НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2026, том 36, № 4, с. 64–72 *ISSN 0868-5886*

ФИЗИКА ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 53.06
EDN: HXCSAR

© О. Д. Чупшева, П. С. Дудкин, А. И. Максимов, З. Р. Целищев, Г. Х. Ашкар, Е. М. Овсянкин, М. М. Шнырков, А. С. Киселёва, А. В. Скороход, 2026

РАСПРЕДЕЛЕННОЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ DAS В АКУСТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ (обзор)

В статье рассматривается технология распределенного акустического зондирования (DAS), основанная на фазочувствительной оптической рефлектометрии (φ-OTDR). Представлены принципы ее работы, эволюция методов демодуляции сигнала и факторы, определяющие чувствительность систем. Особое внимание уделено применению DAS в акустическом диапазоне. Обсуждаются ключевые параметры производительности систем, влияние типа и укладки оптоволоконного кабеля, а также инженерные решения, повышающие эффективность регистрации акустических сигналов. Рассмотрены современные подходы к улучшению качества сигнала, включая применение алгоритмов подавления шумов, использование волоконных катушек, слабых брэгговских решеток и адаптивной обработки данных. Приведены примеры практических исследований, демонстрирующих возможности DAS для распознавания речи, мониторинга акустической среды и интеграции в концепции "умного дома" и "умного города". Сделан вывод о перспективности комплексной оптимизации DAS, объединяющей выбор кабеля, топологию его укладки и алгоритмы анализа данных для создания высокоэффективных систем акустического мониторинга.

Ключевые слова: распределенное акустическое зондирование (DAS), φ-OTDR, акустический диапазон, оптоволоконные катушки, умный дом, умный город

ВВЕДЕНИЕ

Распределенное акустическое зондирование (DAS) представляет собой технологию, в которой оптическое волокно функционирует как протяженный виброакустический датчик. В основе метода лежит фазочувствительная оптическая рефлектометрия во временно́ой области (φ-OTDR), предложенная в 1993 г. Принцип работы основан на использовании коротких лазерных импульсов, которые взаимодействуют с неоднородностями структуры волокна (эффект рэлеевского рассеяния). При этом часть света рассеивается обратно к источнику, и малейшие деформации или колебания волокна вызывают изменения фазы и амплитуды этого сигнала. Регистрация и анализ этих изменений позволяют непрерывно отслеживать механические воздействия вдоль всей длины оптоволокна с высоким пространственным разрешением, превращая его в длинный линейный датчик, способный фиксировать динамические процессы практически в реальном времени.

На сегодняшний день технология DAS широко применяется для мониторинга объектов критической инфраструктуры, включая трубопроводы топливно-энергетического комплекса (обнаружение утечек, земляных работ), железнодорожные пути (контроль несанкционированных работ, оползней, движения поездов), линии электропередач (диагностика обрывов, гололеда), автодороги (анализ заторов, повреждений полотна), а также в системах периметральной охраны и сейсмологии. В нефтегазовой отрасли DAS стало незаменимым инструментом для решения широкого спектра задач: от мониторинга добычи и контроля целостности скважинного оборудования до анализа сейсмической активности и предотвращения утечек в трубопроводах. Технология позволяет точно определять зоны разгазирования нефти в добывающих скважинах, оптимизировать процессы гидроразрыва пласта и отслеживать песчаные пробки, что значительно повышает эффективность и безопасность эксплуатации месторождений.

Актуальность направления подчеркивается его интеграцией с современными алгоритмами машинного обучения и нейронными сетями, которые позволяют извлекать из данных DAS еще больше полезной информации. Это свидетельствует о том, что DAS является динамично развивающейся и перспективной технологией, область применения которой постоянно расширяется.

ПРИНЦИП РАБОТЫ DAS

В основе технологии DAS лежит метод фазочувствительной оптической рефлектометрии (φ-OTDR), который использует рэлеевское обратное рассеяние для обнаружения динамических возмущений. Хотя система довольно чувствительна к акустическим колебаниям, она сталкивается с рядом ограничений. Одним из них является замирание сигнала (fading), вызванное деструктивной интерференцией, которая может создавать "слепые зоны" вдоль волокна. Кроме того, низкое отношение сигнал/шум (SNR), особенно на больших расстояниях, может ограничивать производительность [3].

φ-OTDR наиболее эффективно регистрирует осевую деформацию волокна, вызванную продольным растяжением или сжатием, что прямо влияет на фазу рассеянного света. Воздействия, перпендикулярные волокну, вызывают значительно меньшие изменения и регистрируются с низкой эффективностью. Эти особенности взаимодействия и ограничения системы стали причиной для последующих технологических усовершенствований.

Эволюция технологии DAS была обусловлена постоянным совершенствованием оптических компонентов и методов обработки сигнала. Изначально системы были способны лишь на качественное обнаружение событий, однако появление новых подходов, таких как фазовая демодуляция (с помощью 3×3 сумматора в 2013 г., PGC-демодуляции в 2015 г. и IQ-демодуляции в 2016 г.), позволило перейти к количественным измерениям. Эти достижения, наряду с работой по подавлению когерентного и поляризационного замираний, расширению частотного диапазона и повышению пространственного разрешения, значительно повысили производительность DAS-систем, что позволяет использовать оптоволокно в качестве линейного микрофона, воспринимающего широкий спектр акустических сигналов [1].

В частности, особый интерес представляет использование DAS в акустическом диапазоне частот (20 Гц ÷ 20 кГц), слышимых человеческим ухом. Благодаря этой возможности волоконно-оптическую линию можно рассматривать как аналог распределенной микрофонной решетки, где один датчик позволяет одновременно записывать множество каналов. Так, было продемонстрировано, что существующая кабельная инфраструктура внутри зданий способна функционировать как сенсор, улавливающий аудиосигналы с высокой точностью. Это открывает новые возможности для применения DAS в системах "умного дома" и городского акустического мониторинга. Например, технология DAS уже была успешно применена для записи и распознавания голосовых команд с точностью, достигающей 96% [2].

КЛЮЧЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ φ-OTDR/DAS

Производительность φ-OTDR может быть оценена по нескольким ключевым факторам, таким как: дальность обнаружения (sensing distance), диапазон частотной характеристики (frequency response range), пространственное разрешение (spatial resolution) и отношение сигнал / шум (SNR) [3].

В идеальных условиях распространение света в волокне происходит без потерь, однако в реальности потери света возрастают с увеличением дистанции распространения. Дальность обнаружения представляет собой максимальную длину чувствительного волокна, которая определяется динамическим диапазоном:

$$R = \frac{1}{2}\left[\lg\left(\frac{P_0 - S}{P_{\mathrm{D}}}\right)\right],$$

где P_0 — мощность излучения рэлеевского обратного рассеяния (RBS) на переднем конце волокна; P_{D} — минимальная оптическая мощность, на которую может реагировать фотоприемник; S — потери при передаче в системе [3].

Для систем распределенного акустического зондирования (DAS) частотная характеристика является ключевым параметром, характеризующим рабочий частотный диапазон отклика системы на внешние возмущения. Чем выше частотная характеристика, тем шире область применения системы. Соответственно, увеличение верхней границы частотной характеристики расширяет возможности системы по детектированию различных типов сигналов [1]. Диапазон частотной характеристики берется в соответствии с теоремой дискретизации Котельникова:

$$f_{\max} = \frac{1}{2T_{\min}} = \frac{\nu_g}{4L},$$

где $T_{\min}$ — минимальный период повторения импульсов, L — длина измерительного волокна, ν_g — групповая скорость света [3].

