

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.586.5

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРЕДЕЛЕННОГО
АКУСТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НА БАЗЕ РОС-ЛАЗЕРА С
ЗАХВАТОМ ЧАСТОТЫ ВОЛОКОННОГО КОЛЬЦЕВОГО
РЕЗОНАТОРА МЕТОДОМ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДОВОЙ
ДЕКОМПОЗИЦИИ¹

© 2026 г. А. Т. Туров^{a,b,c,*}, Ю. А. Константинов^a, И. С. Паняев^c,
Е. Е. Тотмина^{a,b}, А. И. Абанин^c, Д. А. Коробко^c, А. А. Фотиади^{c,d}

^a Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук

Россия, 614990, Пермь, ул. Ленина, 13а

^b Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29

^c Ульяновский государственный университет

Россия, 432017, Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42

^d Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

*E-mail: artemtur442@gmail.com

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 07.05.2026

Принята к публикации 23.07.2026

Исследована возможность повышения качества регистрации акустических воздействий в распределенном акустическом датчике (DAS), использующем узкополосный лазерный источник на основе РОС-лазера с захватом частоты внешнего волоконного кольцевого резонатора. Применение такого источника позволяет снизить стоимость системы за счет использования стандартных волоконно-оптических компонентов, сохраняющих поляризацию, и простой полностью сварной конфигурации. Вместе с тем остаточные нестабильности лазерной генерации, обусловленные отсутствием виброизоляции и термостабилизации, приводят к снижению отношения сигнал/шум регистрируемых сигналов. Для ослабления влияния нестационарных шумов предложен метод цифровой обработки, основанный на эмпирической модовой

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

декомпозиции (EMD) и последующей селекции модовых компонент по корреляционному критерию. Отбор компонент осуществлялся по среднему модулю коэффициента взаимной корреляции между исходным сигналом и обращенной во времени копией соответствующей моды, вычисляемому в скользящем окне. Компоненты, для которых значение данного критерия было ниже 0.2, исключались при восстановлении сигнала. Экспериментальные исследования, выполненные при акустическом воздействии с частотой 2700 Гц на волокно SMF-28, показали, что предложенный метод позволяет повысить отношение сигнал/шум в три раза и более без существенного искажения полезного сигнала. Полученные результаты подтверждают эффективность применения EMD-обработки для повышения качества работы DAS на базе недорогих лазерных источников.

Ключевые слова: распределенный акустический датчик, эмпирическая модовая декомпозиция, отношение сигнал/шум; корреляционный анализ, обработка сигналов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределенные акустические датчики (DAS) широко применяются для мониторинга протяженных объектов и сред [1, 2]. Наряду с традиционными областями использования, такими как нефтегазовая отрасль и транспортная инфраструктура [3–5], в последние годы возрастает интерес к применению DAS в сельском хозяйстве [6–8], экологическом мониторинге [9–12] и системах автоматизации [13–15]. Для таких приложений особое значение приобретает снижение стоимости системы при сохранении приемлемых метрологических характеристик.

Одним из наиболее дорогостоящих узлов DAS является лазерный источник, который должен отвечать условиям высокой когерентности и стабильности. В работе [16] был описан узкополосный лазер на основе стандартного РОС-лазера с захватом частоты внешнего волоконного кольцевого резонатора, позволяющий снизить стоимость системы за счет использования стандартных волоконных компонентов, сохраняющих поляризацию, и простой полностью сварной конфигурации. Лазерный модуль снабжен активной системой стабилизации, поддерживающей его работу в режиме захвата частоты. Однако в упрощенной реализации, не предусматривающей виброзащиты и термостабилизации, он сохраняет остаточную чувствительность к температурным и вибрационным воздействиям. Это может вызывать перескоки мод, приводящие к кратковременной неустойчивости генерации и ухудшению качества регистрируемых рефлектограмм.

В результате отношение сигнал/шум в DAS снижается, а применение традиционных спектральных методов фильтрации оказывается ограниченным из-за нестационарного характера шумов и их частотного перекрытия с полезным сигналом. В этих условиях перспективным является использование адаптивных методов обработки. Одним из таких методов является эмпирическая модовая декомпозиция (EMD), успешно применяемая для анализа нестационарных сигналов в волоконно-оптических датчиках [17]. Преимущество EMD состоит в том, что она не требует априорного задания базисных функций и позволяет выделять модовые компоненты, соответствующие внутренней

структуре экспериментального сигнала. Это делает данный метод удобным для обработки сигналов DAS в условиях сильных внешних воздействий на лазер.

В настоящей работе предложен метод повышения качества регистрации акустических воздействий в DAS на основе EMD с автоматической селекцией мод по корреляционному критерию. Преимущество подхода состоит в возможности адаптивного подавления шумовых компонент без жесткого задания параметров фильтра и при минимальном искажении полезного сигнала. Целью работы является исследование возможности повышения отношения сигнал/шум в DAS с недорогим лазерным источником на основе РОС-лазера с захватом частоты волоконного кольцевого резонатора за счет применения EMD-обработки. В работе решаются задачи экспериментальной проверки работоспособности системы, разработки алгоритма селекции собственных модовых функций (IMF) и оценки эффективности предложенного метода при регистрации акустического сигнала.

