

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 681.586.4

КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФИЗО СО СЛАБОУТРАЖАЮЩИМИ ВОЛОКОННЫМИ БРЭГГОВСКИМИ РЕШЕТКАМИ¹

©2026 г. В. В. Куклин*, И. А. Баранцов, С. А. Низельник, А. В. Сибирцев,
Е. М. Рубцов, С. Д. Уткин, Т. М. Волков, А. Б. Пнёв

^a *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

**E-mail: kuklinvv@bmstu.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 08.05.2026

Принята к публикации 30.06.2026

Предложена и экспериментально реализована распределенная пассивная система акустического обнаружения для охраны периметров и мониторинга протяженных объектов. Чувствительный элемент выполнен в виде цилиндрической оправки с намоткой участка оптического волокна, расположенного между двумя последовательными слабоотражающими волоконными брэгговскими решетками. При акустическом воздействии оправка деформируется, растягивая витки намотки, что приводит к изменению оптической длины пути между решетками и, как следствие, к изменению интерференции отраженного излучения. Фазовая чувствительность разработанного датчика составила 4.08 рад/Па, а минимальное детектируемое звуковое давление в полосе 1 Гц достигло теоретического предела –5.84 дБ SPL. Показано, что на практике чувствительность ограничена шумами лазерного источника, фотоприемного тракта и эффектами поляризации. Спектральный рабочий диапазон системы определен как 20 Гц–20 кГц. Описанная конструкция позволяет снизить потребляемую оптическую мощность и обеспечивает возможность каскадирования нескольких десятков датчиков в одной линии. Создан экспериментальный макет, с помощью которого проведена успешная регистрация и локализация акустических событий, включая человеческую речь.

Ключевые слова: акустическое обнаружение, волоконно-брэгговская решетка, интерферометрический датчик, распределенная система, охрана периметра.

1. ВВЕДЕНИЕ

Системы акустического мониторинга протяженных объектов активно применяются в повседневной жизни для обеспечения функционирования различных объектов инфраструктуры. Такие системы зарекомендовали себя благодаря широкому спектру реализованных возможностей, таких как пассивность, всенаправленность и устойчивость к погодным

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

условиям. Однако традиционные системы на основе пьезоэлектрических или электретных микрофонов имеют ряд ограничений, препятствующих их широкому развертыванию на открытом воздухе, среди которых необходимость подвода питания к каждому датчику, потенциальная чувствительность к электромагнитным помехам, сложность синхронизации при большом количестве каналов и уязвимость к коррозии, что ограничивает срок их службы в неблагоприятных условиях [1, 2].

Альтернативой традиционным решениям выступают распределенные акустические системы (Distributed Acoustic Sensing, DAS) на базе фазочувствительного рефлектометра. В данной технологии датчиком является оптическое волокно, позволяющее регистрировать звуки, вибрации и деформации по всей его длине [3]. Системы DAS успешно применяются для мониторинга состояния конструкций, трубопроводов, охраны периметра и сейсмических наблюдений. Тем не менее широкому внедрению DAS-систем препятствует их относительно высокая стоимость, обусловленная в первую очередь использованием дорогостоящих лазерных источников с ультранизким фазовым шумом и сложной системы регистрации и обработки сигнала [4]. Кроме того, случайный характер рэлеевского рассеяния, на котором основаны стандартные DAS, приводит к неоднородной чувствительности вдоль волокна, к явлению замирания сигнала, а также к снижению отношения сигнал/шум с расстоянием [2].

Следующим шагом стала разработка конструкции чувствительного элемента с использованием технологии слабоотражающих волоконных брэгговских решеток (СВБР). В отличие от DAS, регистрирующих обратно распространяющееся излучение на основе рэлеевского рассеяния, микрофоны на базе СВБР позволяют значительно повысить мощность регистрируемого излучения и тем самым улучшить отношение сигнал/шум. Как отмечено в обзорной работе [1], применение массивов сверхслабых брэгговских решеток способно существенно увеличить интенсивность обратного рассеяния по сравнению с рэлеевским рассеянием в стандартном волокне, что повышает помехоустойчивость измерений. Данный подход хорошо зарекомендовал себя в задачах высокопроизводительного распределенного акустического зондирования, включая разведку нефтегазовых месторождений, мониторинг трубопроводов и охрану периметров.

Однако в существующих решениях чувствительность регистрации акустических событий остается недостаточной для обнаружения слабых сигналов в широком диапазоне частот. Например, для DAS-систем на основе рэлеевского рассеяния минимальный детектируемый уровень звукового давления в полосе 1 Гц составляет десятки децибел SPL, что не позволяет регистрировать тихие звуки [4]. Прямое воздействие акустической волны на оптическое волокно приводит к относительно малой деформации из-за высокого модуля упругости кварца. Решением является намотка волокна на конструкцию, преобразующую

акустическое давление в более выраженную деформацию. Такой подход позволяет существенно повысить чувствительность датчика за счет геометрического усиления.