Пространственное разрешение — это минимальное расстояние, на котором оптоволоконная сенсорная система может эффективно идентифицировать два отдельных события, зависит от длительности зондирующего импульса τ и частоты дискретизации фотоприемника. На практике пространственное разрешение в основном

ограничено длительностью зондирующего импульса. Однако уменьшение длительности импульса приведет к уменьшению SNR, а также к уменьшению дистанции обнаружения [3].

SNR — отношение сигнал / шум, вносит большой вклад в производительность системы, влияя на дальность обнаружения, чувствительность и точность. Существует множество способов улучшения этого показателя: увеличение интенсивности сигнала, усиление оптической мощности, а также уменьшение шумов. Основные источники шума в системах DAS включают шум окружающей среды, шум замираний, модовый шум и системный шум, причем модовый шум подвержен влиянию поляризационных замираний, когерентных замираний, деформации волокна и нелинейных эффектов [1].

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ DAS

DAS — сложная система, состоящая из множества элементов, каждый из которых влияет на общую эффективность и чувствительность измерений.

Оптоволоконный кабель непосредственно выступает в роли сенсора, поэтому его характеристики важно учитывать. Выделяют несколько параметров кабеля, влияющие на его чувствительность: тип покрытия, диаметр и внутреннее напряжение.

В частности, в статье "Comparison of the Sensitivity of Various Fibers in Distributed Acoustic Sensing. *Turov A.T. et al.*" было исследовано 7 типов оптоволокна с различными характеристиками: материал покрытия, количество слоев, диаметр и внутреннее напряжение. Результаты показали, что полиамидное покрытие с дефектами, такими как неоднородности и каверны, может резонировать с акустическими частотами, что повышает чувствительность. Волокно с таким покрытием показало самую высокую акустическую чувствительность в диапазоне от 100 до 4500 Гц. Многослойное покрытие, напротив, предназначено для снижения чувствительности к внешним воздействиям. Это волокно показало наименьшую чувствительность при частотах выше 2500 Гц. А у волокон с внутренним напряжением может наблюдаться относительно низкая чувствительность на низких частотах, но при этом стабильная чувствительность в широком диапазоне частот, что может быть полезно для точного распознавания звуковых источников. Также было выяснено, что уменьшение диаметра волокна повышает чувствительность.

Способ монтажа и укладки оптоволоконного кабеля является одним из ключевых факторов для эффективной регистрации акустических сигналов.

Укладка оптоволоконного кабеля в виде катушки является более эффективной по сравнению с прямолинейным участком, поскольку оптоволоконный кабель не воспринимает перпендикулярные сигналы, а наиболее чувствителен к продольным (осевым) деформациям, т.е. к колебаниям, направленным вдоль его оси. В исследовании "Sensitivity Improvement of Phi-OTDR by Fiber Cable Coils" [6] было показано, что укладка оптоволоконного кабеля в виде катушки значительно эффективнее прямолинейного участка, т.к. она преобразует перпендикулярные акустические волны в осевые деформации, к которым волокно наиболее чувствительно. Это может увеличить чувствительность системы в 2.2 раза.

Чувствительность системы напрямую зависит от того, насколько качественным является механический контакт кабеля с вибрирующими поверхностями, что подтверждено исследованием "Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations" [4].

В ходе данного исследования проводились эксперименты со следующими видами расположения кабеля (рис. 1):

а) свободно подвешен в форме кольца над сеткой (без контакта с панелью);

б) уложен спиральной катушкой на панели;

в) уложен плоским кольцом на панели;

г) уложен плоским кольцом на панели с вибропоглощающей пеной под частью кабеля.

Было обнаружено, что наилучшие результаты достигаются при непосредственном контакте кабеля с вибрирующей поверхностью. Например, размещение кабеля в виде катушки или круга непосредственно на потолочной панели, изготовленной из легкого пористого материала, позволяет панели выступать в роли резонатора. Панель эффективно улавливает акустические волны и преобразует их в механические вибрации, которые передаются на оптоволокно. В отличие от этого, методы, препятствующие прямому контакту, оказались значительно менее эффективными. Так, размещение кабеля на вибропоглощающей пене (мягком полимерном материале) или его свободное подвешивание приводят к существенным потерям сигнала. Эти материалы и способы размещения действуют, как демпфирующие элементы, т.е. поглощают или гасят энергию вибраций, не давая ей дойти до кабеля.

Этот же принцип применим и к кабелям, проложенным под землей. Для точной регистрации поверхностных вибраций, например, от пешеходов или транспорта, критически важен

