 2022. V. 30. P. 36774. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.05267>
14. Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Y.A., Lobach I.A. // *Sensors*. 2022. V. 22. P. 1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>
15. Tomboza W., Guerrier S., Awwad E., Dorize C. // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2021. V. 33. P. 645. <https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3084557>
16. McGee V.E., Pachl C.P., Voiers W.D. // *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1969. V. 17. P. 225. <https://doi.org/10.1109/TAU.1969.1162058>
17. Miller G.A., Licklider J.C.R. // In S.S. Stevens *Handbook of Speech Perception*. New York: John Wiley, 1951. P. 1040.