Помимо чувствительности, важной проблемой является масштабируемость. Для многих существующих систем число датчиков, которые можно разместить в одной линии, ограничено из-за перекрестных помех между каналами. Как отмечено в работе [5], перекрестные помехи (crosstalk) являются основным фактором, ограничивающим производительность последовательных интерферометрических решеток на волоконных брэгговских решетках. Для слабоотражающих решеток максимальное количество датчиков обратно пропорционально коэффициенту отражения и зависит от требуемого отношения сигнал/шум [5]. При типичных параметрах систем такого типа удастся реализовать несколько десятков датчиков, что достаточно для периметров средней протяженности, но требует оптимизации.

Дополнительным ограничением является температурная нестабильность. В работе [6] подчеркивается, что шум в сверхнизкочастотной области, вызванный дрейфом частоты лазера и температурными флуктуациями, лимитирует применение распределенных волоконно-оптических систем для регистрации медленных процессов. Температурные изменения даже на доли градуса могут вызывать фазовые сдвиги, сопоставимые с акустическим сигналом, поэтому рабочий диапазон таких систем снизу ограничен частотами порядка единиц герц, где температурные дрейфы становятся пренебрежимо малыми.

Наконец, поляризационная нестабильность в стандартном одномодовом волокне приводит к флуктуациям видности интерференции и дополнительному фазовому шуму. Известно, что традиционные архитектуры систем распределенного акустического зондирования, устойчивые к поляризационным замираниям, отличаются высокой сложностью и отсутствием демодуляции в реальном времени, что ограничивает их практическое применение [7]. В нашей конфигурации эта проблема частично решается за счет использования коротких импульсов и временной селекции, однако остается одним из факторов, ограничивающих минимальный детектируемый уровень.

В настоящей работе предлагается устройство обнаружения, состоящее из массива акустических датчиков. Каждый датчик представляет собой участок волокна между двумя последовательными слабоотражающими брэгговскими решетками, намотанный на цилиндрическую оправку, внешний вид датчика изображен на рис. 1. Датчики подключены в линии последовательно, они образуют структуру, которая позволяет снизить потребление оптической мощности. Система включает в себя формирователь сканирующего импульса, приемник излучения и блок обработки сигнала. Проведены теоретический анализ чувствительности и экспериментальная демонстрация регистрации человеческой речи.

Рис. 1. Акустический датчик на основе слабоотражающих брэгговских решеток

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Метод

Предлагаемый метод основан на регистрации фазовых изменений оптического сигнала, возникающих при деформации чувствительного волокна под действием акустической волны. Для этого используется последовательность слабоотражающих волоконных брэгговских решеток (ВБР), записанных в одном оптическом волокне. Каждая пара соседних решеток образует интерферометр Физо: зондирующий импульс частично отражается от первой и второй решеток, а отраженные сигналы интерферируют на фотоприемнике. Изменение фазы интерференции пропорционально деформации участка волокна между решетками, вызванной акустическим давлением. Если датчики размещены вдоль контролируемого участка, то пространственное распределение фазовых откликов позволяет локализовать источник акустического события, а согласованное появление сигнала на нескольких соседних каналах служит признаком реального события, а не локальной помехи.

Конструктивной особенностью измерительного узла является намотка участка волокна между двумя решетками на цилиндрическую оправку. Такая конструкция позволяет преобразовать акустическое давление в более выраженную деформацию волокна: под действием звуковой волны оправка деформируется, увеличивая удлинение от деформации в зависимости от количества витков в намотке, что приводит к увеличению оптической разности хода между решетками. За счет этого возрастает чувствительность микрофона.

Методика обработки включает четыре последовательных этапа. Сначала для каждого зондирующего импульса на фотоприемнике регистрируется интенсивность обратно распространяющегося излучения, содержащего, в том числе, результат интерференции. Затем выполняется вычисление расстояния, которое прошли возвращенные импульсы, в результате которого для каждой пары решеток восстанавливается временной профиль акустического давления. После этого для всех каналов формируется единая пространственно-временная матрица (“водопад”), где по горизонтали отложено расстояние вдоль волокна, по вертикали – время наблюдения, а цветом кодируется амплитуда сигнала. На заключительном этапе для каждого канала отдельно вычисляется спектрограмма (время–частота–амплитуда), позволяющая идентифицировать тип акустического события по его спектральным признакам. Общая принципиальная схема устройства показана на рис. 2.

Рис. 2. Схема реализации распределенной системы акустического мониторинга

2.2. Акустическая чувствительность конструкции датчика

Чувствительность предлагаемого акустического датчика определяется способностью цилиндрической оправки преобразовывать внешнее звуковое давление в деформацию

намотанного на нее оптического волокна. Оправка представляет собой тонкостенный цилиндр, имеющий следующие геометрические параметры: внешний радиус a , высота H , толщина стенки t . На оправку намотано оптическое волокно с базой между решетками L_0 с диаметром d_f . Внутренний радиус цилиндра $b = a - t$. Относительное радиальное смещение внешней стенки определяется формулой Ламе [8]:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{p}{E} \left(\frac{(a^2 + b^2)}{(a^2 - b^2)} - \nu \right), \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона материала оправки.

