

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

Жапарбек Тимур Кайратулы

На тему: «Анализ и сравнение методов обработки сигналов для распределённых
акустических датчиков»

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казакский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
канд. техн. наук, ассоциированный
профессор
Г. Жантай
"26" 05 2025 г.



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Анализ и сравнение методов обработки сигналов для распределённых
акустических датчиков»

Образовательная программа: 6B07104 – Electronic and Electrical Engineering

Выполнил

_____ Жапарек Т. К.

Рецензент

Научный руководитель

PhD, заведующий кафедрой Алматинского
университета энергетики и связи имени

м.т.н., старший преподаватель, КазНИТУ
им. К. И. Сатпаева

Г. Даукеева

_____ Төлен Г. Б.

 Шыныбай Ж. С.

"21" 05 2025 г.

"26" 05 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий Кафедрой ТИКТ
канд. техн. наук, ассоциированный
профессор
Е. Гантай
2025 г.



ЗАДАНИЕ
на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Жапарбек Тимур Кайратулы

Тема: " Анализ и сравнение методов обработки сигналов для распределённых
акустических датчиков "

Утверждена приказом Ректора Университета №261110 от "29" 01 2024 г.

Срок сдачи законченной работы "30" 05 2025 г.

Исходные данные к дипломной работе: используются различные типы сигналов (синусоидальные, импульсные, шумовые) с параметрами 1000 Гц и 1 секунда, датчики с диапазоном 20 Гц–20 кГц, методы обработки FIR, IIR, phase unwrapping, VMD и ML, реализованные в Python с использованием NumPy и SciPy. Краткое содержание дипломной работы:

а) смоделированы сигналы (синусоидальные, импульсные, шумовые) — 1000 Гц, 1 секунда.

б) применены методы обработки: FIR, IIR, phase unwrapping, VMD, ML.

в) реализация выполнена на Python с использованием NumPy и SciPy.

Перечень графического материала: представлены 10–15 слайдов презентации работы:

1. Графики моделируемых сигналов (синусоидальный, импульсный, шумовой).
2. Схемы обработки сигналов с применением FIR, IIR, VMD и ML.
3. Результаты обработки: спектры, фильтрация, сравнение до и после.

Рекомендуемая основная литература: Liang Y. et al., 2024, Zhang H. et al., 2023, Qian Y. et al., 2023, Zhou Z. et al., 2023, Sun Z. et al., 2023, Zhang S. et al., 2024, Wu H. et al., 2023, Wang Y. et al., 2023, Lin J. et al., 2023, Li Y. et al., 2024.

ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
1. Распределённые акустические системы	4.01.2025 - 31.01.2025	Выполнено
2. Методы обработки сигналов в DAS	15.01.2025 - 28.03.2025	Выполнено
3. Экспериментальное моделирование и сравнение методов обработки	01.04.2025 - 20.04.2025	Выполнено
4. Формирование разделов и оформление дипломной работы в соответствии с требованиями СТ КазНУТУ 09-2023.	20.04.2025 - 30.04.2025	Выполнено

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Обсуждение темы дипломной работы	Старший преподаватель кафедры, м.т.н, Төлен Г. Б.	15.01.2025	
Основная часть	Старший преподаватель кафедры, м.т.н, Төлен Г. Б.	30.04.2025	
Нормоконтролер	Ассистент кафедры ЭТиКТ Маткаримова А. А.	26.05.2025	

Научный руководитель

 Төлен Г. Б.

Задание принял к исполнению обучающийся

 Жапарбек Т. К.

Дата

" 4 " 01 2025 г.

АННОТАЦИЯ

Дипломдық жұмыста таралған акустикалық зондтау (DAS) жүйелеріндегі сигналдарды өңдеу әдістері зерттелді. DAS жүйелерінің жұмыс принциптері, сигналдарды жіктеу және өнеркәсіптік шешімдер қарастырылды.

Синтетикалық сигналдар модельденді, FIR және IIR сүзгілері қолданылды, фазалық бұрмалануларды қалпына келтіру үшін TIE әдісі және 2D-SenseNet нейрондық желісі пайдаланылды. Әдістер сапа метрикалары бойынша салыстырылды. Оқиғаларды анықтау үшін Random Forest алгоритмі енгізілді.

Алынған нәтижелер нейрондық желі әдістерінің тиімділігін және мониторинг дәлдігін арттыру мүмкіндігін көрсетті.

АННОТАЦИЯ

В дипломной работе исследованы методы обработки сигналов для систем распределённого акустического зондирования (DAS). Рассмотрены принципы работы DAS, классификация сигналов и промышленные реализации.

Проведено моделирование синтетических сигналов, реализация FIR- и IIR-фильтров, фазовое развёртывание методом TIE и нейросетевой моделью 2D-SenseNet. Выполнен сравнительный анализ методов по метрикам качества. Реализован алгоритм Random Forest для автоматической классификации событий.

Полученные результаты подтверждают эффективность нейросетевых методов обработки и возможность повышения точности мониторинга с применением машинного обучения.

ANNOTATION

This thesis investigates signal processing methods for distributed acoustic sensing (DAS) systems. The principles of DAS operation, signal classification, and industrial solutions are reviewed.

Synthetic signals were modeled; FIR and IIR filters were implemented; phase unwrapping was performed using the TIE method and the 2D-SenseNet neural network. A comparative analysis of methods was conducted based on quality metrics. A Random Forest classifier was developed for event classification.

The results confirm the effectiveness of neural network methods and demonstrate the potential to improve monitoring accuracy using machine learning.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Распределённые акустические системы	8
1.1 Общая характеристика DAS	8
1.2 Классификация и виды DAS	10
1.3 Архитектура и компоненты системы	10
1.4 Примеры промышленных DAS-систем и их сравнительный анализ	13
2 Методы обработки сигналов в DAS	14
2.1 Типы сигналов в DAS и задачи цифровой обработки	19
2.2 Фильтрация сигналов в DAS	19
2.2 Фазовое развёртывание в системах DAS	20
2.3 Разложение сигналов в DAS (метод VMD)	24
2.4 Применение методов машинного обучения в DAS	24
2.5 Сравнительный вывод по методам обработки сигналов в DAS	25
2.6 Экспериментальное моделирование и сравнение методов обработки	27
3.1 Методика моделирования сигналов и построения эксперимента	30
3.2 Реализация методов обработки сигналов	33
3.3 Оценка качества обработки и сравнение методов	33
3.4 Сравнительный вывод и практические рекомендации	34
Заключение	42
Список используемой литературы	43
Приложение А	

ВВЕДЕНИЕ

Распределённые акустические датчики (Distributed Acoustic Sensing, DAS) на базе волоконно-оптических технологий за последние годы стали важным инструментом для мониторинга инфраструктурных и природных процессов. Их уникальное преимущество заключается в способности преобразовывать обычные оптоволоконные кабели в непрерывные линии датчиков, обеспечивающие высокую пространственную и временную разрешающую способность без необходимости в отдельных чувствительных элементах. Такое свойство делает технологию DAS незаменимой в задачах контроля транспортных магистралей, предупреждения землетрясений, охраны периметра, мониторинга туннелей и трубопроводов.

Основу большинства современных DAS-систем составляет фазочувствительная оптическая рефлектометрия (φ-OTDR), позволяющая фиксировать малейшие вибрационные и акустические возмущения, возникающие вдоль линии волокна. Однако практическое применение технологии DAS требует надёжной и точной обработки получаемых сигналов, поскольку они подвержены шумам, искажениям и фазовым разрывам. Для решения этой задачи применяются разнообразные методы цифровой обработки сигналов: от классической фильтрации до современных алгоритмов машинного обучения и глубоких нейронных сетей.

Целью данной работы является проведение анализа и сравнительного исследования существующих подходов к обработке сигналов в системах DAS, включая как традиционные цифровые фильтры, так и интеллектуальные методы на базе нейросетей и фазового развёртывания. Научная новизна заключается в обобщении современных подходов к фильтрации и классификации сигналов, а также в практической реализации моделирования сигналов и алгоритмов их обработки. В работе используются как теоретические положения цифровой обработки, так и реальные примеры, заимствованные из актуальных научных публикаций 2020–2024 годов.