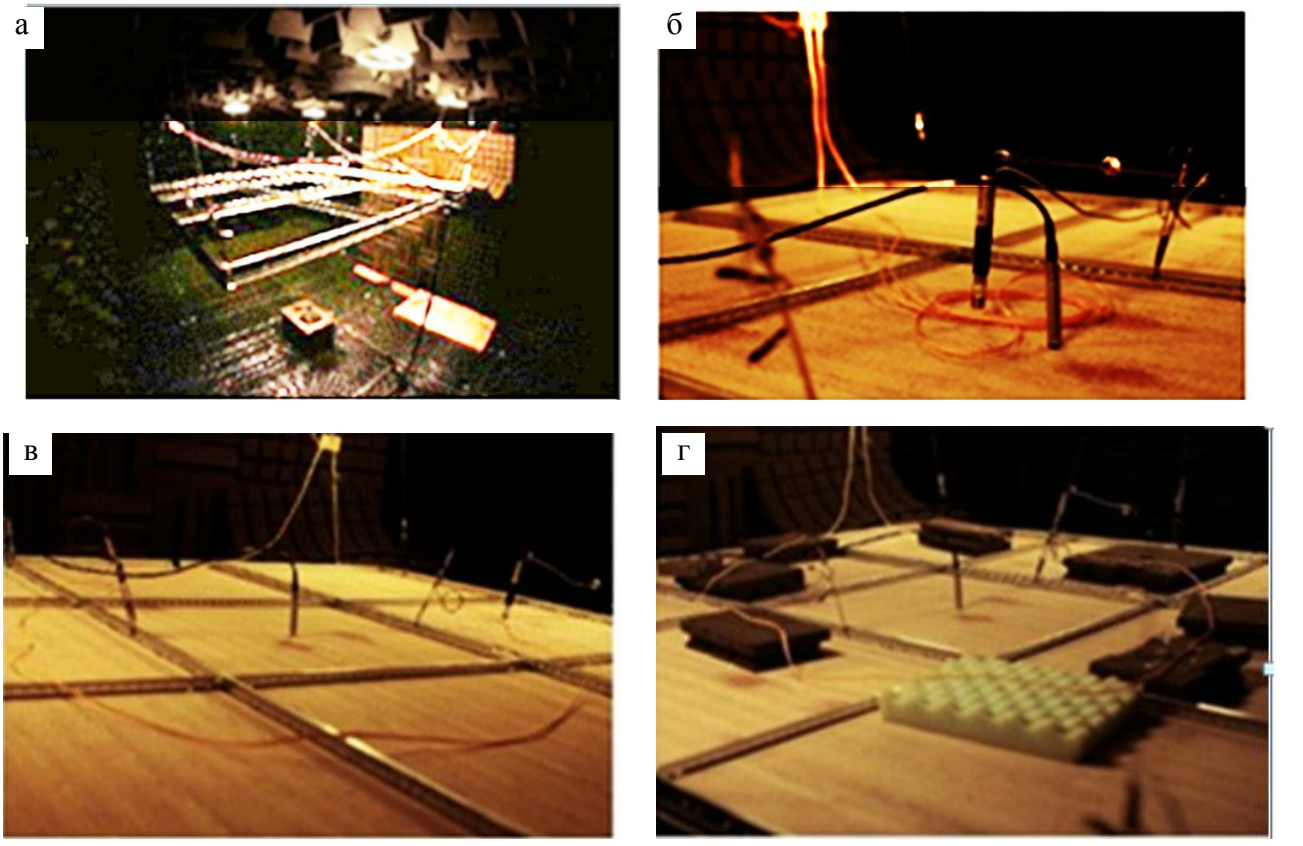

Рис. 1. Конфигурации кабеля: а) свободно подвешенное кольцо над сеткой (без контакта с панелью), б) спиральная катушка на панели, в) плоское кольцо на панели, г) плоское кольцо на панели с демпфирующей пеной (под частью кабеля)

плотный механический контакт кабеля с окружающим грунтом. Это подтверждается исследованием "Traffic Vibration Signal Analysis of DAS Fiber Optic Cables with Different Coupling Based on an Improved Wavelet Thresholding Method" [5]. Согласно результатам, наиболее эффективным оказался метод, при котором кабель был уложен в мелкую траншею и залит цементным раствором. В то же время наименее эффективным было его расположение в коммуникационных каналах (специальных защитных трубах), где кабель не имел плотного контакта с грунтом.

Также стоит учитывать, что с увеличением глубины прокладки оптоволоконного кабеля затухание сигнала усиливается. Это происходит из-за того, что механические вибрации от источника (например, движения транспорта) теряют свою интенсивность по мере распространения через слои грунта. Таким образом, кабель, расположенный на меньшей глубине, будет воспринимать более сильный и четкий сигнал, чем кабель, проложенный глубоко под землей.

Рыхлая почва или свободная укладка кабеля внутри защитной трубы будут действовать аналогично демпфирующей пене или воздушному зазору, что неизбежно ослабит полезный сигнал и снизит общую чувствительность на DAS-системе.

DAS В АКУСТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Применение распределенного акустического зондирования (DAS) для мониторинга воздушных звуков (звуков, издаваемых объектом, не имеющим прямого контакта с поверхностью) сталкивается с рядом фундаментальных проблем. Основная из них — низкая чувствительность оптического волокна к звуковым волнам, что приводит к слабым деформациям и заглушению полезных сигналов шумом. Системы φ-OTDR также подвержены нестабильности сигнала, проявляющейся как "слепые зоны", и влиянию шума от внутренних компонентов. Кроме того, возникают сложности с точной передачей и стабильностью сигнала, а также с наложением

акустических сигналов, что снижает качество восприятия, особенно для человеческого голоса.

Ключевым элементом в повышении качества сигнала, предложенным в исследовании "Implementation Method of Fiber Optic Microphone Array Based on Enhanced φ-OTDR" [7], является алгоритм многоточечного усиления акустического сигнала (MASE). Этот алгоритм, основанный на обнаружении фазовых аномалий, эффективно подавляет замирания и усиливает акустические сигналы. Он работает путем анализа схожести сигналов, устранения аномальных точек и спектрального вычитания для подавления аддитивного шума. Эксперименты показали, что в частотном диапазоне 80–3400 Гц SNR системы увеличился на 12.5 дБ по сравнению с одиночным ESU (Equivalent Sensing Unit), а коэффициент подавления искажений (DSR) достиг 95%. При увеличении количества усредняемых точек до 11 DSR превысил 95%, а SNR увеличился более чем на 9 дБ, достигая максимума в 12.5 дБ. Однако авторы отмечают, что дальнейшее увеличение числа точек усреднения приводит к росту вычислительной нагрузки.

Для оценки влияния конфигурации волокна на чувствительность и частотную характеристику в исследовании проводились эксперименты с различными диаметрами намотки волокна (рис. 2). Одномодовое волокно (SMF) длиной 20 метров было смотано в виде концентрических колец диаметром 20 см (кольцо L), 11.3 см (кольцо M) и 5 см (кольцо S) и закреплено на пластину сенсибилизатора из эпоксидной смолы плотностью 1.2 г/см³. Кольцо S (5 см) продемонстрировало самую высокую чувствительность и хорошую корреляцию с исходным сигналом (коэффициент корреляции $R > 0.997$), а также лучшую частотную характеристику в диапазоне 100–3400 Гц. Частотная характеристика колец L и M начинала снижаться при 500 Гц и 1300 Гц соответственно. Это подтверждает, что уменьшение диаметра волоконного кольца улучшает амплитудно-частотную характеристику системы. Для обеспечения высокой амплитудно-частотной характеристики сенсорного элемента диаметр оптоволоконного кольца должен быть около 5 см, а для его основы следует выбирать мягкий материал с низким модулем Юнга, способный эффективно поглощать низкочастотные акустические сигналы. В рамках этой работы также был предложен дизайн инкапсуляции зонда, где диаметр оптического волокна составляет 5 см, а мягкий материал подложки с низким модулем Юнга выбран для эффективного поглощения низкочастотных акустических сигналов.

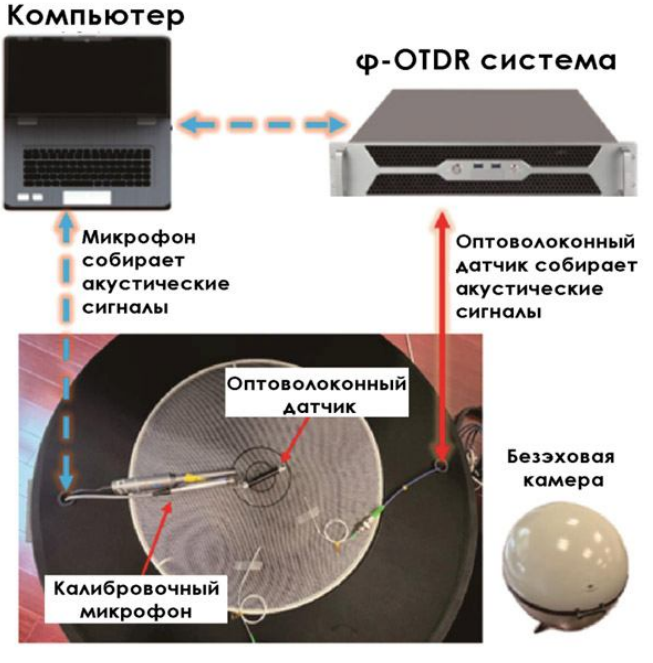

Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального оборудования [7]

Помимо оптимизации конфигурации волокна, для повышения чувствительности DAS к воздушным звукам были предложены и другие подходы. В одном из экспериментов работы "Airborne Sound Sensing System Based on DAS and Ultra-Simple Transducer Structure" [8] было предложено использовать простые преобразователи, такие как обычные пластиковые бутылки, на которые вручную наматывается оптоволоконный кабель. Такая система достигла чувствительности 106.5 дБ относительно 1 рад/μPa на расстоянии 5.1 км.