Оптическое волокно жестко закреплено на поверхности цилиндрической оправки с использованием эпоксидной смолы. Относительная деформация волокна ε будет равна относительному изменению радиуса оправки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (2)$$

Использование цилиндрической оправки позволяет значительно увеличить деформацию волокна по сравнению с прямым акустическим воздействием, что было впервые продемонстрировано в работе [9]. Чувствительным элементом системы является интерферометр Физо, образованный двумя последовательными слабоотражающими волоконными брэгговскими решетками с базой L (где L – расстояние между решетками по волокну). Принципы построения таких интерферометров подробно рассмотрены в обзорной работе [10]. При деформации волокна фаза интерферирующих сигналов изменяется как за счет геометрического удлинения, так и за счет фотоупругого эффекта (изменения показателя преломления). Для световой волны с длиной волны λ и эффективным показателем преломления сердцевин n разность фаз между отраженными сигналами определяется выражением

$$\Delta\phi = \frac{4\pi n L_0}{\lambda}. \quad (3)$$

Изменение фазы на единицу давления можно выразить формулой [9, 11]

$$S = \frac{\Delta\phi}{p} = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) n \left(\frac{L_0}{a} \right) \frac{\Delta a}{p} \left\{ 1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [p_{12} - \nu_f (p_{11} + p_{12})] \right\}, \quad (4)$$

где p_{11} и p_{12} – тензооптические коэффициенты, ν_f – коэффициент Пуассона волокна.

Собственная радиальная резонансная частота цилиндрической оправки может быть оценена по формуле для тонкостенного цилиндра [8]:

$$f_r = \left(\frac{1}{2\pi a} \right) \sqrt{\frac{E}{\rho (1 - \nu^2)}}, \quad (5)$$

где ρ – плотность материала оправки. Вблизи этой частоты наблюдается рост чувствительности, а выше – спад. Однако для большинства акустических событий система работает в дорезонансной области, где частотная характеристика равномерна [12].

2.3. Влияние фазовых шумов лазера

Минимальное детектируемое акустическое давление в интерферометрической системе на основе слабоотражающих волоконных брэгговских решеток в значительной степени определяется фазовым шумом лазерного источника [4, 13]. В интерферометре Физо случайные флуктуации фазы лазерного излучения, приведенные к разности хода между отраженными сигналами, непосредственно ограничивают порог обнаружения.

Фазовый шум лазера характеризуется спектральной плотностью, размерность которой рад/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на единицу разбаланса плеч (обычно на 1 м). Для интерферометра с базой L_0 результирующий фазовый шум на выходе системы составляет

$$\Delta\varphi_{\text{noise}} = L_0 \delta\varphi_{\text{laser}}(f). \quad (6)$$

Типичные значения f для лазеров с узкой линией, применяемых в распределенных акустических системах, убывают с ростом частоты и имеют минимальные величины в области 0.1–1 кГц [4]. На низких частотах (единицы-десятки герц) доминирует фликкер-шум ($1/f$), на высоких – белый шум, определяемый квантовыми флуктуациями.

Минимальное детектируемое звуковое давление p_{min} находится из соотношения

$$p_{\text{min}} = \frac{\Delta\varphi_{\text{noise}}}{S}, \quad (7)$$

где S – фазовая чувствительность датчика, вычисленная по формуле (4). Чем выше чувствительность S и чем ниже фазовый шум лазера, тем меньшие акустические сигналы может регистрировать система.

2.4. Влияние изменений температуры

Помимо фазового шума лазерного источника, существенный вклад в минимальную детектируемую фазу вносят термодинамические флуктуации температуры самого оптического волокна [14]. Данный эффект является фундаментальным ограничением для волоконно-оптических интерферометров, он связан с двумя физическими механизмами: тепловым расширением волокна (изменение геометрической длины) и термооптическим эффектом (изменение показателя преломления сердцевины n) [15].

Полное изменение фазы, вызванное изменением температуры ΔT , получается из двух вкладов:

$$\Delta\varphi_{\text{temp}} = \frac{4\pi nL_0}{\lambda} (\alpha + \xi) \Delta T, \quad (8)$$

где α – коэффициент теплового расширения, ξ – термооптический коэффициент (thermo-optic coefficient, ТОС), описывающий изменение показателя преломления с температурой. Значения этих коэффициентов для кварцевого стекла известны и приводятся в литературе [14, 15].

В реальных условиях температура окружающей среды изменяется не мгновенно. Спектральная плотность мощности температурных флуктуаций имеет вид, близкий к $1/f^2$ (броуновский шум) на сверхнизких частотах, и спадает выше некоторой характерной частоты, определяемой теплоемкостью и теплопроводностью среды [13].

2.5. Влияние шумов фотоприемника

Чувствительность интерферометрической системы ограничивается не только фазовым шумом лазера, но и шумами фотоприемного тракта [16]. Основным источником шума в фотоприемном тракте является дробовой шум (shot noise) – он возникает из-за дискретной природы фотонов и носителей заряда в фотодетекторе. Спектральная плотность дробового шума определяется формулой Шоттки [16]:

$$i_{\text{shot}} = \sqrt{2e i_{\text{ph},0}}. \quad (9)$$

Тепловой шум (Johnson–Nyquist noise) возникает из-за хаотического теплового движения носителей заряда в резисторе обратной связи трансимпедансного усилителя. Спектральная плотность теплового шума описывается формулой Найквиста [16]:

$$i_{\text{th}} = \sqrt{\frac{4kT}{R_f}}. \quad (10)$$

Собственный шум фотоприемника включает в себя $1/f$ -шум (фликкер-шум) на низких частотах и другие паразитные шумы, определяемые конструкцией фотоприемника. Значение собственного шума приводится в технической документации на конкретный компонент.