1 Распределённые акустические системы

1.1 Общая характеристика DAS

Развитие технологий волоконно-оптических датчиков привело к созданию распределённых сенсорных систем нового поколения, способных обеспечивать высокоточную регистрацию внешних воздействий вдоль всей протяжённости оптического кабеля. Среди таких решений особое место занимает технология Distributed Acoustic Sensing (DAS), или распределённого акустического зондирования. Она позволяет превратить стандартную волоконно-оптическую линию в непрерывный массив датчиков, реагирующих на механические колебания, шумы, вибрации и удары с высокой пространственной и временной точностью.

Растущие потребности в мониторинге протяжённых объектов, таких как нефтегазопроводы, линии электропередачи, железнодорожные пути, мосты и тоннели, требуют от систем наблюдения высокой чувствительности, устойчивости к внешним помехам и способности работать в реальном времени. DAS-системы отвечают этим требованиям, обеспечивая регистрацию акустических сигналов на расстояниях десятков километров с точностью до метров и миллисекунд.

Среди ключевых преимуществ DAS можно выделить следующие: – отсутствие необходимости в размещении активных датчиков вдоль трассы; – устойчивость к электромагнитным помехам; – высокая чувствительность к деформациям волокна; – возможность работы в сложных климатических и промышленных условиях [1], [2].

Принцип действия ϕ -OTDR. Основной технологией, лежащей в основе большинства DAS-систем, является фазочувствительный оптический рефлектометр во временной области (ϕ -OTDR, англ. phase-sensitive Optical Time-Domain Reflectometry). Суть этой технологии заключается в регистрации обратного рассеяния света, возникающего при прохождении когерентного лазерного импульса по оптоволоконной линии. В отличие от классических OTDR-систем, ϕ -OTDR не только измеряет амплитуду рассеянного сигнала, но и учитывает его фазовые характеристики, что позволяет фиксировать даже малейшие деформации волокна.

При отсутствии внешних возмущений сигнал обратного рассеяния остаётся стабильным. Однако в случае появления вибрации, удара или другого механического воздействия на участок волокна, возникает локальное изменение длины и, как следствие, сдвиг фазы обратного сигнала. Эти изменения регистрируются интеррогатором и обрабатываются в цифровом виде для определения места, времени и характера события [2], [3].

Как показано на рисунке 1.1, каждая точка вдоль волоконной линии становится виртуальным чувствительным элементом, способным регистрировать акустические сигналы в заданной полосе частот.

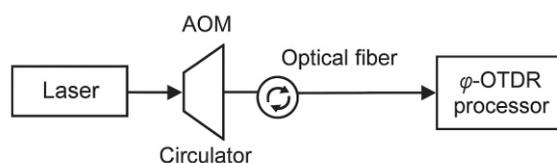


Рисунок 1.1 – Принцип действия ϕ -OTDR в DAS-системе

1.1.1 Пространственное разрешение DAS. Пространственное разрешение — один из важнейших параметров DAS-систем, определяющий минимальное расстояние между двумя событиями, различимыми системой как независимые. Этот параметр напрямую зависит от длительности лазерного импульса и вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta z = \frac{c \cdot \tau_{\text{имп}}}{2n} \quad (1.1)$$

Где:

Δz – пространственное разрешение, м;

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме;

$\tau_{\text{имп}}$ – длительность импульса, с;

$n \approx 1.46$ – показатель преломления волокна.

Как видно из формулы (1.1), уменьшение длительности импульса приводит к увеличению разрешения. Например, при $\tau_{\text{имп}} = 100$ нс пространственное разрешение составляет около 10 м. Соотношение между длительностью импульса и разрешением представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Пространственное разрешение в зависимости от длительности импульса

Длительность импульса, нс	Пространственное разрешение, м
10	1,0
100	10,0
1000	100,0

1.1.2 Архитектура DAS-системы. Типовая архитектура DAS-системы состоит из нескольких функциональных блоков, каждый из которых играет

важную роль в обеспечении надёжной и точной регистрации акустических событий:

- источник когерентного лазерного излучения;
- оптоволоконная линия;
- интеррогатор;
- цифровой блок обработки;
- пользовательский интерфейс.

На рисунке 1.2 представлена обобщённая схема архитектуры DAS-системы, демонстрирующая взаимодействие её основных компонентов.

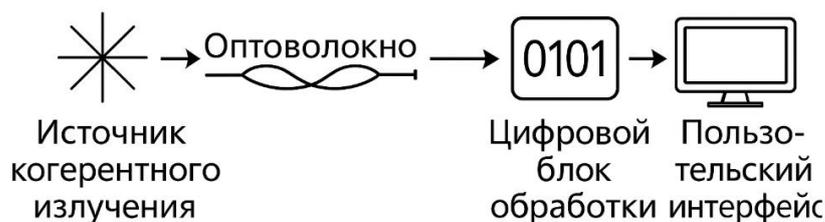


Рисунок 1.2 – Структура распределённого акустического зондирования DAS

1.1.3 Сравнение с другими оптоволоконными сенсорами. В отличие от DTS (Distributed Temperature Sensing) и DSS (Distributed Strain Sensing), которые используют рамановское и бриллюэновское рассеяние соответственно, DAS фиксирует высокочастотные вибрационные и акустические сигналы. В таблице 1.2 представлено сравнение этих систем по ключевым параметрам.

Таблица 1.2 – Сравнение DAS, DTS и DSS

Параметр	DAS	DTS	DSS
Тип рассеяния	Рэлеевское	Рамановское	Бриллюэновское
Измеряемый параметр	Вибрации, акустика	Температура	Температура, деформация
Частотный диапазон	до десятков кГц	<1 Гц	до 100 Гц
Пространственное разрешение	1–10 м	0,5–3 м	1–5 м
Волокно	SMF	SMF/MMF	SMF
Области применения	Геофизика, охрана, ГРП	Энергетика, скважины	Строительство, мосты

Технология распределённого акустического зондирования DAS представляет собой эффективный и гибкий инструмент для пространственно-временного мониторинга протяжённых объектов. Принцип действия на основе ф-OTDR, модульная архитектура и высокая чувствительность делают эти системы универсальными в применении. По сравнению с DTS и DSS, DAS обеспечивает более высокую частотную чувствительность и возможность

точной локализации динамических событий в реальном времени. Это объясняет активное внедрение DAS в ключевые отрасли инфраструктуры, энергетики и безопасности [1], [2], [3].

1.2 Классификация и виды распределённых акустических систем DAS

Современные распределённые акустические системы (DAS) представлены широким спектром технических решений, отличающихся по физическому принципу работы, типу архитектуры, используемому волокну и сфере применения. Такая диверсификация обусловлена необходимостью адаптации технологии под конкретные условия эксплуатации, включая требования к чувствительности, разрешению, частотному диапазону и устойчивости к внешним воздействиям.

Классификация DAS позволяет структурировать существующие подходы и облегчить выбор оптимального решения для задач геофизического мониторинга, охраны периметров, нефтегазовой разведки или контроля инфраструктуры.

По типу оптического рассеяния

В зависимости от физического механизма, лежащего в основе регистрации сигнала, DAS-системы делятся на следующие категории:

- на основе Рэлеевского рассеяния – классические ϕ -OTDR-системы, фиксирующие фазовые сдвиги обратного рассеянного сигнала. Обладают высокой чувствительностью к вибрациям и широким частотным диапазоном (до десятков кГц). Являются наиболее распространённым типом DAS [2].

- на основе Бриллюэновского рассеяния – применяются в системах BOTDA/BOTDR и позволяют измерять деформацию и температуру по частотному сдвигу рассеянного сигнала. Используются в гибридных DAS–DSS-системах [6].

- на основе Рамановского рассеяния – характерны для систем DTS и чувствительны исключительно к температурным изменениям. В DAS практически не используются, но могут входить в состав комбинированных сенсорных комплексов [1]. Сравнение этих подходов представлено в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Классификация DAS по типу рассеяния

Тип рассеяния	Технология	Измеряемый параметр	Чувствительность к вибрациям
Рэлеевское	ϕ -OTDR	Вибрации, акустика	Высокая
Бриллюэновское	BOTDA, BOTDR	Температура, деформация	Средняя
Рамановское	DTS	Температура	Отсутствует

Как видно из таблицы 1.3, ϕ -OTDR-технологии обладают наилучшей способностью к регистрации динамических событий и поэтому доминируют на рынке DAS-решений.