2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ

Конфигурация экспериментальной установки в целом соответствовала схеме, описанной в работе [18], за исключением источника излучения. В качестве мастер-генератора использовалась узкополосная лазерная конфигурация на волокне с сохранением поляризации, описанная в работе [16]. Источник излучения работал на длине волны 1550 нм. Его выходной сигнал поступал на акустооптический модулятор (АОМ), формировавший зондирующие импульсы длительностью 40 нс с периодом повторения 11 мкс. После усиления в эрбиевом волоконном усилителе (EDFA) до средней мощности около 30.5 мВт импульсы через оптический циркулятор вводились в чувствительный элемент – стандартное одномодовое телекоммуникационное волокно SMF-28. Сигнал обратного рэлеевского рассеяния усиливался предусилителем (EDFA) и регистрировался фотоприемником (PD). Оцифровка выполнялась аналого-цифровым преобразователем (АЦП) с частотой дискретизации 500 МГц, что обеспечивало пространственное разрешение около 0.2 м (рис. 1).

Рис. 1. Лабораторный образец волоконно-оптического распределенного акустического датчика

За одну запись в буферной памяти накапливались 762 рефлектограммы, образующие один пакет данных. Для каждого исследуемого режима регистрировалось 200 пакетов. Для иллюстрации эффективности предлагаемой обработки далее приведены наиболее характерные результаты. Акустическое воздействие создавалось с помощью вибродинамика, воздействовавшего на участок волокна длиной 200 м, уложенный по

спирали на виниловую пластинку. Пластинка с волокном закреплялась на одной стороне металлической полки, а вибродинамик устанавливался на другой стороне. Частота акустического воздействия составляла 2700 Гц. Ее выбор определялся полосой пропускания приемного тракта установки при заданных параметрах АЦП и длительности зондирующего импульса.

Разработанный метод обработки предназначен для повышения отношения сигнал/шум в одномерных временных рядах интенсивности обратного рассеяния, формируемых для каждой пространственной точки волокна. Метод включает несколько последовательных этапов. На первом этапе исходный сигнал $x(t)$ подвергается эмпирической модовой декомпозиции [19]. В отличие от преобразований Фурье и вейвлет-разложения, данный метод является адаптивным и не требует предварительного задания базисных функций. В процессе итеративной процедуры просеивания сигнал раскладывается на конечный набор собственных модовых функций IMF и остаточную составляющую. Каждая IMF представляет собой осциллирующую компоненту, отражающую характерные особенности сигнала. В результате исходный сигнал может быть представлен в виде

$$x(t) = \sum_{j=1}^n \{ \text{IMF}_j(t) + r_n(t) \},$$

где n – количество полученных мод, а $r_n(t)$ – остаточная трендовая составляющая.

При высоком уровне шума полезный сигнал, как правило, распределяется по нескольким IMF одновременно с шумовыми компонентами, поэтому выделение информативных мод по их номеру или частотному положению оказывается неэффективным. В связи с этим для разделения сигнальных и шумовых IMF использован критерий, основанный на сравнении каждой моды с ее обращенной во времени копией.

Для каждой моды $\text{IMF}_j(t)$, представленной в виде дискретного массива, формировалась реверсированная последовательность $\text{IMF}_j^{\text{rev}}(t)$, в которой элементы исходной моды располагались в обратном порядке. Основанием для такого подхода служит различие между шумовой и детерминированной составляющими сигнала. Стационарный случайный шум статистически инвариантен к обращению времени, и его корреляционные свойства при реверсе изменяются слабо. Напротив, детерминированный нестационарный сигнал обладает выраженной временной структурой, которая при обращении времени нарушается. Поэтому степень корреляции между исходным сигналом и реверсированной копией моды может использоваться в качестве признака информативности данной моды.

Коэффициент взаимной корреляции между исходным сигналом и обращенной копией каждой моды вычислялся в скользящем окне, что позволяло учитывать локальные особенности сигнала. Интегральный коэффициент значимости k_j для j -й моды определялся как модуль среднего арифметического локальных коэффициентов корреляции:

$$k_j = \left| \overline{r_{\text{windowed}}(\text{IMF}_j, \text{IMF}_j^{\text{rev}})} \right|. \quad (2)$$

Использование модуля обусловлено тем, что существенным является наличие статистической связи, а не ее знак. Пороговое значение было выбрано на основе анализа поведения коэффициента корреляции для заведомо шумовых и заведомо сигнальных мод на имеющейся экспериментальной выборке. Как показано в табл. 1, для мод, несущих полезный сигнал, модуль среднего коэффициента корреляции превышает 0.3, тогда как для преимущественно шумовых мод он не поднимается выше нескольких сотых. Промежуточные значения, которые потребовали бы более тонкой настройки порога, в исследованных данных не наблюдались. На этом основании пороговое значение было принято равным 0.2. Следует отметить, что формальная процедура оптимизации порога на независимой выборке не проводилась, поэтому указанное значение отражает особенности использовавшейся конфигурации установки и не претендует на универсальность; вместе с тем, как показали эксперименты, метод не демонстрирует высокой чувствительности к точному значению порога в его окрестности. По результатам предварительных экспериментов пороговое значение принималось равным $k_j = 0.2$. Моды, для которых $k_j < 0.2$, считались преимущественно шумовыми и подавлялись умножением на весовой коэффициент 0.1. Для информативных мод с $k_j \geq 0.2$ весовой коэффициент принимался равным 1.