Шум квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) возникает при дискретизации аналогового сигнала. Среднеквадратичное значение шума квантования для АЦП с разрядностью N и входным диапазоном U_{FS} составляет [17]

$$U_{q,\text{rms}} = \frac{U_{\text{FS}}}{2^N \sqrt{12}}. \quad (11)$$

На практике в зависимости от параметров системы (чувствительность фотоприемника, мощность лазера, разрядность АЦП) доминирующим источником широкополосного шума может быть либо дробовой шум фотодетектора, либо шум квантования АЦП, либо собственный

шум фотоприемника. На низких частотах (единицы-сотни герц) дополнительный вклад вносит $1/f$ -шум электронных компонент и лазера.

2.6. Влияние поляризации

В работе используется стандартное одномодовое волокно, не сохраняющее поляризацию. В интерферометре Физо видность интерференции γ зависит от угла θ между поляризационными состояниями интерферирующих пучков следующим образом:

$$\gamma = |\cos(\theta)|. \quad (12)$$

При $\theta = \pi/2$ поляризационные состояния ортогональны и интерференционный сигнал полностью исчезает. В реальных условиях из-за температурных и механических воздействий состояние поляризации в волокне дрейфует, что приводит к флуктуациям видности γ и появлению дополнительного поляризационно-индуцированного фазового шума, который ограничивает чувствительность системы [18, 19].

Влияние поляризационной нестабильности на отношение сигнал/шум (SNR) можно описать моделью, согласно которой результирующее SNR определяется по формуле

$$\text{SNR} = \left[\frac{\gamma^2}{(\gamma^2 + \sigma_{\text{PIN}}^2)} \right] \text{SNR}_0, \quad (13)$$

где σ_{PIN}^2 — среднеквадратичная амплитуда поляризационного фазового шума, а SNR_0 — отношение сигнал/шум в отсутствие поляризационных эффектов. Значение σ_{PIN} зависит от типа волокна, длины интерферометрической базы и внешних условий [20]. При высоких значениях видности γ , близких к единице, вклад поляризационного шума в SNR минимален. Однако при случайном дрейфе поляризации в состояние $\gamma \rightarrow 0$ сигнал может пропадать почти полностью. Таким образом, поляризационная нестабильность является одним из существенных факторов, ограничивающих минимальный детектируемый уровень акустического давления, особенно в системах со стандартным одномодовым волокном. Конкретные количественные оценки поляризационного шума для реализованного экспериментального макета приведены в экспериментальной части.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проверки работоспособности предложенной системы был изготовлен экспериментальный макет, включающий лазер NKT Photonics Koheras BASIK X15, циркулятор, последовательность слабоотражающих волоконных брэгговских решеток с базой между

соседними решетками $L_0 = 20$ м, а также фотоприемный тракт на основе фотодетектора PWPR-2K-SI и 14-битного АЦП Icard E20-10 с частотой дискретизации 50 кГц.

Чувствительный элемент выполнен в виде цилиндрической оправки из поликарбоната с внешним радиусом $a = 3.94$ см, толщиной стенки $t = 0.75$ мм и высотой $H = 60$ мм. Участок волокна между двумя решетками намотан на оправку виток к витку. Намотка осуществлялась на стенде с электродвигателем с регулируемой скоростью вращения, счетчиком оборотов и направляющей, представленном на рис. 3.

Рис 3. Стенд намотки

Оправка закреплена на оси вращения двигателя с помощью зажимающей втулки с продольным вырезом, изготовленной из поликарбоната, зажатие оправки осуществляется двумя закручивающимися к торцам алюминиевыми конусами, которые надежно фиксируют оправку от прокручивания на оси двигателя. Для обеспечения точной укладки “виток к витку” использовалась латунная направляющая с резьбой (шаг 0.25 мм), вращение которой согласовывалось через ременную передачу с вращением оправки. Перед намоткой оправка покрывалась эпоксидной смолой. Волокну перед подачей на намотчик придано натяжение, а катушка с волокном установлена на оси свободно перед намотчиком, ось катушки параллельна оси вращения двигателя. Длина наматываемого участка между решетками составляла 20 м, что при длине окружности оправки 24.75 см дает $N = 80$ витков с учетом дополнительного волокна до и после решеток. После намотки оправку оставляли на несколько часов для полимеризации при комнатной температуре. Готовый микрофон представлен на рис. 4. Фазовая чувствительность датчика, рассчитанная по формуле (4), составила $S = 4.08$ рад/Па. Фазовый шум лазера, приведенный к базе интерферометра, согласно паспортным данным, для частоты 1 кГц равен $\Delta\varphi_{\text{noise}} = 1.6 \cdot 10^{-4}$ рад/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Тогда по формуле (7) минимальное детектируемое звуковое давление в полосе 1 Гц равно $p_{\text{min}} = 3.92 \cdot 10^{-5}$ Па, что соответствует уровню 5.84 дБ SPL.