По архитектуре регистрации сигнала

От архитектурных особенностей системы DAS зависят её чувствительность, диапазон действия и помехоустойчивость. Наиболее распространённые архитектуры включают:

- импульсные ϕ -OTDR-системы — работают на основе анализа обратного рассеяния от узкополосных лазерных импульсов. Отличаются простотой реализации и высокой стабильностью.

- когерентные гетеродинные системы — используют оптическое смешение сигнала с опорным лучом, что позволяет извлекать как амплитудную, так и фазовую информацию. Обеспечивают более высокую чувствительность и динамический диапазон [3].

- многомодовые волокна (MMF-DAS) — реализуются с применением пространственного усреднения (mode averaging), что снижает влияние затуханий и фазовых сдвигов. Такие системы позволяют удешевить инфраструктуру [7].

- многожильные волокна (MCF-DAS) — обеспечивают возможность мультиканального зондирования, повышая надёжность и расширяя чувствительную зону [10].

Структурные различия архитектур наглядно представлены на рисунке 1.3.

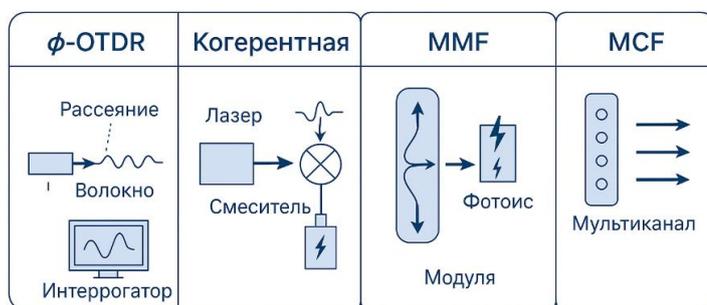


Рисунок 1.3 – Варианты архитектур DAS: ϕ -OTDR, когерентная регистрация, MMF и MCF-системы

1.2.1 По области применения. Сфера применения DAS оказывает значительное влияние на выбор архитектуры, алгоритмов обработки и требуемых характеристик. Ниже представлены основные направления, в которых DAS показала свою эффективность:

1. Безопасность и охрана периметра. DAS используется для обнаружения шагов, копания, ударов и других попыток вторжения. Применяется на объектах критической инфраструктуры, границах и в системах видеонаблюдения [6].

2. Нефтегазовая промышленность. Системы DAS применяются для мониторинга трубопроводов, анализа скважин, диагностики гидроразрыва пласта и вертикального сейсмического профилирования (VSP) [4].

3. Геофизика и сейсмология. DAS активно используется для регистрации локальных землетрясений, микросейсмических колебаний и оседания грунта. Возможно использование как в стационарных, так и в мобильных системах [9].

4. Городская инфраструктура и транспорт. DAS применяется для контроля трафика, диагностики рельсов, виброконтроля мостов и туннелей. В ряде случаев технология интегрируется с системами «умного города» [8].

Таблица 1.4 – Основные области применения DAS-систем

Область	Назначение	Примеры систем
Безопасность	Охрана периметров, защита объектов	OptaSense, Fotech
Нефтегаз	Скважины, утечки, контроль ГРП	Silixa iDAS
Геофизика	Микросейсмика, виброконтроль	DAS в Арктике (SOP)
Инфраструктура	Транспорт, дороги, Железная сеть	DAS-Vehicle

1.2.2 По типу оптоволоконной среды. Выбор волоконной линии существенно влияет на параметры DAS-системы:

- одномодовое волокно (SMF) — обеспечивает наилучшее фазовое разрешение и минимальные потери. Является отраслевым стандартом [2];

- многомодовое волокно (MMF) — используется для удешевления, требует алгоритмов пространственного усреднения [7];

- многожильное волокно (MCF) — позволяет реализовать мультиканальные архитектуры с повышенной устойчивостью [10];

- телекоммуникационные линии (existing fiber) — при наличии свободного окна DAS может быть встроена в действующую инфраструктуру [8].

1.2.3 Гибридные системы DAS. Современные системы всё чаще реализуются как гибридные, совмещая DAS с другими сенсорными методами:

- DAS + DTS — для совместного контроля вибраций и температуры (например, в трубопроводах) [6];

- DAS + VMD + TIE — используется для повышения точности фазового развёртывания и устранения температурных искажений [4];

- DAS + машинное обучение — применяется для распознавания событий и денойзинга (см. раздел 2.5) [1], [9].

Классификация DAS по принципу действия, архитектуре, типу волокна и области применения позволяет обоснованно подбирать систему под конкретные инженерные задачи. Преобладание ϕ -OTDR в сочетании с когерентной регистрацией и цифровыми алгоритмами делает DAS-системы эффективными, надёжными и масштабируемыми. Понимание видов DAS служит основой для анализа методов обработки сигналов, которые будут рассмотрены в следующей главе.

1.3 Архитектура и компоненты распределённых акустических систем DAS

Эффективность и чувствительность распределённых акустических систем (DAS) во многом определяются их архитектурной реализацией и качеством используемых компонентов. Несмотря на разнообразие технических решений, большинство промышленных и лабораторных DAS-систем имеют общую модульную структуру, обеспечивающую функциональность от генерации лазерного импульса до визуализации результата.

В данном разделе рассматривается типовая архитектура DAS, включающая оптические, электронные и программные блоки. Также анализируются различные типы волокон, подходы к регистрации сигнала и методы цифровой обработки, применяемые в современных системах.

1.3.1 Общая структура DAS-системы. Типичная DAS-система состоит из следующих ключевых компонентов:

1. Когерентный лазерный источник – генерирует оптический импульс высокой стабильности и узкой спектральной ширины (до 1 кГц). Используемая длина волны, как правило, составляет 1550 нм, что соответствует минимальным потерям в стандартных телекоммуникационных волокнах.

2. Оптоволоконная линия – выполняет двойную функцию: служит как среда распространения сигнала и как сенсорная среда, чувствительная к внешним механическим возмущениям.

3. Интеррогатор – устройство, обеспечивающее приём обратного рассеянного сигнала, преобразование его в электрический сигнал и оцифровку. В современных системах часто используется когерентный приём с гетеродинным смесителем.

4. Блок цифровой обработки сигналов – реализует алгоритмы фильтрации, фазового развёртывания, спектрального анализа, машинного обучения и визуализации результатов.

5. Интерфейс пользователя – включает программную оболочку, позволяющую отображать данные в виде амплитудных и фазовых карт, настраивать параметры регистрации и интегрировать систему в инфраструктуру мониторинга.

Общая схема DAS-системы приведена на рисунке 1.4

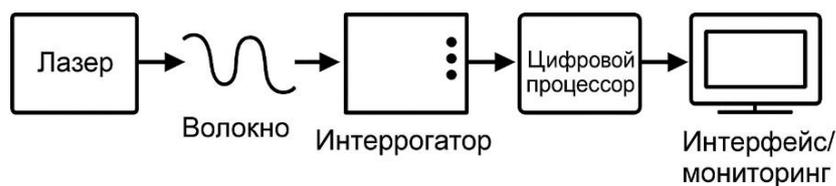


Рисунок 1.4 – Типовая архитектура DAS-системы

Лазерный источник: 1.3.2. Лазер является критически важным элементом DAS, так как именно от его параметров зависит фазовая стабильность всей системы. Основные требования:

- узкая ширина спектра: ≤ 1 кГц для повышения фазовой чувствительности;
- высокая когерентность: длина когерентности > 100 м;
- длина волны: 1550 нм (наиболее эффективная для SMF);
- мощность: до 20 мВт в импульсном режиме.

Наиболее часто применяются лазеры с распределённой обратной связью (DFB), а также лазеры с внешней оптической стабилизацией [2].

1.3.3 Оптоволоконная линия. Волокно выполняет роль не просто линии передачи, а распределённого датчика. На практике используются следующие типы:

- SMF (single-mode fiber) – стандартное одномодовое волокно типа G.652, обеспечивает высокую фазовую чувствительность и применяется в большинстве ф-OTDR-систем [2].
- MMF (multi-mode fiber) – многомодовое волокно, дешевле, но требует дополнительных алгоритмов усреднения (mode averaging) [7].
- MCF (multi-core fiber) – многожильное волокно, позволяющее проводить параллельную регистрацию и расширять динамический диапазон [10].