Отфильтрованный сигнал $x_{\text{filtered}}(t)$ восстанавливался в виде

$$x_{\text{filtered}}(t) = \sum_{j=1}^n \{w_j \text{IMF}_j(t)\}, \quad (3)$$

где $w_j = 0.1$ для подавляемых мод и $w_j = 1$ для сохраняемых мод.

На заключительном этапе для каждого распределения $x_{\text{filtered}}(t)$ вычислялось быстрое преобразование Фурье. Полученные данные представлялись в виде трехмерной зависимости в координатах “расстояние–частота–амплитуда”, что позволяло одновременно анализировать пространственную локализацию и спектральный состав зарегистрированного акустического воздействия.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эффективность предложенного алгоритма проверялась на экспериментальных данных, полученных при акустическом воздействии с частотой 2700 Гц. На первом этапе

анализа для каждого рассматриваемого пакета данных определялись пространственные точки волокна, соответствующие зоне акустического воздействия. Их идентификация выполнялась по локальному максимуму спектральной амплитуды на частоте воздействия в необработанных данных. Типовая временная развертка сигнала для таких точек приведена на рис. 2.

Рис. 2. Временная развертка сигнала, зарегистрированного на удалении 626 м от

На рис. 3 представлен результат быстрого преобразования Фурье (БПФ) для пакета данных №50, зарегистрированного в режиме стабилизации без применения EMD-фильтрации. Наряду с основным спектральным пиком наблюдаются паразитные составляющие на частотах выше примерно 5000 Гц, не связанные с акустическим воздействием. Их появление обусловлено механическими резонансами конструкции экспериментального стенда.

Рис. 3. Трехмерное отображение быстрого преобразования Фурье выходных данных датчика для пакета данных №50.

Для количественной оценки качества регистрации сигнала использовалось отношение сигнал/шум (SNR), определяемое как отношение среднего значения амплитуды в области локализации полезного сигнала к среднему значению амплитуды вне этой области массива.

EMD исходного сигнала выполнялась с ограничением максимального числа извлекаемых мод, равным пяти. Это значение было выбрано эмпирически как компромисс между двумя эффектами. При меньшем числе мод возрастает вероятность смещения компонент разных временных масштабов в одной IMF, тогда как при большем числе наблюдается избыточное дробление сигнальных компонент, затрудняющее их последующую селекцию.

Рис. 4. Результат EMD-разложения: исходный сигнал и 5 собственных модовых

Результат модового разложения сигнала, показанного на рис. 2, приведен на рис. 4. Видно, что основная часть полезного сигнала сосредоточена в модах IMF₂ – IMF₄, демонстрирующих выраженную квазипериодическую структуру с характерными временными масштабами, соответствующими частоте акустического воздействия и ее субгармоникам. Моды IMF₁ и IMF₅, напротив, соответствуют преимущественно высокочастотному шуму и медленному дрейфу базовой линии и не содержат значимой информации о полезном сигнале. Это согласуется со значениями коэффициента корреляции k_j , приведенными в табл. 1.

Автоматическая классификация мод осуществлялась по коэффициенту корреляции между обращенной во времени копией моды и исходным сигналом, вычисляемому в скользящем окне длиной 150 отсчетов. Для каждой моды локальные коэффициенты корреляции усреднялись, после чего вычислялся модуль среднего значения. Если $k_j < 0.2$, то соответствующая мода классифицировалась как шумовая и подавлялась при формировании отфильтрованного сигнала $x_{\text{filtered}}(t)$ в соответствии с выражением (3).

В табл. 1 приведены средние значения коэффициента корреляции k_j для пяти IMF, вычисленные для двух пространственных точек волокна: на расстоянии 626 м, соответствующем зоне акустического воздействия, и на расстоянии 150 м, где полезный сигнал отсутствует. Для построения таблицы использовался пакет данных №50, зарегистрированный с лазером, работающим в режиме стабильной генерации. Анализ данных, представленных в табл. 1 и на рис. 4, показывает, что характерной границей между сигнальными и шумовыми компонентами является значение $|k_j|=0.2$. Поэтому моды, для которых модуль среднего коэффициента корреляции был меньше 0.2, при восстановлении сигнала умножались на 0.1, а остальные включались в сумму без изменений.

Таблица 1. Значения среднего коэффициента корреляции k_j инвертированных мод

Пакет данных №50	k_j (626 м, есть полезный сигнал)	k_j (150 м, нет полезного сигнала)
IMF ₁	0.0013	0.0484
IMF ₂	−0.7108	0.0754
IMF ₃	−0.3307	0.0571
IMF ₄	0.0064	−0.0301
IMF ₅	0.0087	0.0121

Для проверки работоспособности предложенного подхода обрабатывались пакеты данных №№50–52, зарегистрированные в режиме стабильной лазерной генерации и характеризующиеся близкими исходными значениями SNR, а также пакет №17, записанный в редкий момент перескока мод. Последний был записан в момент перескока моды внешнего волоконного резонатора. Кратковременный сдвиг несущей длины волны в этом случае приводил к резкому изменению интерференционной картины рефлектограммы, что проявлялось в виде характерного артефакта во временном ряду и существенного снижения SNR. В необработанном виде данные пакета №17 не обеспечивали уверенного визуального обнаружения полезного сигнала на фоне шума, что делает данный случай наиболее показательным для оценки эффективности алгоритма в предельных условиях. Результаты обработки приведены на рис. 5, а соответствующие значения SNR до и после обработки – в табл. 2.