Рис 4. Изготовленный микрофон

Температурные флуктуации, описываемые формулой (8), вносят фазовый сдвиг порядка 1141 рад/К, что ограничивает рабочий диапазон снизу частотами около 1 Гц. Собственная радиальная резонансная частота оправки (5) составляет 6.1 кГц, выше этой частоты чувствительность падает. С учетом частоты дискретизации АЦП (50 кГц, предел Найквиста 25 кГц) надежный спектральный рабочий диапазон системы определен как 20 Гц – 20 кГц.

В стандартном одномодовом волокне даже при отсутствии внешних воздействий состояние поляризации дрейфует, что может вызывать периодическое пропадание сигнала (при $\gamma \rightarrow 0$) и дополнительное снижение отношения сигнал/шум, особенно на низких частотах. На практике этот эффект частично подавляется временной селекцией импульсов, но полностью устранить его не удастся.

Важно также отметить, что в любых реальных условиях, даже в заглушенной камере или тихом лабораторном помещении, существует фоновый акустический шум с уровнем не менее 20–30 дБ SPL (естественные воздушные потоки, удаленные звуки, вибрации здания). Прямая калибровка с эталонным микрофоном не проводилась из-за отсутствия сертифицированного измерительного тракта. Регистрация речи и акустических событий подтверждает работоспособность системы. Достижение теоретического предела 5.84 дБ SPL ограничено естественным акустическим фоном лаборатории (около 25 дБ SPL). Этот фоновый шум маскирует сигналы, близкие к теоретическому пределу чувствительности. Поэтому оценка минимального детектируемого давления на уровне 5.84 дБ SPL имеет скорее теоретическое значение; для практических задач охраны периметра и мониторинга протяженных объектов реальная чувствительность системы (единицы дБ SPL) является вполне достаточной.

Для корректной экспериментальной оценки минимального детектируемого звукового давления, которого способна достичь разработанная система, требуются прецизионные измерения с использованием эталонного микрофона (например, измерительного конденсаторного типа), способного регистрировать сигналы на уровне единиц децибел SPL и ниже. В качестве источника акустического поля необходимо применять калиброванный излучатель, генерирующий звуковое давление в диапазоне от отрицательных значений (ниже порога слышимости) до типичных уровней, с известной амплитудно-частотной характеристикой. Обязательным условием является заглушенная акустическая камера с уровнем собственного шума, близким к абсолютной тишине (практически – значительно ниже регистрируемых сигналов), поскольку в обычных лабораторных условиях внешние шумы маскируют полезный сигнал и не позволяют достичь теоретического предела чувствительности.

Аналогичные сложности возникают и при определении спектральной чувствительности (фазового отклика на единицу звукового давления как функции частоты). Необходим источник с максимально равномерной АЧХ в диапазоне 20 Гц – 20 кГц, что само по себе является нетривиальной задачей. Кроме того, помещение для калибровки должно быть оснащено звукопоглощающими конструкциями (акустическими ловушками), чтобы полностью подавить отражения от стен, пола и потолка. В противном случае отраженные волны создают интерференционную картину и локальные усиления сигнала, приводя к систематическим погрешностям при определении истинной чувствительности датчика.

В эксперименте с диктором на расстоянии 2 м (речевой сигнал с уровнем 30–35 дБ SPL) зарегистрированная спектрограмма с отфильтрованными шумами (рис. 5) показала четкие форманты в диапазоне 200–3500 Гц, характерные для человеческой речи. Пространственно-временная матрица (рис. 6) для группы из трех последовательных датчиков подтвердила локализацию источника – сигнал присутствовал только на первом канале.

Рис. 5 Временная спектограмма записанной речи

Рис. 6 Пространственно-временная матрица сигнала на приемнике (водопад)

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена и экспериментально реализована квазираспределенная пассивная система акустического обнаружения на основе интерферометров Физо, образованных последовательно слабоотражающих волоконных брэгговских решеток. Чувствительный элемент выполнен в виде цилиндрической оправки с намоткой участка волокна между двумя соседними решетками, что обеспечивает значительное геометрическое усиление акустического сигнала.

В теоретической части работы получены аналитические выражения, связывающие фазовую чувствительность датчика с геометрическими и упругими параметрами оправки (формулы (1)–(5)). Для изготовленного макета (оправка из поликарбоната с внешним радиусом 3.94 см, толщиной стенки 0.75 мм и базой интерферометра 20 м) фазовая чувствительность составила 4.08 рад/Па, а минимальное детектируемое давление, определяемое фазовым шумом лазера, достигло теоретического предела 5.84 дБ SPL в полосе 1 Гц. Однако на практике из-за шума квантования АЦП, поляризационной нестабильности, $1/f$ -шумов и естественного акустического фона лабораторного помещения (20–30 дБ SPL) реальная чувствительность системы ограничена единицами дБ SPL, что, тем не менее, достаточно для регистрации широкого класса акустических событий.