Выбор волокна напрямую влияет на устойчивость регистрации, уровень затухания и дальность действия системы.

1.3.4 Интеррогатор. Интеррогатор включает фотоприёмник, аналого-цифровой преобразователь и цифровую логику управления. Существуют два основных подхода к регистрации сигнала:

- амплитудная регистрация – используется в простых системах, не чувствительна к фазовым изменениям;
- когерентная (гетеродинная) регистрация – позволяет извлекать фазовую информацию, увеличивает SNR, обеспечивает более точное развёртывание и стабильную работу на дальних трассах [3].

Пример работы интеррогатора с многоканальным входом показан в статье [10].

1.3.5 Цифровая обработка сигнала. После регистрации обратного сигнала производится его цифровая обработка. Наиболее распространённые этапы включают:

- фильтрацию – удаление высокочастотного или низкочастотного шума с использованием FIR/IIR фильтров;
- фазовое развёртывание – устранение фазовых скачков и восстановление непрерывной фазы с помощью алгоритмов TIE, unwrар и нейросетей [2], [3];
- разложение на моды (VMD) – разделение температурной и акустической информации для повышения точности анализа [4];
- машинное обучение – классификация событий с использованием моделей 2D-SenseNet, CNN, Random Forest и других (см. раздел 2.5) [1], [9].

Таблица 1.5 – Основные этапы цифровой обработки в DAS

Этап обработки	Цель	Методы
Фильтрация	Повышение SNR	FIR/IIR
Фазовое развёртывание	Устранение фазовых разрывов	TIE, unwrap, Transformer
Разложение сигналов	Разделение акустики и температуры	VMD
Машинное обучение	Распознавание и классификация	CNN, 2D-SenseNet, BiLSTM

1.3.6 Интерфейс пользователя. Современные интерфейсы визуализации в DAS-системах включают графическое отображение:

- фазовых карт (2D-распределения по времени и пространству);
- частотных спектров;
- событий (например, матрицы классификации, тревоги);
- статистики ошибок и уровня сигнала.

Такие интерфейсы реализуются в веб-клиентах, специализированных DAS-платформах (например, Silixa iDAS UI) или интегрируются в SCADA-системы предприятий [6].

Архитектура распределённой акустической системы DAS представляет собой последовательную цепочку компонентов, обеспечивающих регистрацию и обработку механических возмущений с высокой точностью и масштабируемостью. От качества реализации каждого модуля — от лазера до пользовательского интерфейса — зависит эффективность всей системы. Современные архитектуры всё чаще реализуются с использованием когерентной регистрации, интеллектуальной обработки (VMD, ML) и гибридных волокон, что расширяет сферу применения DAS в условиях реального времени и больших расстояний.

1.4 Примеры промышленных DAS-систем и их сравнительный анализ

За последние два десятилетия технологии распределённого акустического зондирования (DAS) вышли за пределы лабораторных условий и начали активно применяться в промышленных масштабах. Этому способствовало развитие когерентной оптики, систем цифровой обработки и мультисервисных платформ мониторинга. В результате на рынке появилось множество DAS-решений, реализованных как в виде коммерческих продуктов, так и в рамках академических или отраслевых пилотных проектов.

Цель данного раздела — представить обзор и сравнение наиболее известных промышленных DAS-систем, их технические характеристики, архитектурные особенности и сферы применения.

Silixa iDAS

Компания Silixa (Великобритания) разработала одну из наиболее признанных в индустрии систем — iDAS (*intelligent Distributed Acoustic Sensing*). Она реализована на базе ϕ -OTDR с когерентной регистрацией и обеспечивает высокую чувствительность к вибрациям.

Особенности:

- поддержка одномодового волокна до 50 км без усиления;
- пространственное разрешение — до 1 м;
- частотный диапазон — 1 Гц...10 кГц;
- применение: нефтегазовая отрасль, скважинная сейсмика, мониторинг трубопроводов.

iDAS используется в реальных промышленных условиях, включая добычу нефти, ГПП (гидроразрыв пласта), контроль утечек и виброконтроль в скважинах [2].

OptaSense

Компания OptaSense (США/Великобритания) позиционирует свои DAS-решения как универсальные платформы безопасности. Их системы обеспечивают интеграцию с охранными платформами (VMS, SCADA) и используют гетеродинную когерентную регистрацию сигнала.

Характеристики:

- дальность — до 40 км;
- пространственное разрешение — 5 м;
- области применения: охрана периметра, трубопроводы, железные дороги, границы.

Системы OptaSense активно используются в оборонных проектах и в нефтегазе [6].

Fotech Helios

Система Fotech Helios, принадлежащая группе ВР, ориентирована на инфраструктурный мониторинг. Её архитектура позволяет использовать существующие волоконно-оптические линии связи, что снижает затраты на внедрение.

Преимущества:

- частотный диапазон — до 5 кГц;
- работа в режиме "co-existence" (совместное использование с телеком-сигналом);
- применение: городской транспорт, трубопроводы, энергетика.

Особенностью Helios является высокая гибкость в интеграции с существующими коммуникационными системами [8].

DAS по подводному кабелю в Арктике (SOP Monitoring)

В 2022 году в рамках проекта Arctic DAS была реализована система мониторинга с использованием изменений состояния поляризации (SOP) на подводном волоконно-оптическом кабеле длиной более 250 км. Это пассивная система, не требующая отдельного лазера или импульсной генерации.

Инновации:

- работа на базе существующего телеком-кабеля;
- регистрация микросейсмических событий и подлёдных колебаний;
- уникальное расстояние действия без активной подсветки — до 250 км

[9].

MCF DAS с многоканальной обработкой (MIMO)

В 2024 году был опубликован результат полевого испытания многожильной DAS-системы (на базе *Multi-Core Fiber*) с применением многоканальной обработки MIMO.

Преимущества:

- одновременное использование до 7 каналов регистрации;
- устойчивость к затуханиям и фазовым сдвигам;
- пространственное разрешение — до 3 м;
- применение: мегаполисы, интеллектуальные транспортные системы

[10].

Такая архитектура позволяет значительно увеличить чувствительную зону и надёжность системы за счёт параллельной регистрации.

Сравнение систем

Для систематизации информации в таблице 1.6 представлены основные технические параметры и особенности промышленных DAS-решений.

Таблица 1.6 – Сравнение промышленных DAS-систем

Система	Дальность, км	Разрешение, м	Частотный диапазон	Особенности
Silixa iDAS	50	1	1–10000 Гц	Высокая чувствительность, VSP
OptaSense	40	5	до 5000 Гц	Инфраструктура, периметральная охрана
Fotech Helios	30–50	5	до 5000 Гц	Совместимость с телеком-линиями
Arctic SOP DAS	250 (пассивно)	10–20	0.1–50 Гц	Без лазера, на основе поляризации
MCF + MIMO DAS	60–70	3–10	до 8000 Гц	Многоканальность, высокая помехоустойчивость

Географические и прикладные различия в реализации DAS-проектов наглядно отражены на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Примеры применения DAS-систем в разных отраслях и регионах

Современные промышленные реализации DAS демонстрируют разнообразие архитектур, подходов и областей применения. Высокоточные системы (например, Silixa iDAS) используются в нефтегазе и геофизике, тогда как Fotech и OrtaSense предлагают решения для инфраструктуры и безопасности. Использование многожильных волокон (MCF) и пассивных кабелей (SOP DAS) расширяет границы применения технологии и делает возможным её внедрение без существенных изменений инфраструктуры. Приведённые примеры демонстрируют, как архитектура системы и алгоритмы обработки определяют технические возможности DAS.

2. Методы обработки сигналов в DAS

2.1 Типы сигналов в DAS и задачи цифровой обработки

Цифровая обработка сигналов в DAS (Distributed Acoustic Sensing) является необходимым этапом интерпретации данных, регистрируемых системой в процессе мониторинга. В отличие от классических точечных сенсоров, DAS генерирует большой объём пространственно-временной информации, поступающей от сотен и тысяч виртуальных сенсорных точек вдоль оптоволоконной линии. Эта информация, как правило, содержит не только полезные сигналы, но и различные искажения, шумы, артефакты, вызванные как внешними, так и внутренними факторами.