Рис. 5. Данные, подвергавшиеся обработке предлагаемой методикой, в

Таблица 2. Значения SNR для всех исследованных пакетов данных до обработки и после нее

SNR	Пакет данных №50, лазер стабилизирован	Пакет данных №51, лазер стабилизирован	Пакет данных №52, лазер стабилизирован	Пакет данных №17, эпизод перескока моды
До обработки	7.5	7.3	7.3	2.4
После обработки	25.9	24.7	24.0	3.5

Анализ результатов, представленных на рис. 5 и в табл. 2, показывает, что применение разработанного алгоритма во всех рассмотренных случаях приводит к подавлению шумовых компонент при сохранении формы и амплитуды полезного сигнала. Для пакетов №№50–52, зарегистрированных в режиме стабильной генерации, прирост SNR составил в среднем 3.4 раза. Для пакета №17, записанного в момент редкого перескока моды резонатора, алгоритм обеспечил увеличение SNR в 1.5 раза, в результате чего спектральный пик на частоте воздействия стал визуально различим на трехмерной карте. Это свидетельствует о работоспособности метода в условиях, когда необработанные данные не позволяют надежно идентифицировать акустическое событие.

Полученные результаты подтверждают, что предложенный критерий селекции мод на основе корреляции с обращенной во времени копией позволяет корректно разделять шумовые и сигнальные IMF без внесения заметных искажений в спектральные характеристики полезного сигнала.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрение физической природы компонент, выделяемых эмпирической модовой декомпозицией, а также анализ сильных сторон и ограничений предложенного подхода необходимы для понимания границ применимости метода и корректной интерпретации получаемых результатов.

Эмпирические моды, выделяемые при разложении сигнала обратного рассеяния, отражают вклад физических процессов, протекающих в системе на разных временных масштабах. Высокочастотная мода IMF₁ (рис. 4) соответствует быстрым флуктуациям интенсивности, не связанным с акустическим откликом. Их происхождение может быть обусловлено тепловым шумом фотоприемника и усилительных каскадов, а также быстрыми фазовыми флуктуациями, вызванными остаточной частотной нестабильностью лазерного источника. В используемой упрощенной лазерной конфигурации подавление высокочастотного шума специально не оптимизировалось, поэтому такие флуктуации могут преобразовываться в амплитудный шум сигнала обратного рассеяния. Низкие

значения коэффициента корреляции для этой моды подтверждают ее преимущественно шумовой характер.

Моды IMF_2 и IMF_3 несут основную информацию об акустическом воздействии. Именно в них проявляются компоненты, соответствующие частоте 2700 Гц и связанным с ней гармоникам. Это обусловлено тем, что акустическое воздействие вызывает периодическое изменение эффективной оптической длины волокна, что приводит к фазовой модуляции рассеянного излучения и в схеме прямого детектирования к модуляции интенсивности на той же частоте. Высокие значения коэффициента корреляции для указанных мод свидетельствуют о наличии в них устойчивой структуры полезного сигнала. Мода IMF_4 , несмотря на квазипериодический характер, по принятому критерию вносит малый вклад в полезный сигнал, а ее подавление не приводит к заметному ухудшению результата. Низкочастотная мода IMF_5 связана с медленными процессами, такими как температурный дрейф и релаксация механических напряжений, она практически не влияет на регистрацию сигнала с частотой 2700 Гц.

Преимущество предложенного метода состоит в его адаптивности. Он не требует априорной информации о частоте полезного сигнала, параметрах шума или предварительной настройки фильтра под конкретные условия эксперимента. Решение о подавлении принимается отдельно для каждой моды, а не для частотного диапазона в целом, что позволяет уменьшить уровень шумовой составляющей при сохранении амплитуды полезного сигнала. Вычислительная сложность метода выше, чем у стандартной спектральной фильтрации, однако она остается приемлемой для цифровой обработки в режиме, близком к реальному времени. Ускорение вычислений за счет перехода от скользящего окна к корреляции по всему сигналу возможно, но сопровождается снижением эффективности фильтрации и частичной потерей полезной информации.

Эффективность метода зависит от выбора порогового значения коэффициента корреляции. Значение 0.2, использованное в настоящей работе, показало хорошие результаты для исследуемых экспериментальных данных, однако в общем случае оно может потребовать уточнения в зависимости от типа волокна, характеристик лазерного источника и спектрального состава шумов. Дополнительным ограничением является зависимость метода от характера полезного сигнала. Для тонального акустического воздействия, использованного в настоящей работе, информативные моды сохраняют корреляционную связь с исходным сигналом после обращения во времени. Для коротких импульсных или нерегулярных сигналов эта связь может ослабевать, что повышает вероятность ошибочной классификации информативных мод как шумовых. Кроме того, в

отдельных случаях EMD подвержена эффекту модового смешивания, снижающему селективность последующего корреляционного анализа. Тем не менее для задач регистрации периодических акустических сигналов на фоне интенсивных нестационарных шумов предложенный метод показывает высокую эффективность.