Проведен анализ основных ограничивающих факторов. Температурные флуктуации, дающие фазовый сдвиг около 1141 рад/К, ограничивают рабочий диапазон снизу частотами примерно 20 Гц (с учетом вибраций и акустического фона), а собственная радиальная резонансная частота оправки (6.1 кГц) и спад чувствительности выше 10–15 кГц определяют верхнюю границу. С учетом частоты дискретизации АЦП (50 кГц) надежный спектральный рабочий диапазон системы установлен как 20 Гц – 20 кГц. Показано, что шум квантования АЦП вносит основной вклад в широкополосный шум на высоких частотах, а поляризационная нестабильность стандартного одномодового волокна приводит к дополнительным флуктуациям видности интерференции, что частично подавляется временной селекцией импульсов.

Экспериментально подтверждена способность системы регистрировать и локализовать акустические источники. Речевой сигнал с уровнем 30–35 дБ SPL на расстоянии 2 м уверенно детектируется, о чем свидетельствуют формантные структуры на спектрограмме.

Предложенная система обладает рядом преимуществ: пассивностью (не требует питания на датчиках), электромагнитной совместимостью, возможностью развертывания вдоль протяженных объектов без питающих линий, а также масштабируемостью.

Тем не менее, уже сейчас разработанная система может найти промышленное применение в задачах мониторинга состояния узлов оборудования, охраны периметров и контроля протяженных инфраструктурных объектов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания МГТУ им. Н. Э. Баумана (FSFN-2024-0060).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang Y., Xu B., Chen G., et al. Sensors. 2026. V. 26. № 2. P. 742. <https://doi.org/10.3390/s26020742>
2. Gabai H., Shpatz I., Eyal A. Opt. Lett. 2017. V. 42. № 21. P. 4529. <https://doi.org/10.1364/ol.42.004529>
3. Mao X., Xu X. 2022 20th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). IEEE. 2022. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ICOON55511.2022.9901090>
4. Wang Z., Zhang L., Wang S., et al. Opt. Express. 2016. V. 24. № 2. P. 853. <https://doi.org/10.1364/oe.24.000853>
5. Qi Y., Xiong S., Yu Y., Shang F., Ma L. Opt. Express. 2022. V. 30. № 23. P. 41374. <https://doi.org/10.1364/OE.470253>
6. Shi J., Yan B., Fan C. et al. 2021 IEEE Optical Fiber Communications Conference (OFC). 2021. P. 183. <https://doi.org/10.1109/OFC52961.2021.9654408>
7. Wang Y., Huangfu S., Gao H., et al. Opt. Lett. 2026. V. 51. № 5. P. 1243. <https://doi.org/10.1364/ol.588371>
8. Timoshenko S., Goodier J. N. Theory of Elasticity. New York: McGraw-Hill, 1970.
9. Bucaro J.A., Dardy H.D., Carome E.F. J. Acoust. Soc. Am. 1977. V. 62. № 5. P. 1302. <https://doi.org/10.1121/1.381624>
10. Rao Y.-J. Opt. Fiber Technol. 2006. V. 12. № 3. P. 227. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2006.03.004>
11. Bertholds A., Dandliker R. J. Lightw. Technol. 1988. V. 6. № 1. P. 17. <https://doi.org/10.1109/50.3956>

12. *Yang Y., Chang T., Yu M., et al.* IEEE Sens. J. 2022. V. 22. № 20. P. 19346.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3201908>
13. *Hartog A.H.* An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. Boca Raton: CRC Press, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315119014>
14. *Wanser K. H.* Electron. Lett. 1992. V. 28, № 1. P. 5354. <https://doi.org/10.1049/el:19920033>.
15. *Waxler R.M., Cleek G.W. J.* Res. Natl. Bur. Stand. Sect. A Phys. Chem. 1973. V. 75A. № 4. P. 755. <https://doi.org/10.6028/jres.075a.030>
16. *Kingston R.H.* Optical Sources, Detectors, and Systems: Fundamentals and Applications. San Diego: Academic Press, 1995.
17. *Kester W.* Which ADC Architecture Is Right for Your Application? Analog Dialogue 39-06, June (2005) <https://www.researchgate.net/publication/228761926>
18. *Kersey A.D., Marrone M.J., Davis M.A.* Electron. Lett. 1991. V. 27. № 6. P. 518. <https://doi.org/10.1049/el:19910325>
19. *Froggatt M., Moore J.* Appl. Opt. 1998. V. 37. № 10. P. 1735. <https://doi.org/10.1364/ao.37.001735>
20. *Lin H., Ma L., Hu Y., Wang W.* Optik. 2013. V. 124. № 21. P. 4976. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.03.033>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Акустический датчик на основе слабоотражающих брэгговских решеток

Рис. 2. Схема реализации распределенной системы акустического мониторинга

Рис. 3. Стенд намотки

Рис. 4. Изготовленный микрофон

Рис. 5. Временная спектограмма записанной речи

Рис. 6. Пространственно-временная матрица сигнала на приемнике (водопад)

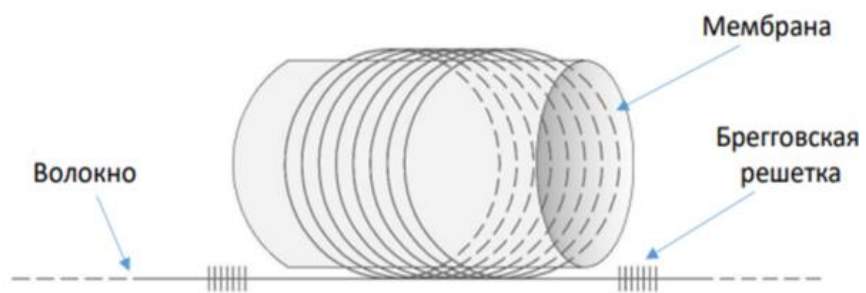


Рис. 1.