Для эффективного анализа данных DAS требуется чёткое понимание характеристик регистрируемых сигналов, а также методов их предварительной обработки, очистки и структурирования. В данном разделе приведены основные типы сигналов, характерные для DAS, и поставлены задачи, решаемые методами цифровой обработки.

2.1.1 Классификация сигналов в DAS. Сигналы, регистрируемые распределённой системой DAS, можно условно разделить на три основных типа:

– синусоидальные сигналы;

Возникают при воздействии стабильных источников вибраций, например от работающего генератора, вентилятора или другого промышленного оборудования. Обладают устойчивой частотой, малой амплитудной вариацией и выраженной гармонической структурой

– импульсные сигналы;

– обусловлены короткими механическими воздействиями — шагами, ударами, виброимпульсами. Характеризуются широкой полосой частот, высокой временной локализованностью и сложной формой.

– шумовые сигналы;

Включают в себя как высокочастотные помехи, так и медленно меняющиеся дрейфы (например, температурные). Источниками могут быть внешние факторы (ветер, машины) и внутренняя нестабильность оборудования (лазер, интеррогатор, рефлекс от коннекторов). В таблице 2.1 представлены основные типы сигналов DAS.

Таблица 2.1 – Основные типы сигналов в DAS

Тип сигнала	Источник	Частотные характеристики	Особенности обработки
Синусоидальный	Вращающееся оборудование	Узкополосный спектр	Спектральный анализ, фильтрация
Импульсный	Шаги, удары, падения	Широкополосный, нерегулярный	Фильтрация, разложение (VMD)

Шумовой	Температура, вибрации фона	Шумоподобный спектр	Подавление, сегментация
---------	----------------------------	---------------------	-------------------------

2.1.2 Математическая модель сигнала. Запись фазового сигнала в DAS осуществляется по принципу регистрации смещения фазовой составляющей рассеянного света. Фазовое изменение при деформации участка волокна можно описать следующим образом:

$$\phi(t) = \frac{4\pi n \cdot \Delta L(t)}{\lambda} \quad (2.1)$$

Где:

$\phi(t)$ – фазовый сдвиг

$\Delta L(t)$ – изменение длины участка волокна

n – показатель преломления (~ 1.46)

λ – длина волны лазера (~ 1550 нм).

Даже микроскопические деформации порядка нескольких нанометров могут вызвать фазовый сдвиг, эквивалентный нескольким радианам, что требует применения фазового развёртывания (см. раздел 2.3).

2.1.3 Проблемы сигналов в DAS. Несмотря на высокую чувствительность DAS, данные, регистрируемые системой, часто содержат искажения:

– температурный дрейф — медленно изменяющийся компонент, влияющий на фазу;

– фоновый шум — случайные вибрации, не несущие диагностической информации;

– фазовые скачки и развороты — появляются при превышении фазы порога $\pi/4$;

– межканальные артефакты — ошибки при мультисканальном приёме.

Это делает необходимым применение методов цифровой обработки, позволяющих выделить полезный сигнал, восстановить фазу и минимизировать помехи [2], [4], [6].

2.1.4 Цели цифровой обработки. Обработка сигналов DAS направлена на решение следующих задач:

1. Фильтрация и подавление шума. Применение цифровых фильтров (FIR, IIR), а также пространственно-временной фильтрации для повышения SNR (см. раздел 2.2).

2. Восстановление фазовой информации. Устранение фазовых скачков методом фазового развёртывания (TIE, unwarp) (см. раздел 2.3).

3. Разделение компонентов сигнала. Выделение температурной и акустической составляющей с помощью разложения (например, VMD) (см. раздел 2.4).

4. Анализ и классификация событий. Применение машинного обучения (CNN, Random Forest, 2D-SenseNet) для идентификации типа событий (см. раздел 2.5).

В таблице 2.2 представлена связь между типами сигналов и методами обработки.

Таблица 2.2 – Применимость методов обработки к типам сигналов

Тип сигнала	Фильтрация	Развёртывание	Разложение (VMD)	ML-классификация
Синусоидальный	Да	Возможно	Иногда	Да
Импульсный	Да	Часто	Да	Да
Шумовой	Да	Нет	Да	Нет

Как видно из таблицы 2.2, для каждого типа сигнала подходят разные методы обработки, и ни один из них не является универсальным. Это подчёркивает необходимость комплексного подхода к построению цепочки обработки данных.

Сигналы, регистрируемые в DAS-системах, разнообразны по структуре, происхождению и спектру. Их корректная интерпретация невозможна без предварительной цифровой обработки, включающей фильтрацию, фазовое развёртывание, модовое разложение и классификацию. Эти методы позволяют извлекать скрытую структуру сигнала, восстанавливать фазу, повышать отношение сигнал/шум и обеспечивать автоматический анализ. В последующих разделах главы 2 будет представлено подробное описание каждого метода с примерами применения и сравнением эффективности.

2.2 Фильтрация сигналов в DAS

Фильтрация сигналов является базовым и необходимым этапом предварительной обработки данных в DAS-системах. Она используется для подавления шумов, сглаживания артефактов, устранения фоновых дрейфов и улучшения качества последующих методов анализа. При этом выбор типа фильтра напрямую влияет на фазовую и частотную структуру сигнала, что особенно критично для дальнейших этапов обработки, таких как фазовое развёртывание, разложение на моды и машинное обучение.

2.2.1 Цели фильтрации в DAS. Основные задачи фильтрации в распределённых акустических системах включают:

- повышение отношения сигнал/шум (SNR);
- подавление температурного фона и вибрационных артефактов;
- сглаживание высокочастотных дрожаний фазы, вызванных нестабильностью источника;

- отделение информационного диапазона частот, характерного для событий (ударов, шагов, вибраций);
 - обеспечение стабильности для фазового развёртывания (см. раздел 2.3).
- Фильтрация может применяться как к амплитудному, так и к фазовому сигналу, в зависимости от архитектуры системы и алгоритма интеррогатора [2], [4].

2.2.2 Классификация фильтров. На практике в DAS применяются линейные цифровые фильтры, которые подразделяются на два основных класса:

1 FIR-фильтры (*Finite Impulse Response*)

- имеют конечную импульсную характеристику;
- обеспечивают гарантированную устойчивость системы;
- позволяют реализовать линейную фазу, что критично для сохранения фазовой структуры сигнала;
- хорошо подходят для прецизионных и стационарных задач.

Общее уравнение FIR-фильтра:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} b_k \cdot x[n - k] \quad (2.2)$$

Где

$y[n]$ – выходной сигнал

$x[n]$ – входной сигнал

b_k – коэффициенты фильтра

N – порядок фильтра

2 IIR-фильтры (*Infinite Impulse Response*)

- имеют рекурсивную структуру: выход зависит как от текущего входа, так и от предыдущих выходов;
- позволяют достичь высокой избирательности с меньшим числом коэффициентов;
- возможны фазовые искажения, особенно в диапазоне переходных процессов;
- требуют контроля устойчивости (особенно при высоких порядках).

Уравнение IIR-фильтра:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} b_k \cdot x[n - k] - \sum_{l=1}^N a_l \cdot y[n - l] \quad (2.3)$$

2.2.3 Применение фильтрации в DAS. На этапе предварительной обработки сигнала FIR-фильтры часто применяются для:

- удаления высокочастотного фоновых шума;
- сохранения линейной фазы при анализе ВЧ-сигналов, таких как удары или вибрации оборудования;
- подготовки данных для фазового развёртывания методом TIE [2].

IIR-фильтры, в свою очередь, используют при:

- оперативной фильтрации в системах с ограниченными вычислительными ресурсами;
- подавлении низкочастотных дрейфов, например температурных и псевдопериодических колебаний;
- реализации узкополосных фильтров, особенно в задачах выделения синусоидальных компонентов [6].

В таблице 2.3 представлен сравнительный анализ FIR и IIR.