Спектральная фильтрация в условиях данной задачи ограничена тем, что спектр шума, вызванного перескоком моды, перекрывается с частотой полезного сигнала (2700 Гц). Эффективность вейвлет-фильтрации с фиксированным базисом может быть ограничена из-за нестационарного характера искажений. Преимущество EMD в данном случае обусловлено именно адаптивностью базиса и отсутствием требований к априорному выбору материнского вейвлета или полосы пропускания. Сравнивая вычислительную сложность обсуждаемых аналогов предлагаемого метода, можно отметить следующее: предложенный метод включает три этапа – эмпирическую модовую декомпозицию исходного сигнала, вычисление коэффициентов корреляции между каждой модой и ее обращенной во времени копией в скользящем окне и взвешенное восстановление сигнала с подавлением шумовых компонент.

Эмпирическая модовая декомпозиция представляет собой итеративную процедуру просеивания, время вычисления которой линейно зависит от длины сигнала и числа итераций, необходимых для выделения каждой моды. Основные затраты приходятся на кубическую сплайновую интерполяцию огибающих, перехода в частотную область не требуется. Частотная фильтрация с использованием БПФ выполняется за время, пропорциональное произведению длины сигнала на логарифм этой длины. Дискретное вейвлет-преобразование также обладает логарифмической зависимостью времени вычисления и дополнительно обеспечивает частотно-временную локализацию, однако его эффективность зависит от выбора материнского вейвлета и параметров пороговой обработки.

В предложенном подходе дополнительный вклад вносит корреляционная селекция мод: для каждой моды коэффициент корреляции с ее обращенной копией вычисляется в скользящем окне, что линейно зависит от произведения длины сигнала на размер окна. При пяти модах и длине окна 150 отсчетов эта процедура увеличивает время обработки примерно на 40–50 % по сравнению с чистым EMD-разложением без селекции. Итоговое время вычисления остается линейно зависящим от длины сигнала, что выгодно отличает данный метод от подходов с полным спектральным разложением. Вместе с тем линейная зависимость достигается ценой итеративных процедур с переменным числом шагов.

Таким образом, фурье-фильтрация остается наиболее быстрым решением для стационарных узкополосных сигналов, вейвлет-фильтрация дает компромисс между

быстродействием и частотно-временной локализацией, а предложенный метод выигрывает в адаптивности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработан и экспериментально апробирован метод повышения отношения сигнал/шум в распределенном акустическом датчике, использующем недорогой лазерный источник на основе РОС-лазера с захватом частоты внешнего волоконного кольцевого резонатора. Показано, что данный источник принципиально пригоден для применения в DAS. Регистрируемые с его использованием данные содержат информацию об акустическом воздействии, однако для повышения качества регистрации требуется дополнительная цифровая обработка.

Предложенный метод, основанный на эмпирической модовой декомпозиции и корреляционной селекции мод, обеспечивает эффективное подавление шумовых компонент при сохранении амплитудных и частотных характеристик полезного сигнала. Экспериментально установлено, что при регистрации акустического воздействия с частотой 2700 Гц обработка позволяет увеличить отношение сигнал/шум в 3.5 раза – с 7.5 до 25.9 дБ.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования адаптивной EMD-обработки для повышения эффективности DAS на базе упрощенных и экономичных лазерных источников. Дальнейшее развитие работы может быть связано с уточнением критерия выбора порогового значения коэффициента корреляции, исследованием применимости метода к более сложным и многочастотным акустическим сигналам, адаптацией алгоритма к работе в режиме реального времени и проведением натурных испытаний разработанной системы в прикладных задачах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Разделы 1, 2 выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант №23-79-30017, разработка и сборка узкополосного источника и грант №25-72-10174, интеграция источника в DAS, проведение экспериментов), разд. 3–5 выполнены в рамках государственного задания №124020600009-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taranov M.A., Gorshkov B.G., Alekseev A.E., Konstantinov Y.A., Turov A.T., Barkov F.L., Wang Z., Zhao Z., Zan M.S.D., Kolesnichenko E.V.* Instrum. Exp. Tech. 2023. V. 66. № 5. P. 713. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050238>