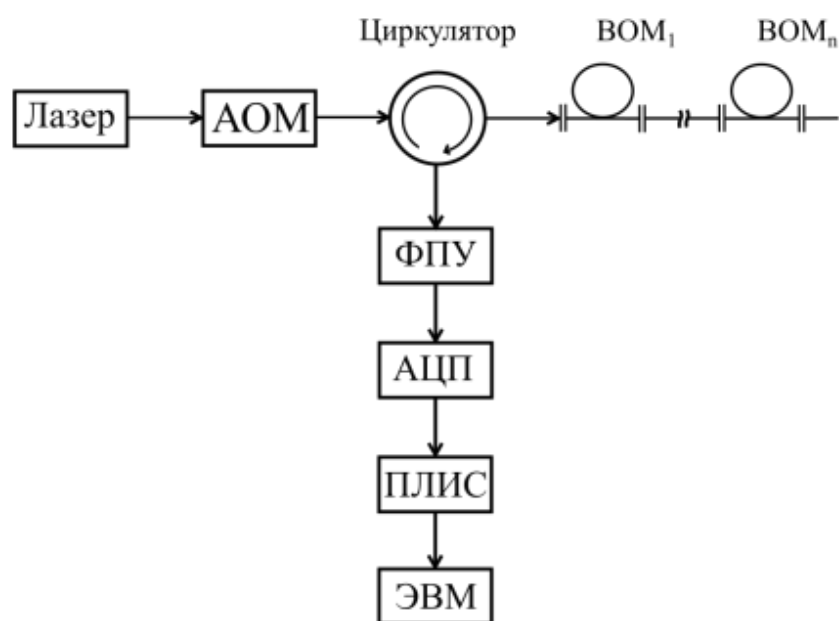


Рис. 2.

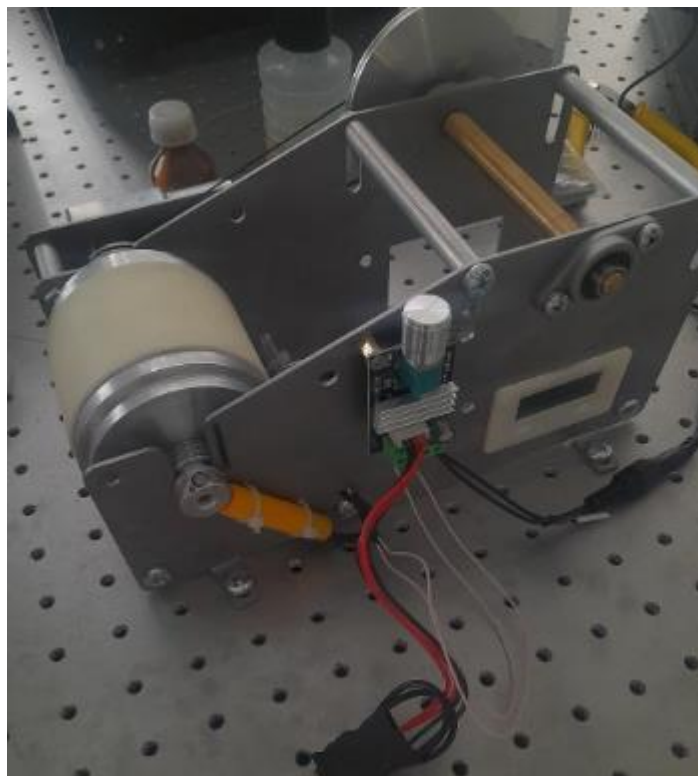


Рис 3.

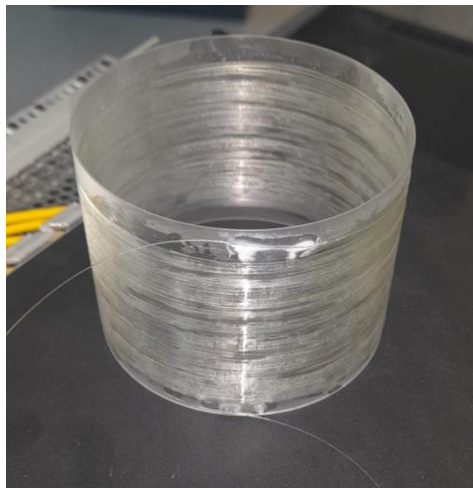


Рис 4.