В этом же исследовании было показано, что многочастотное зондирование и приемники с поляризационным разнесением (PDR) эффективны в подавлении замираний, а фазовое усреднение по множеству акустических каналов, когда волокно намотано на преобразователь, дополнительно снижает собственный шум системы.

Для дальнейшего улучшения качества сигнала в работе "Detection and Recognition of Voice Commands by a Distributed Acoustic Sensor Based on Phase-Sensitive OTDR in the Smart Home Concept" [2] было предложено использовать слабые брэгговские решетки (wFBG), которые значительно увеличивают уровень обратного рассеяния (на 3 порядка величины) по сравнению со стандартным волокном, улучшая отношение сигнал/шум (SNR). Каждая пара wFBG формирует отдельный чувствительный элемент, что позволило достичь до 96.3% распознанных слов при частоте дискретизации 40 кГц и длине волокна 20 м. Исходный сигнал фильтруется в частотном диапазоне от 500 Гц до 4 кГц, чтобы удалить низкочастотный шум и высокочастотные компоненты, не влияющие на разборчивость речи. После фильтрации амплитуда сигнала нормализуется.

Эффективность DAS в акустическом диапазоне также сильно зависит от правильного выбора операционных параметров системы и применения передовых алгоритмов обработки данных. В данном исследовании [2] было показано, что частота повторения импульсов (f_{rep}) напрямую связана с максимальной длиной сенсорного волокна (L_S). Качество распознавания речи значительно улучшается с увеличением частоты дискретизации АЦП (эквивалентно f_{rep}). Низкая f_{rep} (менее 5 кГц) приводит к потере высокочастотных компонентов речи. С активным пьезоэлектрическим преобразователем (PZT) пороговая частота для распознавателей Whisper NN составляет 5 кГц, для Yandex SpeechKit — 15 кГц; при 40 кГц распознавание достигает 79.8% (Whisper NN). Было выяснено, что использование слабых брэгговских решеток (wFBG) значительно увеличивает уровень обратного рассеяния, улучшая SNR, и позволяет достичь до 96.3% распознанных слов при частоте дискретизации 40 кГц. К тому же применение открытых сервисов распознавания речи (Yandex SpeechKit) и нейронных сетей (Whisper NN) значительно повышает эффективность распознавания. Для количественной оценки используются процент правильно распознанных слов и расстояние Левенштейна. Достигнуто более 90% правильно распознанных слов при $f_{rep} > 10$ кГц, и не более 70% при $f_{rep} < 10$ кГц.

Авторы рассматриваемых исследований видят широкие перспективы применения своих наработок. В статье [2] предлагается использовать DAS для регистрации голосовых команд, что может быть интегрировано в концепции "умного дома" и "умного города", расширяя функции уже существующих систем безопасности и мониторинга протяженных объектов. Авторы также отмечают, что дальнейшие улучшения в алгоритмах распознавания позволят вывести такие системы на новый уровень, открывая возможности для широкого внедрения оптоволоконных акустических датчиков с функцией распознавания речи в повседневной жизни. В целом результаты исследований демонстрируют потенциал для создания высокопроизводительных оптоволоконных микрофонных массивов, способных к эффективному мониторингу звукового поля.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ DAS

В Российской Федерации компания "Т8 Сенсор" специализируется на разработке решений в области распределенного акустического зондирования. Ее флагманская система "Дунай" предназначена для мониторинга объектов критической инфраструктуры, включая трубопроводные системы топливно-энергетического комплекса, транспортные узлы и энергетические объекты.

В рамках сотрудничества Российского университета транспорта с компанией "Т8 Сенсор" был проведен двухнедельный практический эксперимент, направленный на исследование возможностей DAS для мониторинга акустической среды. В ходе работы выполнялись полевые замеры уровня звука с использованием шумомера DT-8851 и системы DAS в различных акустических условиях (транспортная магистраль, перекресток с подземным метрополитеном, жилой квартал). Для синхронизации и разметки данных был использован Telegram-бот, фиксирующий временны́е интервалы начала и окончания событий.

Сравнительный анализ (рис. 3) показал, что базовые методы предобработки (усреднение каналов, нормализация, удаление выбросов) обеспечивают высокую корреляцию сигналов DAS

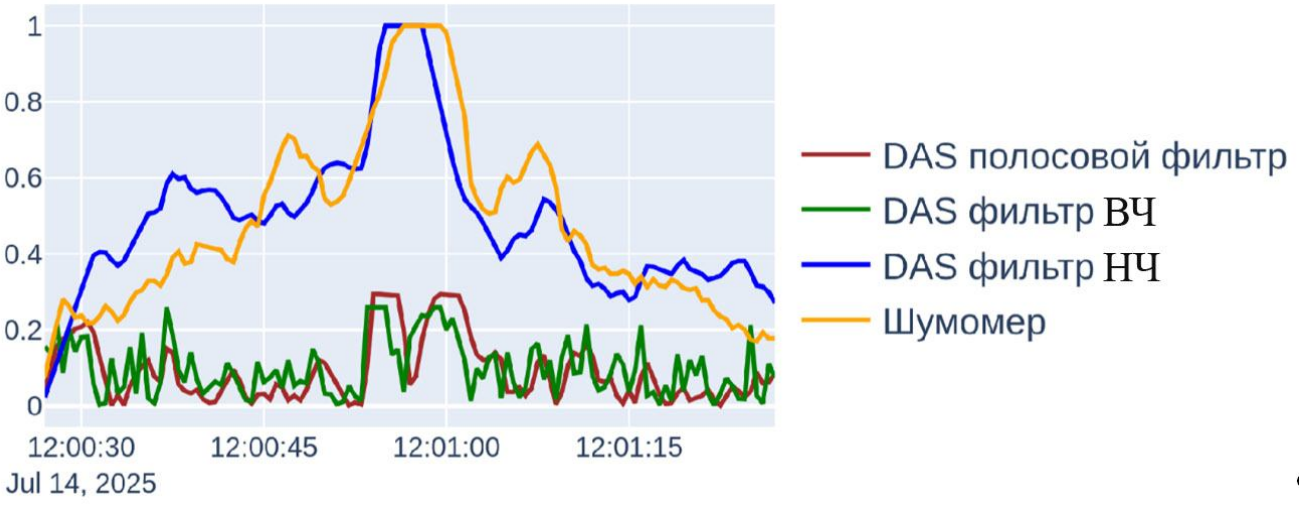

Рис. 3. Фильтрованные сигналы DAS в сравнении с шумомером. ФНЧ, ФВЧ от 15 Гц; полосовой фильтр 10–60 Гц

и шумомера, к данным с которого было применено скользящее среднее, на коротких интервалах времени. Применение фильтра низких частот дополнительно повысило сопоставимость сигналов, что согласуется с данными теоретических исследований. Результаты носят предварительный характер, однако демонстрируют перспективность использования DAS для мониторинга акустической среды в городских условиях.

Полученные в ходе настоящей работы результаты создают основу для дальнейшего развития исследований в области использования распределенного акустического зондирования для мониторинга шумового загрязнения городской среды. В качестве первоочередной задачи рассматривается разработка надежной методики калибровки и верификации данных DAS.