2. Shao L., Zhang J., Chen X., Xu D., Gu H., Mu Q., Yu F., Liu S., Shi X., Sun J., Huang Z., Yang X., Zhang H., Ma Y., Lu H., Liu C., Yu C. *Photonix*. 2025. V. 6. Art. 4. <https://doi.org/10.1186/s43074-025-00160-z>
3. Haavik K.E. *SPE J.* 2023. V. 28. № 3. P. 1517. <https://doi.org/10.2118/212868-PA>
4. Wiesmeyr C., Litzenberger M., Waser M., Papp A., Garn H., Neunteufel G., Döller H. *Appl. Sci.* 2020. V. 10. № 2. Art. 448. <https://doi.org/10.3390/app10020448>
5. Corera I., Piñeiro E., Navallas J., Sagues M., Loayssa A. *Sensors*. 2023. V. 23. № 6. Art. 3127. <https://doi.org/10.3390/s23063127>
6. Wang B., Mao Y., Ashry I., Al-Fehaid Y., Al-Shawaf A., Ng T.K., Yu C., Ooi B.S. *Sensors*. 2021. V. 21. № 5. Art. 1592. <https://doi.org/10.3390/s21051592>
7. Mankin R., Hagstrum D., Guo M., Eliopoulos P., Njoroge A. *Insects*. 2021. V. 12. № 3. Art. 259. <https://doi.org/10.3390/insects12030259>
8. Tei M., Soma F., Barbieri E., Uga Y., Kawahito Y. *Plant Methods*. 2024. V. 20. Art. 36. <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01160-z>
9. Ariff T., Havlik M.-N., Kang C.H., Rjeb A., Marin J.M., Ng T.K., Duarte C.M., Ashry I., Ooi B.S. *Sci. Rep.* 2025. V. 15. Art. 45629. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30200-4>
10. Xenaki A., Gerstoft P., Williams E., Abadi S. *J. Acoust. Soc. Am.* 2025. V. 158. № 1. P. 801–825. <https://doi.org/10.1121/10.0037218>
11. Jiang Q., Liu Y., Sun Y., Ren L., Luo Y. *Insects*. 2025. V. 16. Art. 1241. <https://doi.org/10.3390/insects16121241>
12. Wang Z., Zhang C.-C., Le Maho Y., Zhang Z., Habold C., Courtecuisse J., Shi B. *Commun. Earth Environ.* 2025. V. 6. Art. 956 <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02904-y>
13. Feng G., Mai J., Ban Z., Guo X., Wang G. *IEEE Pervasive Comput.* 2016. V. 15. № 2. P. 40. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2016.27>
14. Орлова М.В., Гриценко Т.В., Жирнов А.А., Константинов Ю.А., Туров А.Т., Пнев А.Б., Карасик В.Е. *Приб. техн. эксп.* 2023. № 5. С. 129. <https://doi.org/10.31857/S0032816223050208>
15. Shi Y., Zhang Y., Dai S., Zhao L., Xu C. *Opt. Express*. 2023. V. 31. № 25. P. 41391. <https://doi.org/10.1364/OE.502163>
16. Panyayev I.S., Itrin P.A., Korobko D.A., Fotiadi A.A. *J. Lightwave Technol.* 2024. V. 42. № 8. P. 2928. <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3348994>

17. *Qin Z., Chen H., Chang J.* Sensors. 2017. V. 17. № 8. Art. 1870.
<https://doi.org/10.3390/s17081870>
18. *Turov A.T., Konstantinov Y.A., Totmina E.E., Votinova A.G., Masich G.F., Korobko D.A., Fotiadi A.A.* Sensors. 2025. V. 25. Art. 2101. <https://doi.org/10.3390/s25072101>
19. *Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C.C., Liu H.H.* Proc. R. Soc. Lond. A. 1998. V. 454. № 1971. P. 903.
<https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Лабораторный образец волоконно-оптического распределенного акустического датчика
- Рис. 2.** Временная развертка сигнала, зарегистрированного на удалении 626 м от входного торца волокна в пакете данных №50, записанных с лазером, работающим в режиме стабильной генерации
- Рис. 3.** Трехмерное отображение быстрого преобразования Фурье выходных данных датчика для пакета данных №50. Акустическое воздействие производилось на частоте 2700 Гц на 200 м волокна, уложенного на пластинку. Точка с наибольшей амплитудой соответствует рис. 2; $SNR = 7.5$
- Рис. 4.** Результат EMD-разложения: исходный сигнал и 5 собственных модовых функций IMF_1 – IMF_5 . Пакет данных №50 получен с лазером, работающим в режиме стабильной генерации
- Рис. 5.** Данные, подвергавшиеся обработке предлагаемой методикой, в оригинальном и отфильтрованном видах