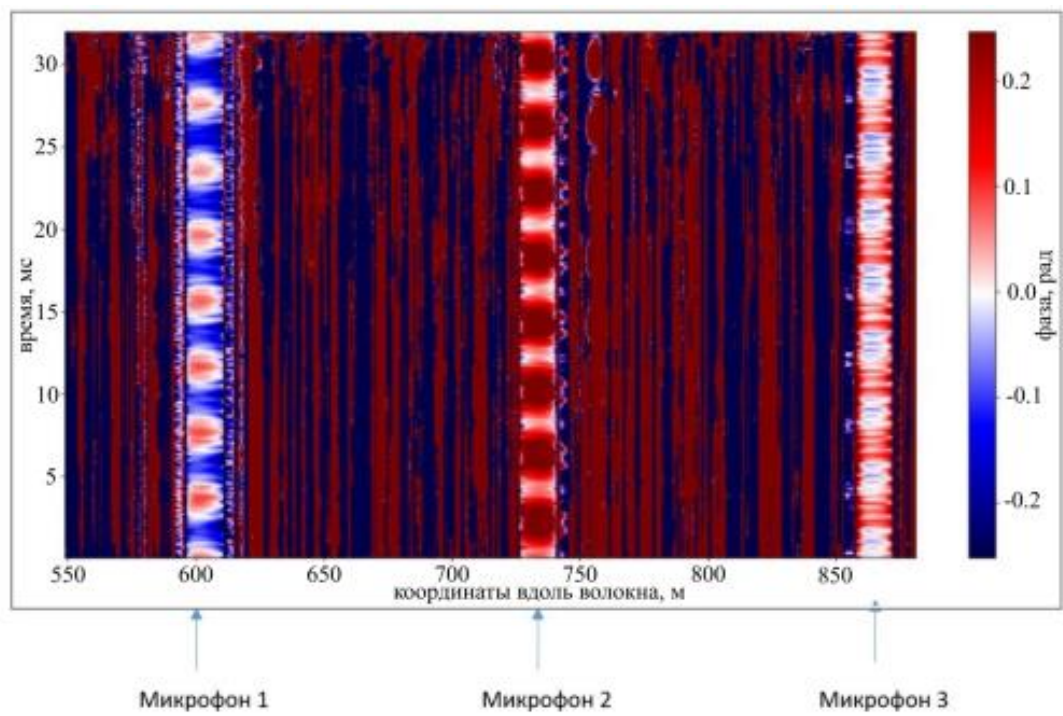


Рис. 5.

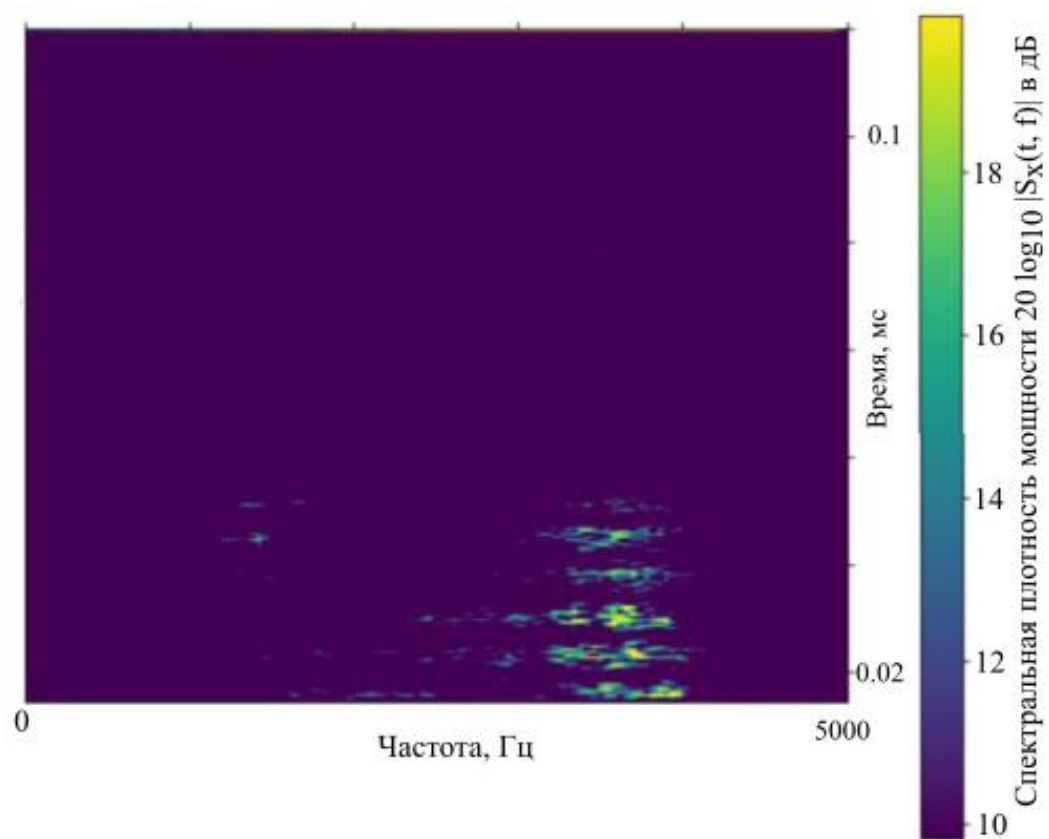


Рис. 6.