Таблица 2.3 – Сравнение FIR и IIR фильтров в задачах DAS

Параметр	FIR-фильтр	IIR-фильтр
Импульсная характеристика	Конечная	Бесконечная
Устойчивость	Гарантированная	Требует анализа полюсов
Фазовая характеристика	Линейная (при симметрии)	Нелинейная
Расход ресурсов	Выше	Ниже
Применение в DAS	Геофизика, скважины, VSP	Инфраструктура, охрана, дрейфы

2.2.4 Выбор полосы пропускания фильтра. Выбор частотного диапазона, пропускаемого фильтром, зависит от предполагаемых событий:

- для шагов и ударов — 5...150 Гц;
- для транспорта — 30...500 Гц;
- для оборудования (вентиляторы, насосы) — 300...3000 Гц;
- для сейсмоданных (VSP, геофизика) — 0.1...100 Гц.

В реальных задачах применяется каскадная фильтрация, например: FIR-фильтр → VMD-разложение → фазовое развёртывание [4].

Пример применения

В работе [6] предложен подход, при котором перед фазовым развёртыванием сигнал предварительно обрабатывается полосовым FIR-фильтром (30–300 Гц). Это позволило существенно повысить SNR и сократить количество ошибок развёртывания фазы. В другом исследовании [4] фильтрация используется для подавления дрейфов перед применением VMD, что особенно эффективно при высокотемпературной деформации волокна. Фильтрация — обязательный и универсальный этап обработки сигналов в DAS. Выбор между FIR и IIR определяется характером сигнала, требованиями к фазовой точности и ресурсными ограничениями. В современных DAS-системах фильтрация редко используется изолированно, а чаще служит подготовительным этапом перед фазовым развёртыванием, модовым разложением или классификацией. В следующих разделах будут рассмотрены такие методы, как фазовое

развёртывание (раздел 2.3) и VMD (раздел 2.4), в которых фильтрация также играет вспомогательную роль.

2.3 Фазовое развёртывание в системах DAS

Одна из ключевых особенностей систем распределённого акустического зондирования (DAS) заключается в том, что измеряемым параметром является фаза рассеянного сигнала, зависящая от микродеформаций волоконно-оптической линии. Однако в процессе регистрации фазы возникает проблема так называемой фазовой неоднозначности — фазовые значения обрезаются по модулю 2π , в результате чего сигналы, превышающие границу π , «сворачиваются», искажаются или «перепрыгивают» через разрыв. Это явление особенно часто встречается при резких импульсных воздействиях, высокочастотных колебаниях или при температурных дрейфах.

Процесс восстановления истинной (неограниченной) фазы на основе измеренной «свёрнутой» — называется фазовым развёртыванием (*phase unwrapping*). Без применения данного этапа последующая интерпретация сигнала DAS невозможна.

2.3.1 Суть проблемы фазовой неоднозначности. Регистрируемый фазовый сигнал в DAS ограничен диапазоном $-\pi$ до π , и любые превышения интерпретируются как «скачки». Это хорошо видно на рисунке 2.1, где исходный непрерывный фазовый сигнал (синяя линия) после регистрации преобразуется в обрезанную (красная линия) с резкими скачками.

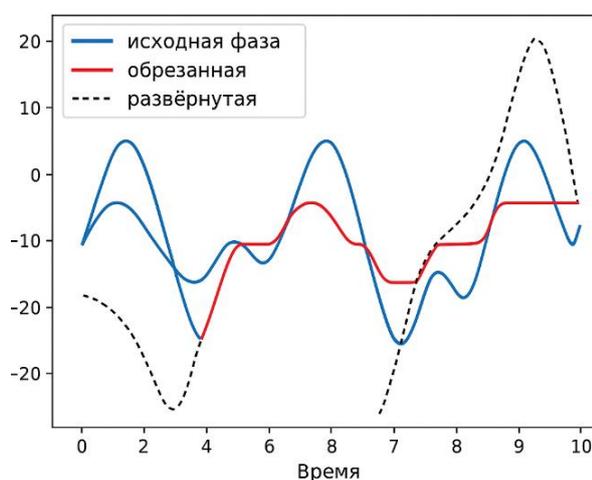


Рисунок 2.1 – Пример фазового сигнала до и после развёртывания

Если такие скачки не устранить, система интерпретирует резкие импульсы или шум как серию ложных событий. Это может привести к искажению картины событий, особенно при сейсмических измерениях и при регистрации импульсов малой длительности.

2.3.2 Математическая формализация. Регистрируемая фаза может быть представлена как:

$$\varphi_{meas}(t) = \text{mod}(\varphi(t), 2\pi) \quad (2.4)$$

где:

$\varphi_{meas}(t)$ – измеренная (свернутая) фаза

$\varphi(t)$ – истинная (неограниченная) фаза

Цель развертывания – восстановить.

2.3.3 Методы фазового развёртывания. Существует несколько подходов к фазовому развёртыванию, применяемых в системах DAS. Ниже рассмотрены наиболее актуальные.

1. Классический unwrapping-алгоритм (одномерный).

Наиболее простой и широко используемый метод. Реализуется по формуле:

$$\varphi_{unwrapped}[n] = \varphi_{unwrapped}[n - 1] + \Delta\varphi[n] \quad (2.5)$$

Достоинства:

– простота реализации;

– высокая скорость;

Недостатки:

– чувствительность к шуму;

– неустойчив к фазовым скачкам, вызванным дрейфом.

2. Метод транспортировки интенсивности (ТИЕ).

Алгоритм ТИЕ (Transport of Intensity Equation) основан на уравнении переноса интенсивности и позволяет реконструировать фазу на основе пространственного и временного изменения амплитуды:

$$\frac{\partial I(z)}{\partial z} = -\frac{\lambda}{2\pi} \nabla \cdot [I(z) \nabla \varphi(z)] \quad (2.6)$$

Где:

$I(z)$ – интенсивность сигнала

λ – длина волны

$\varphi(z)$ – фаза

∇ – градиент по поперечному направлению

Достоинства:

– устойчив к шуму и скачкам;

– работает в 2D-пространстве;

– может применяться на фазовых картах (по DAS-матрице);

Пример применения ТИЕ в DAS представлен в работе [2], где он успешно применяется для восстановления фаз в задачах вертикального сейсмического профилирования (VSP).

3. Нейросетевые методы (CNN, Transformer).

Современные подходы предлагают использование сверточных нейронных сетей или трансформеров для развёртывания фаз, особенно в задачах с сильным шумом. Например, в работе [3] предложена архитектура на базе Vision

Transformer, позволяющая проводить фазовое развёртывание с высокой точностью на фоне искажений.

Достоинства:

- высокая точность;
- низкая чувствительность к шуму;

Недостатки:

- требуется обучение на синтетических или размеченных данных;
- вычислительно затратны.

2.3.4 Примеры и эффективность:

– в [2] показано, что использование TIE-алгоритма позволило устранить до 98% ложных фазовых скачков при регистрации коротких вибрационных событий;

– в [3] нейросетевой метод показал точность развёртывания > 95% на шумных фазовых картах;

– классический `unwrap` остаётся популярным благодаря простоте, но его точность при высоком шуме не превышает 60–70%.

2.3.5 Влияние развёртывания на итоговую обработку. Плохое качество фазового развёртывания негативно влияет на:

- точность VMD-разложения (раздел 2.4);
- достоверность классификации сигналов (раздел 2.5);
- интерпретацию сейсмических волн в задачах VSP и мониторинга скважин.

Таким образом, корректное восстановление фазы — критически важный шаг в цепочке DAS-анализа. Фазовое развёртывание — обязательный этап обработки сигналов DAS, обеспечивающий восстановление истинной формы фазовых изменений вдоль волоконной линии. Выбор метода зависит от задачи, уровня шума, доступных ресурсов и требований к точности. TIE является универсальным и устойчивым методом, рекомендованным для фазовых карт и многомерных сигналов. Нейросетевые подходы дают лучшие результаты, но требуют дополнительных данных и вычислений. В дальнейшем, для оценки эффективности фазового развёртывания, в экспериментальной части будет проведено сравнение развёрнутых и неразвёрнутых сигналов по метрикам RMSE и SNR.

2.4 Разложение сигналов в DAS (метод VMD)

Одной из важных задач обработки сигналов в системах распределённого акустического зондирования (DAS) является разделение сигнала на физически осмысленные компоненты, такие как акустическая составляющая, температурный дрейф, фоновые шумы и помехи. Такой подход позволяет не только повысить точность интерпретации событий, но и улучшить работу последующих этапов анализа, включая фазовое развёртывание и машинное обучение.

Одним из наиболее эффективных современных методов для этих целей является Variational Mode Decomposition (VMD) — вариационное разложение сигнала на моды.