В Российской Федерации для официальных измерений уровня звука используются строго сертифицированные шумомеры, соответствующие ГОСТам. Однако их применение для масштабных и длительных исследований городской среды имеет ряд ограничений: короткое время непрерывной записи, фиксированное местоположение и ограниченный частотный диапазон. В связи с этим, первый этап исследований будет направлен на установление устойчивой корреляции между показаниями сертифицированного шумомера и синхронно записанными аудиоданными с высококачественного диктофона или рекордера. Успешное решение этой задачи позволит в перспективе перейти к использованию аудиозаписей в качестве эталонного источника данных, что критически важно для анализа длительных (несколько часов) фрагментов записи в разное время суток и для изучения полного спектра акустических событий.

При этом важно отметить, что, вероятно, не все звуки, регистрируемые диктофоном (воздушные звуки), будут одинаково эффективно детектироваться системой DAS. Это связано с тем, что оптоволоконный кабель, проложенный в грунте, в первую очередь, чувствителен к вибрациям, передающимся через почву. Следовательно, источники шума, не имеющие механического контакта с грунтом (например, голоса на расстоянии, звуки из окон верхних этажей), могут слабо воздействовать на кабель или не обнаруживаться вовсе. Исследование этой избирательной чувствительности и разработка методов компенсации данного эффекта представляют собой отдельную важную научную задачу.

Ключевой же задачей на перспективу является разработка методов и алгоритмов, позволяющих использовать уже развернутую городскую оптоволоконную инфраструктуру в качестве распределенного сенсора шумовой среды.

Гипотеза для проверки в будущих исследованиях: корреляция между данными DAS и уровнем городского шума является устойчивой и поддающейся алгоритмической коррекции. Предполагается, что, несмотря на вариабельность условий прокладки кабеля, можно разработать адаптивные алгоритмы калибровки, которые будут учитывать эти особенности и обеспечивать сопоставимую точность измерений на разных участках сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределенное акустическое зондирование (DAS) является быстро развивающейся технологией, которая может быть адаптирована под различные задачи. Ее эффективность зависит от преодоления физических ограничений, одним из которых является слабая связь между воздушными звуковыми волнами и оптическим волокном, что особенно важно для применения в акустическом диапазоне. Как показали исследования, решение этой проблемы лежит не только в совершенствовании алгоритмов обработки сигналов, но и в инженерной оптимизации самой сенсорной системы.

Конструктивные решения, направленные на эффективное преобразование акустической энергии в механические деформации волокна, рассматриваются как одно из наиболее перспективных направлений развития систем DAS. Экспериментально подтверждено, что укладка кабеля в виде катушек может повысить чувствительность системы в 2.2 раза за счет трансформации поперечных колебаний в продольные деформации. Не менее критичен плотный механический контакт с передающей средой. Эти принципы сохраняют актуальность и для подземной прокладки, где цементная заливка траншей показала преимущество перед размещением в защитных трубах.

Перспективы внедрения DAS в системах акустического мониторинга связаны с синергией трех элементов: типа кабеля, топологии укладки, максимизирующих механическую связь (катушки, кольца), и адаптивных алгоритмов обработки сигналов. Такая комплексная оптимизация открывает путь к созданию "невидимой" акустической инфраструктуры для "умных" городов, где существующие волоконно-оптические сети могут выполнять двойную функцию — передачи данных и высокоточной регистрации акустической среды..

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Shang Y., Sun M., Wang C., Yang J., Du Y., Yi J., Zhao W., Wang Y., Zhao Y., Ni J.* Research Progress in Distributed Acoustic Sensing Techniques // Sensors. 2022. Vol. 16. Id. 6060. DOI: 10.3390/s22166060
2. *Gritsenko T.V., Orlova M.V., Zhirnov A.A., Konstantinov Y.A., Turov A.T., Barkov F.L., Koshelev K.I., Svelto C., Pnev A.B.* Detection and Recognition of Voice Commands by a Distributed Acoustic Sensor Based on Phase-Sensitive OTDR in the Smart Home Concept // Sensors. 2024. Vol. 24, no. 7. Id. 2281. DOI: 10.3390/s24072281
3. *Liu Sh., Yu F., Hong R., et al.* Advances in Phase-Sensitive optical time-domain reflectometry // Opto-Electronic Advances. 2022. Vol. 5, no. 3. Id. 200078. DOI: 10.29026/oea.2022.200078
4. *Dejdar P., Mokry O., Cizek M. et al.* Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations // Sci Rep. 2023. Vol. 13. Id. 7068. DOI: 10.1038/s41598-023-34097-9
5. *An Y., Ma J., Xu T., Cai Y., Liu H., Sun Y., Yan W*. Traffic Vibration Signal Analysis of DAS Fiber Optic Cables with Different Coupling Based on an Improved Wavelet Thresholding Method // Sensors. 2023. Vol. 23, no. 12. Id. 5727. DOI: 10.3390/s23125727
6. *Stepanov K.V., Zhirnov A.A., Koshelev K.I., Chernutsky A.O., Khan R.I., Pnev A.B.* Sensitivity Improvement of Phi-OTDR by Fiber Cable Coils // Sensors. 2021. Vol. 21, no. 21. Id. 7077. DOI: 10.3390/s21217077
7. *Han Y., Tong Sh., Luo Ch., Zhao Sh., et al*. Implementation Method of Fiber Optic Microphone Array Based on Enhanced φ-OTDR // Optoelectronic Technology. 2024. Vol. 44, no. 4. Id. 275. URL: https://www.opticsjournal.net/Articles/OJd380b70853199a45/FullText
8. *Tang J., Hu M., Jiang G., Zheng X., Peng F.* Airborne Sound Sensing System Based on DAS and Ultra-Simple Transducer Structure // Photonics. 2022. Vol. 9, no. 12. Id. 975. DOI: 10.3390/photonics9120975

Российский университет транспорта, Москва (*Чупшева О.Д., Дудкин П.С., Максимов А.И., Целищев З.Р., Анастасия С.К.*)

ООО "Т8", Москва (*Ашкар Г.Х., Овсянкин Е.М., Шныpков М.М., Скороход А.В.*)

Контакты: *Дудкин Пётр Сергеевич,* wertysed11@gmail.com

Материал поступил в редакцию 11.08.2026

DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSING DAS IN THE ACOUSTIC RANGE (Overview)

O. D. Chupsheva[1], P. S. Dudkin[1], A. I. Maksimov[1], Z. R. Tselishchev[1], G. Ch. Ashkar[2], E. M. Ovsyankin[2], M. M. Shnyrkov[2], A. S. Kiseleva[1], A. V. Skorokhod[2]

[1]*Russian University of Transport, Moscow, Russia*
[2]*T8 LLC, Moscow, Russia*

The article discusses distributed acoustic sensing (DAS) technology based on phase-sensitive optical reflectometry (φ-OTDR). The principles of its operation, the evolution of signal demodulation methods, and the factors determining the sensitivity of the systems are presented. Particular attention is paid to the use of DAS in the acoustic range. The key performance parameters of the systems, the impact of the type and installation of fiber-optic cable, and engineering solutions that increase the efficiency of acoustic signal recording are discussed. Modern approaches to improving signal quality are considered, including the use of noise reduction algorithms, fiber coils, weak Bragg gratings, and adaptive data processing. Examples of practical research demonstrating DAS capabilities for speech recognition, acoustic environment monitoring, and integration into smart home and smart city concepts are presented. The conclusion is made about the prospects of integrated DAS optimization, combining cable selection, its laying topology, and data analysis algorithms to create highly efficient acoustic monitoring systems.