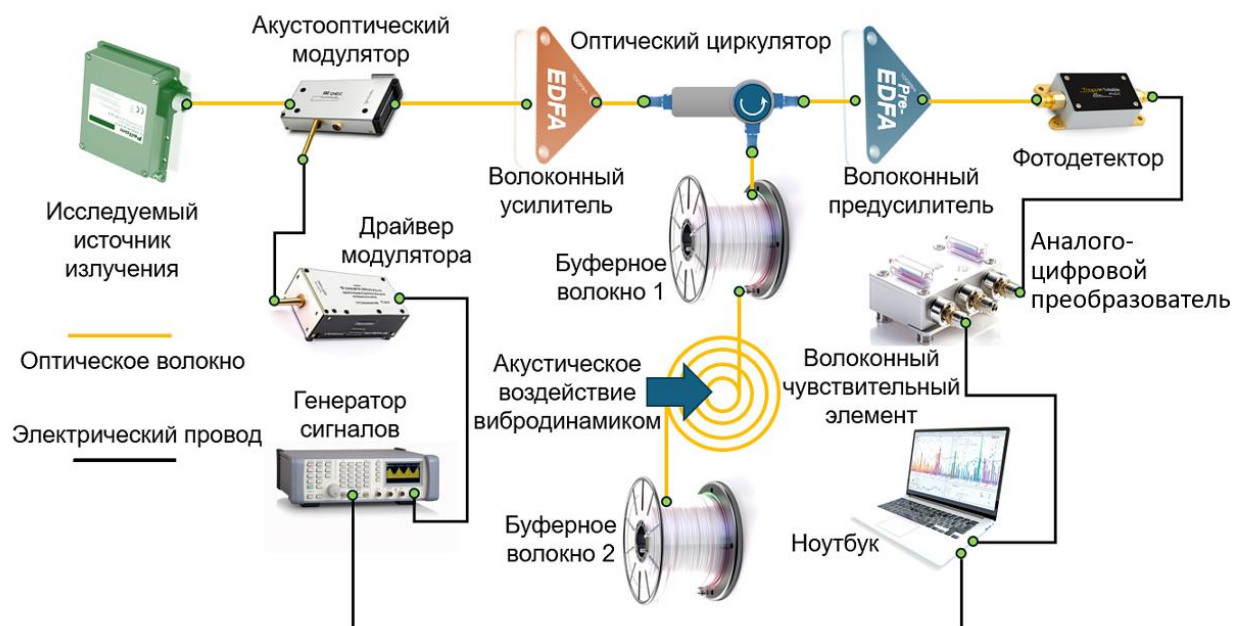


Рис.1.

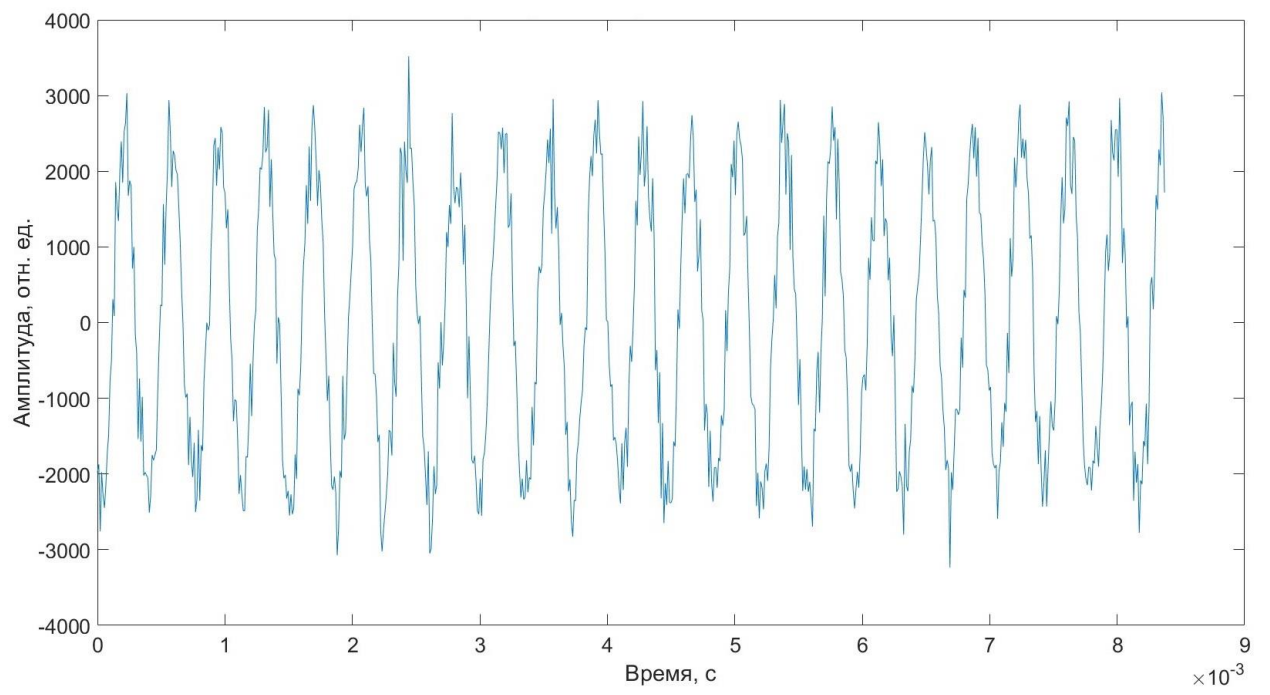


Рис. 2.

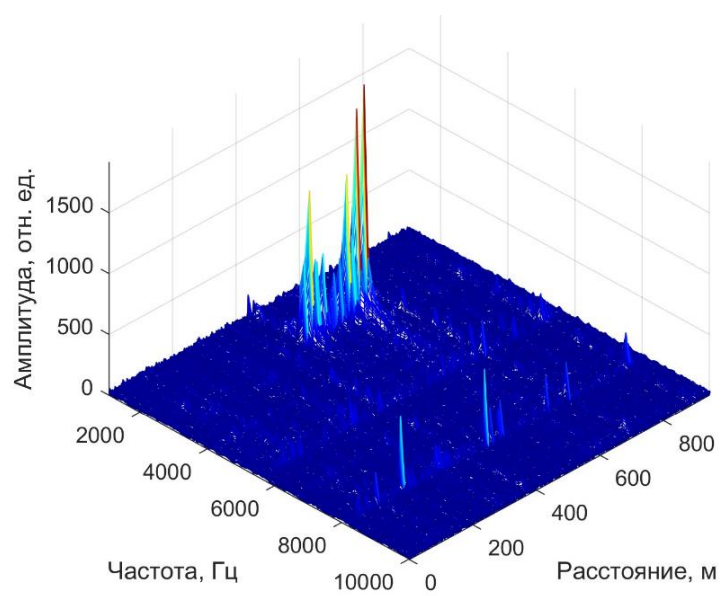


Рис. 3.