2.4.1 Цель и суть разложения. Сигнал, регистрируемый в DAS, как правило, является суммой нескольких физических процессов. Например:

- акустический сигнал (удар, шаг, вибрация);
- температурный дрейф или низкочастотные искажения;
- случайный или структурный шум;
- электронные артефакты от интеррогатора или лазера.

Чтобы проанализировать каждую компоненту по отдельности, сигнал можно разложить на частотные моды — составляющие с определённым спектральным центром и узким диапазоном.

Общая идея VMD

Метод VMD был впервые предложен Dragomiretskiy и Zosso (2014) как способ адаптивного разложения сигнала без наложения мод (в отличие от EMD). В основе VMD лежит минимизация суммы частотных полос ширины мод при фиксированных центральных частотах, представленных в форме вариационной задачи.

Цель: разложить сигнал $f(t)$ на K мод $u_k(t)$, каждая из которых имеет узкий спектр, сосредоточенный вокруг центральной частоты ω_k

Математическая формализация

В VMD решается следующая оптимизационная задача:

$$\min_{\{u_k\}\{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \cdot e^{-j\omega_k t} \right] \right\|_2^2 \right\} \quad (2.7)$$

при условии:

$$\sum_{k=1}^K u_k(t) = f(t) \quad (2.8)$$

Где:

$u_k(t)$ — k -ая мода

ω_k — центральная частота

* — свертка

$\delta(t)$ — дельта функция Дирака

VMD использует перемножение на комплексную экспоненту (демодуляцию) и вычисление градиента полосы частот, чтобы изолировать моды.

В таблице 2.4 представлены преимущества VMD по сравнению с EMD и SSA.

Таблица 2.4 – Сравнение методов разложения сигналов

Метод	Преимущества	Недостатки
-------	--------------	------------

EMD	Прост в реализации, без параметров	Моды могут пересекаться, чувствителен к шуму
SSA	Основан на автокорреляции	Требует выбора окна, слаб в разделении спектров
VMD	Устойчив, не допускает наложения	Требует указания числа мод ККК, итеративный

VMD обеспечивает хорошее разделение акустической и температурной составляющей, что особенно полезно в DAS, где дрейф температуры может маскировать короткие импульсные события.

Применение VMD в DAS

В работе [6] метод VMD был применён для анализа сигнала, полученного от волоконно-оптического интеррогатора, размещённого на горячей нефтяной скважине. После применения VMD:

- низкочастотная мода (<math><10<10<10</math> Гц) была интерпретирована как температурный дрейф;
- среднечастотные моды (20–500 Гц) — как акустические волны;
- высокочастотная мода — как электрические шумы интеррогатора.

После удаления низкочастотной компоненты отношение сигнал/шум улучшилось более чем на +20 дБ, а визуальная интерпретация фазовых карт значительно упростилась. Результаты показаны на рисунке 2.2.

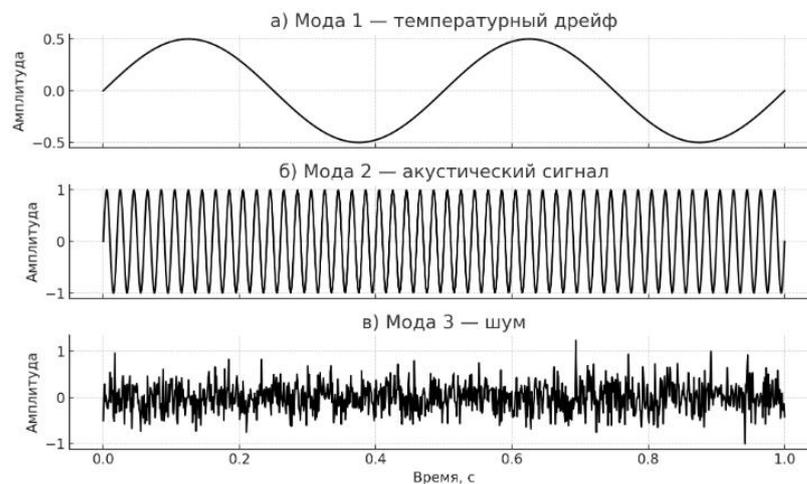


Рисунок 2.2 – Пример разложения сигнала DAS на моды методом VMD)

Хотя VMD показывает хорошие результаты, метод имеет ряд ограничений:

- требуется предварительно задать количество мод K , что не всегда очевидно;
- является итеративным, требует значительных вычислительных ресурсов;
- при неправильно выбранных параметрах может переразложить или недоразложить сигнал.

Поэтому в практике часто применяется предобработка FIR-фильтрацией, а также сравнение результатов с другими методами (например, TQWT, EMD, SSA). Метод VMD представляет собой мощный инструмент для разложения сигналов DAS на осмысленные компоненты. Он позволяет эффективно отделять температурный дрейф от акустического сигнала, снижать шум и повышать точность последующих этапов анализа. Несмотря на необходимость подбора параметров и сравнительно высокую вычислительную сложность, VMD является предпочтительным методом в задачах, требующих высокой чувствительности к деталям сигнала. В экспериментальной части будет рассмотрено применение VMD к синтетическим и шумовым данным с целью оценки его эффективности по метрикам SNR и визуальной интерпретируемости.

2.5 Применение методов машинного обучения в DAS

Современные системы распределённого акустического зондирования (DAS) генерируют большой объём пространственно-временных данных, содержащих сложные сигналы с вариативной структурой, шумами и нестабильными характеристиками. Классические методы обработки (фильтрация, разложение, фазовое развёртывание) обеспечивают лишь предварительную очистку и структурирование сигнала. Для более глубокой интерпретации данных, в том числе — распознавания событий, классификации источников и автоматической локализации — эффективно применяются методы машинного обучения (ML).

Машинное обучение в DAS позволяет перейти от «ручной» обработки к интеллектуальным системам, способным обучаться на предыдущих данных и принимать решения в реальном времени.

2.5.1 Цели применения ML в DAS. Методы машинного обучения в DAS решают следующие задачи:

- автоматическая классификация событий (например, шаги, удары, транспорт, технические сбои);
- распознавание аномалий — обнаружение необычного поведения, которое может свидетельствовать о дефекте или нарушении;
- объединение функций денойзинга и демодуляции;
- понижение размерности и ускорение обработки больших массивов DAS-данных.

Такие подходы особенно актуальны в DAS-системах, работающих в городских условиях, на стратегических объектах, а также в гибридных DAS-DTS-системах [1], [4].

2.5.2 Классификация методов машинного обучения. В DAS применяются два класса ML-алгоритмов:

1. Классические модели (без обучения весов)
 - Random Forest, Decision Tree, KNN, SVM

– обладают объяснимостью, легко обучаются, но требуют ручной инженерии признаков.

2. Глубокие нейросети (DL)

– CNN, LSTM, 2D-SenseNet, BiLSTM, Transformer

– способны самостоятельно извлекать признаки, работать с фазовыми картами и шумными данными.

В таблице 2.5 представлено сравнение ML-подходов в DAS.

Таблица 2.5 – Сравнение ML-подходов в DAS

Метод	Обучение признаков	Работа с шумом	Пояснимость	Применение
Random Forest	Нет	Средняя	Высокая	Простой классификатор
CNN	Да	Высокая	Средняя	Анализ фазовых карт
BiLSTM	Да (последовательность)	Высокая	Низкая	События во времени
2D-SenseNet	Да (совм. с денойзингом)	Очень высокая	Низкая	Комплексный ML-модуль

2.5.3 Примеры архитектур. Random Forest и Decision Tree. Применялись, например, для классификации простых событий: шагов, транспорта, ударов. В [9] обучена модель Random Forest на сигналах DAS, собранных в городе. Классификация проводилась по набору извлечённых признаков: энергия, энтропия, частота, дисперсия.

Достоинства:

- быстро обучаются;
- объяснимые решения;
- работают с малым объёмом данных.

2.5.4 2D-SenseNet. Модель. 2D-SenseNet — это сверточная нейросеть, которая одновременно выполняет денойзинг и демодуляцию фазового сигнала. В отличие от классических подходов, она не требует предварительной фильтрации или фазового развёртывания. Архитектура включает энкодер, декодер и блок реконструкции сигнала. Представлена в [1]. Достигает улучшения SNR до 15 дБ и восстанавливает структуру сигналов даже при сильных искажениях.