Keywords: distributed acoustic sensing (DAS), φ-OTDR, acoustic range, fiber optic coils, smart home, smart city

REFERENCES

1. Shang Y., Sun M., Wang C., Yang J., Du Y., Yi J., Zhao W., Wang Y., Zhao Y., Ni J. Research Progress in Distributed Acoustic Sensing Techniques. *Sensors*, 2022, vol. 16, id. 6060. DOI: 10.3390/s22166060
2. Gritsenko T.V., Orlova M.V., Zhirnov A.A., Konstantinov Y.A., Turov A.T., Barkov F.L., Khan R.I., Koshelev K.I., Svelto C., Pnev A.B. Detection and Recognition of Voice Commands by a Distributed Acoustic Sensor Based on Phase-Sensitive OTDR in the Smart Home Concept. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 7, id. 2281. DOI: 10.3390/s24072281
3. Liu Sh., Yu F., Hong R., et al. Advances in Phase-Sensitive optical time-domain reflectometry. *Opto-Electronic Advances*, 2022, vol. 5, no. 3, id. 200078. DOI: 10.29026/oea.2022.200078
4. Dejdar P., Mokry O., Cizek M. et al. Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations. *Sci Rep*., 2023, vol. 13, id. 7068. DOI: 10.1038/s41598-023-34097-9
5. An Y., Ma J., Xu T., Cai Y., Liu H., Sun Y., Yan W. Traffic Vibration Signal Analysis of DAS Fiber Optic Cables with Different Coupling Based on an Improved Wavelet Thresholding Method. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 12, id. 5727. DOI: 10.3390/s23125727
6. Stepanov K.V., Zhirnov A.A., Koshelev K.I., Chernutsky A.O., Khan R.I., Pnev A.B. Sensitivity Improvement of Phi-OTDR by Fiber Cable Coils. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 21, id. 7077. DOI: 10.3390/s21217077
7. Han Y., Tong Sh., Luo Ch., Zhao Sh., et al. Implementation Method of Fiber Optic Microphone Array Based on Enhanced φ‑OTDR. *Optoelectronic Technology*, 2024, vol. 44, no. 4, id. 275. URL: https://www.opticsjournal.net/Articles/OJd380b70853199a45/FullText
8. Tang J., Hu M., Jiang G., Zheng X., Peng F. Airborne Sound Sensing System Based on DAS and Ultra-Simple Transducer Structure. *Photonics*, 2022, vol. 9, no. 12, id. 975. DOI: 10.3390/photonics9120975

Contacts: *Dudkin Petr Sergeevich,*
wertysed11@gmail.com

The article was received by the editorial office on 11.08.2026

INTRODUCTION

Distributed acoustic sensing (DAS) is a technology in which an optical fiber functions as an extended vibroacoustic sensor. The method is based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry (φ-OTDR), proposed in 1993. It operates using short laser pulses that interact with irregularities in the fiber structure (the Rayleigh scattering effect). Part of the light is scattered back toward the source, and the slightest deformations or vibrations of the fiber cause changes in the phase and amplitude of this signal. Recording and analyzing these changes allows for continuous monitoring of mechanical effects along the entire length of the optical fiber with high spatial resolution, turning it into a long linear sensor capable of capturing dynamic processes in near real time. Today, DAS technology is widely used to monitor critical infrastructure, including fuel and energy pipelines (leak detection, excavation work), railways (monitoring of unauthorized work, landslides, and train movement), power lines (break and ice detection), highways (congestion and roadway damage analysis), and perimeter security and seismology systems. In the oil and gas industry, DAS has become an indispensable tool for solving a wide range of problems: from production monitoring and well equipment integrity control to seismic activity analysis and pipeline leak prevention. The technology allows for the precise identification of oil degassing zones in production wells, optimization of hydraulic fracturing processes, and monitoring of sand plugs, significantly increasing the efficiency and safety of field operations.

The relevance of this approach is underscored by its integration with modern machine learning algorithms and neural networks to enable the extraction of even more useful information from DAS data. This demonstrates that DAS is a dynamically developing and promising technology, the scope of whose applications is constantly expanding.

HOW DAS OPERATES

DAS technology is based on phase-sensitive optical time domain reflectometry (φ-OTDR), which uses Rayleigh backscatter to detect dynamic disturbances. Although the system is quite sensitive to acoustic vibrations, it faces several limitations. One of them is signal fading caused by destructive interference that can create "blind spots" along the fiber. Furthermore, a low signal-to-noise ratio (SNR) can limit performance, especially over long distances [3].

φ-OTDR most effectively detects axial fiber deformation caused by longitudinal stretching or compression; this directly affects the phase of scattered light. Forces perpendicular to the fiber cause significantly smaller changes and are detected with low efficiency. These interaction characteristics and limitations of the system have led to subsequent technological improvements.

The evolution of DAS technology has been driven by continuous improvements in optical components and signal processing methods. Initially, systems were capable only of qualitative event detection, but the advent of new approaches, such as phase demodulation (using a 3×3 combiner in 2013, PGC demodulation in 2015, and IQ demodulation in 2016), enabled the transition to quantitative measurements. These advances, along with work on suppressing coherent and polarization fading, expanding the frequency range, and increasing spatial resolution, have significantly increased the performance of DAS systems, enabling the use of fiber as a linear microphone, capturing a wide range of acoustic signals [1].

In particular, the use of DAS in the acoustic frequency range (20 Hz ÷ 20 kHz), audible to the human ear, is of particular interest. This capability allows the fiber optic link to be considered analogous to a distributed microphone array, where a single sensor can simultaneously record multiple channels. It has been demonstrated that existing cable infrastructure inside buildings can function as a sensor, capturing audio signals with high accuracy. This opens up new possibilities for the application of DAS in smart home systems and urban acoustic monitoring. For example, DAS technology has already been successfully applied to recording and recognizing voice commands with an accuracy of up to 96% [2].

KEY PARAMETERS OF φ-OTDR/DAS SYSTEM PERFORMANCE

The performance of φ-OTDR can be assessed by several key factors, such as sensing distance, frequency response range, spatial resolution, and signal-to-noise ratio (SNR) [3].

Under ideal conditions, light propagation in fiber occurs losslessly; however, in reality, light loss increases with increasing propagation distance. The detection range is the maximum length of the sensing fiber, which is determined by the dynamic range:

$$R = \frac{1}{2}\left[\lg\left(\frac{P_0 - S}{P_D}\right)\right],$$

where P_0 is the Rayleigh backscatter (RBS) power at the fiber's leading edge; P_D is the minimum optical power to which the photodetector can respond; and S is the transmission loss in the system [3].

For distributed acoustic sensing (DAS) systems, the frequency response is a key parameter characterizing the operating frequency range of the system's response to external disturbances. The higher the frequency response, the wider the system's range of application. Accordingly, increasing the upper limit of the frequency response expands the system's capabilities for detecting various types of signals [1]. The frequency response range is determined in accordance with the Kotel'nikov sampling theorem:

$$f_{\max} = \frac{1}{2T_{\min}} = \frac{v_g}{4L},$$

where $T_{\min}$ is the minimum pulse repetition period, L is the length of the measuring fiber, and v_g is the group velocity of light [3].