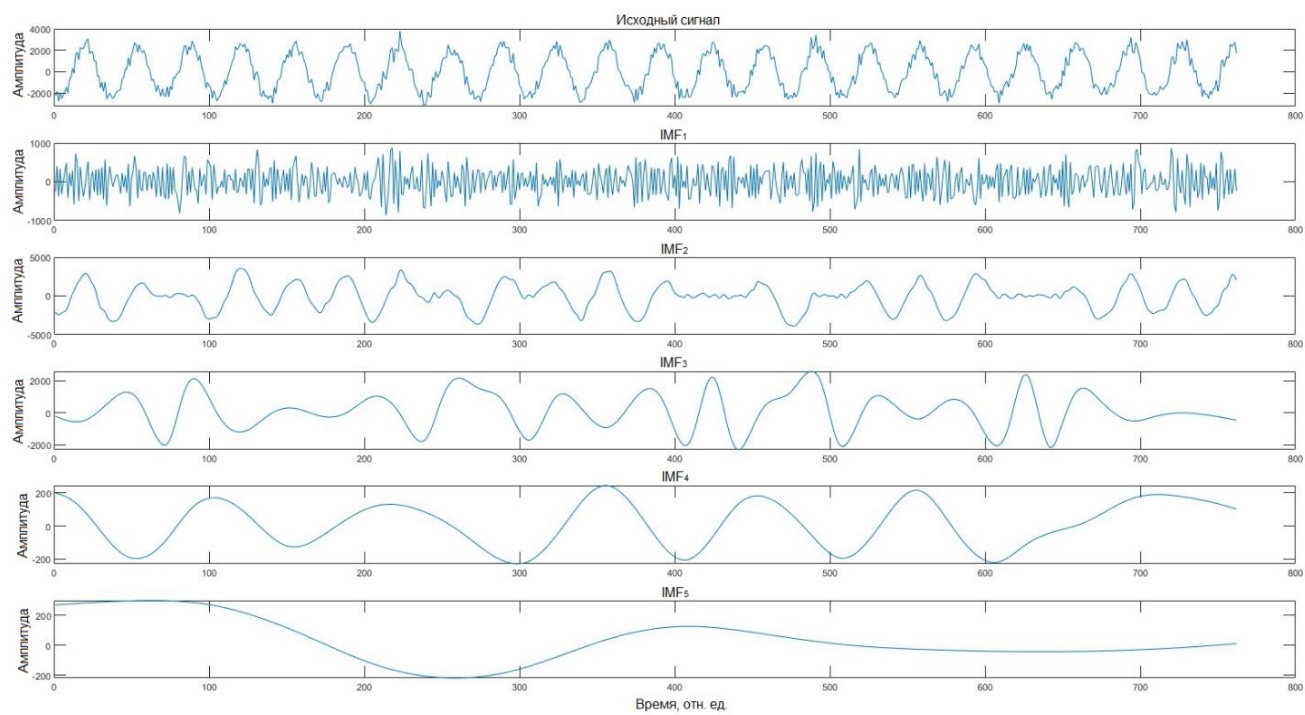


Рис. 4.

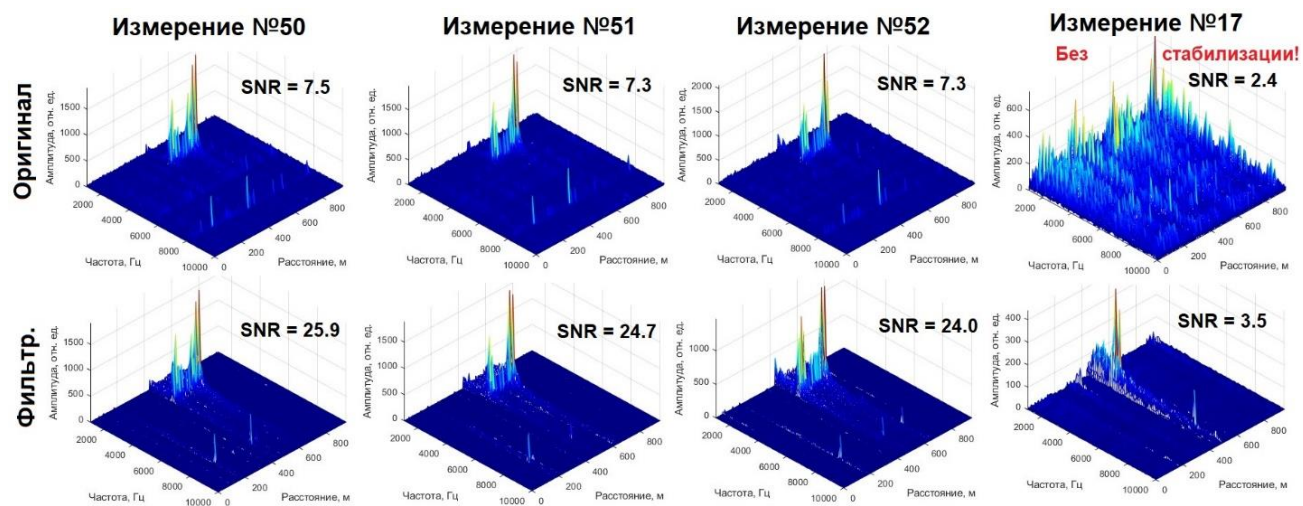


Рис. 5.