Spatial resolution is the minimum distance at which a fiber-optic sensor system can effectively identify two separate events and depends on the probe pulse duration τ and the photodetector sampling frequency. In practice, the probe pulse duration limits spatial resolution. However, reducing the pulse duration will lead to a decrease in SNR, as well as a decrease in the detection range [3].

SNR, the signal-to-noise ratio, significantly contributes to system performance, affecting detection range, sensitivity, and accuracy. There are many ways to improve this metric: increasing signal intensity, enhancing optical power, and reducing noise. The main sources of noise in DAS systems include environmental noise, fading noise, modal noise, and system noise, with modal noise being affected by polarization fading, coherent fading, fiber deformation, and nonlinear effects [1].

FACTORS AFFECTING DAS SENSITIVITY

A DAS is a complex system consisting of many elements, each of which affects the overall measurement efficiency and sensitivity.

The fiber optic cable directly acts as a sensor, so its characteristics are important to consider. Several cable parameters influence its sensitivity: coating type, diameter, and internal stress.

Specifically, in the article "Comparison of the Sensitivity of Various Fibers in Distributed Acoustic Sensing" by Turov A.T. et al., seven types of optical fiber with different characteristics were studied: coating material, number of layers, diameter, and internal stress. The results shows that a polyamide coating with defects such as inhomogeneities and cavities can resonate with acoustic frequencies, and it increases sensitivity. Fiber with this coating demonstrated the highest acoustic sensitivity in the range from 100 to 4500 Hz. Multilayer coating, on the other hand, is designed to reduce sensitivity to external influences. This fiber demonstrated the lowest sensitivity at frequencies above 2500 Hz. Fibers with internal stress may exhibit relatively low sensitivity at low frequencies, but stable sensitivity over a wide frequency range, it can be useful for accurately identifying sound sources. It was also found that reducing the fiber diameter increases sensitivity.

The installation and laying method of fiber optic cable is a key factor in the effective recording of acoustic signals.

Laying fiber optic cable in a coil is more effective than laying it in a straight section, since fiber optic cable does not detect perpendicular signals and is most sensitive to longitudinal (axial) deformations, i.e., vibrations directed along its axis. The study "Sensitivity Improvement of Phi-OTDR by Fiber Cable Coils" [6] demonstrated that laying fiber optic cable in a coil is significantly more effective than laying it in a straight section, as it converts perpendicular acoustic waves into axial deformations, to which the fiber is most sensitive. This can increase the system's sensitivity by 2.2 times.

The system's sensitivity directly depends on the quality of the cable's mechanical contact with vibrating surfaces; it is confirmed by the study "Characterization of the sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations" [4].

During this study, experiments were conducted with the following cable arrangements (Fig. 1):

a) freely suspended in a ring above the grid (without contact with the panel);

b) coiled in a spiral on the panel;

c) coiled in a flat ring on the panel;

d) coiled in a flat ring on a panel with vibration-absorbing foam under part of the cable.

Fig. 1. Cable configurations: a) freely suspended ring above the grating (no contact with the panel), б) spiral coil on the panel, в) flat ring on the panel, г) flat ring on the panel with damping foam (under part of the cable)

It was found that the best results are achieved when the cable is in direct contact with the vibrating surface. For example, placing the cable in a coil or circle directly on a ceiling panel made of a lightweight porous material allows the panel to act as a resonator. The panel effectively captures acoustic waves and converts them into mechanical vibrations, which are transmitted to the fiber optic cable. In contrast, methods that prevent direct contact proved significantly less effective. For example, placing the cable on vibration-absorbing foam (a soft polymer material) or hanging it freely results in significant

signal loss. These materials and placement methods act as damping elements, absorbing or damping vibration energy, preventing it from reaching the cable.

The same principle applies to cables laid underground. For accurate recording of surface vibrations, such as those from pedestrians or vehicles, it is critical to ensure tight mechanical contact between the cable and the surrounding soil. This is confirmed by the study "Traffic Vibration Signal Analysis of DAS Fiber Optic Cables with Different Coupling Based on an Improved Wavelet Thresholding Method" [5]. According to the results, the most effective method was to lay the cable in a shallow trench and grout it with cement mortar. However, the least effective was to place it in utility channels (special protective pipes), where the cable did not have tight contact with the soil.

It's also worth considering that signal attenuation increases with increasing fiber optic cable installation depth. This occurs because mechanical vibrations from the source (e.g., vehicle traffic) lose their intensity as they propagate through the soil layers. Therefore, a cable located at a shallower depth will receive a stronger and clearer signal than a cable installed deep underground.

Loose soil or loose installation of the cable within a protective pipe will act similarly to damping foam or an air gap, inevitably weakening the useful signal and reducing the overall sensitivity of the DAS system.

DAS IN THE ACOUSTIC RANGE

The use of distributed acoustic sensing (DAS) to monitor airborne sounds (sounds emitted by an object not in direct contact with the surface) faces a number of fundamental challenges. The main one is the low sensitivity of optical fiber to sound waves, which leads to slight deformations and the attenuation of useful signals by noise. φ-OTDR systems are also susceptible to signal instability, manifested as "blind spots," and the influence of noise from internal components. Furthermore, there are difficulties with accurate signal transmission and stability, as well as with acoustic signal aliasing, which reduces quality of perception, especially for the human voice.

A key element in improving signal quality, proposed in the study "Implementation Method of Fiber Optic Microphone Array Based on Enhanced φ-OTDR" [7], is the Multi-Point Acoustic Signal Enhancement (MASE) algorithm. This algorithm, based on phase anomaly detection, effectively suppresses fading and enhances acoustic signals. It works by analyzing signal similarities, eliminating anomalous points, and performing spectral subtraction to suppress additive noise. Experiments showed that in the 80–3400 Hz frequency range, the system's SNR increased by 12.5 dB compared to a single ESU (Equivalent Sensing Unit), and the distortion suppression ratio (DSR) reached 95%. Increasing the number of averaged points to 11 resulted in a DSR exceeding 95%, and the SNR increased by more than 9 dB, reaching a maximum of 12.5 dB. However, the authors note that further increasing the number of averaging points leads to increased computational load.

To assess the impact of fiber configuration on sensitivity and frequency response, experiments were conducted with various fiber winding diameters (Fig. 2). A 20-meter-long single-mode fiber (SMF) was wound into concentric rings of 20 cm (L ring), 11.3 cm (M ring), and 5 cm (S ring) diameters and mounted on a 1.2 g/cm³ epoxy resin sensitizer plate. The S ring (5 cm) demonstrated the highest sensitivity and good correlation with the original signal (correlation coefficient $R > 0.997$), as well as the best frequency response in the range of 100–3400 Hz. The frequency responses of the L and M rings began to decrease at 500 Hz and 1300 Hz, respectively. This confirms that reducing the fiber ring diameter improves the system's amplitude-frequency response. To ensure a high amplitude-frequency response of the sensor element, the fiber optic ring diameter should be approximately 5 cm, and its base should be made of a soft material with a low Young's modulus capable of effectively absorbing low-frequency acoustic signals. This work also proposed a probe encapsulation design with a 5 cm optical fiber diameter and a soft substrate material with a low Young's modulus selected to effectively absorb low-frequency acoustic signals.

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental equipment [7]

In addition to optimizing the fiber configuration, other approaches have been proposed to improve the sensitivity of DAS to airborne sounds. One experiment in the paper "Airborne Sound Sensing System Based on DAS and Ultra-Simple Transducer Structure" [8] proposed using simple transducers, such as common plastic bottles, onto which fiber optic cable was manually wound. This system achieved a sensitivity of 106.5 dB re 1 rad/μPa over a distance of 5.1 km.

The same study also demonstrated that multi-frequency sensing and polarization diversity receivers (PDRs) are effective in suppressing fading, and phase averaging over multiple acoustic channels when the fiber is wound on a transducer further reduces the system's inherent noise.

To further improve signal quality, the paper "Detection and Recognition of Voice Commands by a Distributed Acoustic Sensor Based on Phase-Sensitive OTDR in the Smart Home Concept" [2]

proposed the use of weak FBGs, which significantly increase backscatter (by 3 orders of magnitude) compared to standard fiber, improving the signal-to-noise ratio (SNR). Each pair of wFBGs forms a separate sensing element, which enables a word recognition rate of up to 96.3% at a sampling rate of 40 kHz and a fiber length of 20 m. The original signal is filtered in the frequency range from 500 Hz to 4 kHz to remove low-frequency noise and high-frequency components that do not affect speech intelligibility. After filtering, the signal amplitude is normalized.

The effectiveness of DAS in the acoustic range also strongly depends on the correct selection of system operating parameters and the use of advanced data processing algorithms. In this study [2], it was shown that the pulse repetition frequency (f_{rep}) is directly related to the maximum sensory fiber length (L_S). Speech recognition quality significantly improves with increasing ADC sampling frequency (equivalent to f_{rep}). Low f_{rep} (less than 5 kHz) results in the loss of high-frequency speech components. With an active piezoelectric transducer (PZT), the threshold frequency for Whisper NN recognizers is 5 kHz, while for Yandex SpeechKit it is 15 kHz; at 40 kHz, recognition reaches 79.8% (Whisper NN). The use of weak FBGs (wFBG) was found to significantly increase the backscatter level, improving SNR, and achieving a recognition rate of up to 96.3% at a sampling frequency of 40 kHz. Furthermore, the use of open speech recognition services (Yandex SpeechKit) and neural networks (Whisper NN) significantly improves recognition efficiency. The percentage of correctly recognized words and the Levenshtein distance are used for quantitative evaluation. Over 90% of correctly recognized words were achieved at $f_{rep} > 10$ kHz, and no more than 70% at $f_{rep} < 10$ kHz.

The authors of the studies under consideration see broad potential for the application of their findings. Article [2] proposes using DAS for recording voice commands, which can be integrated into smart home and smart city concepts, expanding the functionality of existing security systems and monitoring of extended facilities. The authors also note that further improvements in recognition algorithms will take such systems to a new level, opening up opportunities for the widespread adoption of fiber-optic acoustic sensors with speech recognition in everyday life. Overall, the research results demonstrate the potential for creating high-performance fiber-optic microphone arrays capable of effective sound field monitoring.

DAS DEVELOPMENT PROSPECTS

In the Russian Federation, T8 Sensor specializes in developing distributed acoustic sensing solutions. Its flagship system "Дунай / Danube" is designed to monitor critical infrastructure, including fuel and energy pipeline systems, transport hubs, and energy facilities.

As part of a collaboration between the Russian University of Transport and T8 Sensor, a two-week practical experiment was conducted to explore the capabilities of DAS for monitoring the acoustic environment. Field sound level measurements were taken using a DT-8851 sound level meter and the DAS system in various acoustic conditions (highway, underground metro intersection, residential area). A Telegram bot, recording the start and end time intervals of events, was used to synchronize and tag the data.

A comparative analysis (Fig. 3) showed that basic preprocessing methods (channel averaging, normalization, removal of outliers) provide high correlation between DAS and the sound level meter signals (to the data from the latter a moving average was applied) over short time intervals. The use of a low-pass filter further improved the comparability of the signals, which is consistent with theoretical studies. The results are preliminary but demonstrate the potential of using DAS for monitoring the acoustic environment in urban settings.

Fig. 3. Filtered DAS signals compared to a sound level meter.
Low-pass filter, high-pass filter from 15 Hz;
band-pass filter 10–60 Hz)

The results obtained in this study provide a basis for further research into the use of distributed acoustic sensing for monitoring urban noise pollution. The development of a reliable methodology for calibrating and verifying DAS data is considered a priority.

In the Russian Federation, strictly certified sound level meters that comply with GOST standards are used for official sound level measurements. However, their use for large-scale and long-term studies of the urban environment has several limitations: short continuous recording times, a fixed location, and a limited frequency range. In this regard, the first stage of the research will be aimed at establishing a stable correlation between readings from a certified sound level meter and synchronously recorded audio data from a high-quality voice dictaphone or recorder. Successful completion of this task will allow the future transition to using audio recordings as a reference data source; this is critical for analyzing long (several hours) recording fragments at different times of day and for studying the full spectrum of acoustic events.

It is important to note that not all sounds recorded by a voice recorder (airborne sounds) will likely be equally effectively detected by the DAS system. It is

due to the fact that fiber optic cable laid in the ground is primarily sensitive to vibrations transmitted through the soil. Consequently, noise sources with no mechanical ground contact (e.g., distant voices, sounds from upper-floor windows) may have little effect on the cable or not be detected at all. Studying this selective sensitivity and developing methods to compensate for this effect represent a separate and important scientific challenge.

A key future objective is to develop methods and algorithms that enable the use of already deployed urban fiber-optic infrastructure as a distributed noise sensor.

Hypothesis to be tested in future studies: the correlation between DAS data and urban noise levels is robust and amenable to algorithmic correction. It is expected that, despite the variability of cable installation conditions, adaptive calibration algorithms can be developed that will account for these characteristics and ensure comparable measurement accuracy across different network sections.

CONCLUSION

Distributed acoustic sensing (DAS) is a rapidly evolving technology that can be adapted to a variety of applications. Its effectiveness depends on overcoming physical limitations, one of which is the weak coupling between airborne sound waves and optical fiber; it is particularly important for applications in the acoustic range. Research has shown that the solution to this problem lies not only in improving signal processing algorithms but also in engineering optimization of the sensor system itself.

Design solutions aimed at efficiently converting acoustic energy into mechanical deformations of the fiber are considered one of the most promising areas for the development of DAS systems. Experiments have confirmed that laying cables in coils can increase system sensitivity by 2.2 times by transforming transverse vibrations into longitudinal deformations. Equally critical is tight mechanical contact with the transmission medium. These principles remain relevant for underground installations, where cement-filled trenches have proven superior to placement in protective pipes.

The potential for DAS implementation in acoustic monitoring systems lies in the synergy of three elements: cable type, installation topology that maximizes mechanical coupling (coils, rings), and adaptive signal processing algorithms. This comprehensive optimization paves the way for the creation of an "invisible" acoustic infrastructure for smart cities, where existing fiber-optic networks can perform dual functions—data transmission and high-precision recording of the acoustic environment.