2.5.5 BiLSTM и FPN-BiLSTM. В [4] для мониторинга тоннелей используется архитектура BiLSTM, способная учитывать временную структуру событий. При этом использована схема Feature Pyramid Network (FPN), позволяющая захватывать сигналы разных частотных уровней.

Модель успешно классифицировала:

- транспортные средства,
- копание и пешеходное движение.

2.5.6 Обучение моделей DAS. Для обучения моделей используются как реальные размеченные сигналы, так и синтетические данные, сгенерированные в лабораторных условиях. В качестве признаков могут использоваться:

- спектры (FFT),
- фазовые карты,
- обёртки сигнала,
- вейвлет-преобразования.

Обучение проводится офлайн, а встраивание — в цифровой модуль DAS или облачную систему мониторинга.

2.5.7 Преимущества и ограничения. Преимущества ML в DAS:

- возможность адаптации к конкретным объектам и условиям;
- автоматизация обработки больших массивов;
- совмещение денойзинга, классификации и анализа в одной архитектуре.

Ограничения:

- требуется обучающая выборка (не всегда доступна);
- высокая вычислительная сложность (GPU/облачные серверы);
- возможны ошибки классификации при недостаточном обучении.

Методы машинного обучения становятся важной частью обработки сигналов в DAS, позволяя расширить функциональность системы, повысить точность распознавания событий и снизить влияние шума. Наиболее перспективными направлениями являются сверточные нейросети (CNN, 2D-SenseNet) и рекуррентные модели (BiLSTM), работающие с фазовыми картами и временными рядами. Их применение особенно эффективно в DAS-системах для охраны, транспорта и городской инфраструктуры. В главе 3 будут рассмотрены примеры использования таких моделей на синтетических данных с последующей оценкой точности классификации.

2.6 Сравнительный вывод по методам обработки сигналов в DAS

Во второй главе были рассмотрены четыре ключевых метода цифровой обработки сигналов, применяемых в системах распределённого акустического зондирования (DAS). Каждый из них выполняет определённую функцию: от предварительной очистки до интеллектуального анализа и классификации. Ниже представлены основные отличия, преимущества и ограничения каждого подхода, а также рекомендации по их совместному применению в рамках комплексной системы обработки.

2.6.1 Обобщение по каждому методу. Фильтрация (FIR/IIR):

- является обязательным базовым шагом в любой DAS-системе;
- позволяет повысить отношение сигнал/шум, удалить дрейфы и стабилизировать сигнал;
- FIR-фильтры предпочтительны при необходимости сохранить линейную фазу, IIR — при ограниченных ресурсах;

– применяется до фазового развёртывания и/или разложения сигнала [2], [4].

Фазовое развёртывание (TIE, unwrap, Transformer):

– восстанавливает непрерывную фазу из обрезанной;
– метод TIE обеспечивает устойчивость к шуму и применяется для фазовых карт;

– нейросетевые методы показывают наивысшую точность, но требуют обучения;

– классический unwrap подходит для слабозумных сигналов [2], [3].

Разложение сигналов (VMD):

– позволяет отделить физические компоненты сигнала: дрейф, акустику, шум;

– метод стабилен, не требует обучения, но чувствителен к числу мод;

– эффективен в нефтегазе, геофизике, при анализе VSP [6].

Машинное обучение (ML):

– обеспечивает автоматическое распознавание событий и выделение сигнала;

– Deep Learning (2D-SenseNet, BiLSTM) даёт наилучший результат при наличии данных;

– Random Forest и SVM — хороши в условиях ограниченной выборки;

– применяется после фильтрации и/или разложения, либо напрямую к фазовым картам [1], [4], [9].

В таблице 2.6 представлен сравнительный анализ методов обработки сигналов в DAS

Таблица 2.6 – Сравнительный анализ методов обработки сигналов в DAS

Метод	Назначение	Преимущества	Недостатки	Где применим
Фильтрация	Подавление шумов	Простота, стабильность	Ограниченные возможности анализа	Все системы
Фазовое развёртывание	Восстановление фазы	Точность (TIE, NN), фундаментальность	Ограниченные возможности анализа	Геофизика, скважины
Разложение (VMD)	Разделение компонентов	Хорошая устойчивость, понятные моды	Нужно выбирать число мод, итерации	Нефтегаз, вибрация

Машинное обучение	Классификация событий	Автоматизация, высокая точность	Требует обучающей выборки	Охрана, транспорт, инфраструктура
-------------------	-----------------------	---------------------------------	---------------------------	-----------------------------------

2.6.2 Рекомендации по выбору и комбинированию. В реальных системах DAS редко применяется один метод в изоляции. Наилучшие результаты достигаются при комбинировании подходов:

Фильтрация → фазовое развёртывание → VMD → машинное обучение

Такой каскад позволяет поэтапно:

1. Очистить сигнал,
2. Восстановить фазу,
3. Отделить полезную информацию,
4. Провести интеллектуальную интерпретацию.

2.6.3 Переход к экспериментальной части. В третьей главе дипломной работы будет проведён эксперимент по моделированию сигналов, реализованы указанные методы в среде Python, а также проведено сравнение их эффективности по количественным метрикам:

- RMSE (среднеквадратичная ошибка),
- SNR (отношение сигнал/шум),
- матрица ошибок (для ML-классификаторов),
- визуальное сравнение фазовых карт и спектров.

На основе полученных результатов будет сделан вывод о наиболее эффективной схеме обработки для различных типов сигналов DAS.

3 Экспериментальное моделирование и сравнение методов обработки

3.1 Методика моделирования сигналов и построения эксперимента

С целью оценки эффективности различных методов обработки сигналов, рассмотренных во второй главе, в настоящем исследовании проведено экспериментальное моделирование распределённой акустической системы DAS в упрощённой одноканальной постановке. Основной задачей является имитация типовых сигналов, регистрируемых DAS-системами, и поэтапная реализация алгоритмов обработки: фильтрации, фазового развёртывания, модового разложения (VMD) и машинного обучения.

Эксперимент разработан в программной среде Python с применением библиотеки NumPy, SciPy, PyVMD, scikit-learn и средств визуализации (Matplotlib). Все этапы моделирования, обработки и оценки результатов реализуются с фиксированными параметрами, что обеспечивает воспроизводимость эксперимента.

Цель эксперимента:

- смоделировать три типа сигналов, характерных для систем DAS: синусоидальный, импульсный и шумовой;
- применить поочерёдно четыре метода обработки: FIR/IIR-фильтрацию, фазовое развёртывание (TIE/unwarp), разложение методом VMD и машинное обучение (Random Forest);
- оценить эффективность каждого метода и их комбинаций по метрикам качества: SNR, RMSE, точность классификации;
- сформировать рекомендации по выбору методов в зависимости от типа сигнала и условий шума.

Параметры моделирования

Для эксперимента моделируются 1-секундные сигналы с фиксированной частотой дискретизации. Это соответствует общепринятым условиям лабораторного анализа сигнала на одном виртуальном канале DAS.

Таблица 3.1 – Параметры моделирования сигналов

Параметр	Значение
Частота дискретизации f_s	1000 Гц
Длительность сигнала T	1 секунда
Количество отсчётов	1000
Типы сигналов	Синус, импульс, шум
Пропорция шума (по умолчанию)	20–40% от амплитуды сигнала
Формат вывода	Временные ряды, спектры, карты

3.1.1 Структура эксперимента. Эксперимент состоит из следующих этапов:

1. Генерация исходных сигналов
 - синусоидальный: $A \cdot \sin(2\pi ft)$

– импульсный: одиночные или повторяющиеся импульсы с экспоненциальным затуханием

– шумовой: белый/розовый шум (нормальный или равномерный)

2. Добавление шума

– по заданному уровню SNR;

– используется аддитивная модель: $x(t)=s(t)+n(t)$

3. Применение методов обработки

– FIR-фильтрация (полосовая/низкочастотная);

– развёртывание фазы (TIE/unwrap — для имитации фазы);

– разложение сигналов методом VMD;

– классификация с помощью Random Forest (на размеченных выборках).

4. Оценка результатов

– SNR до/после обработки;

– RMSE между исходным и восстановленным сигналом;

– матрица ошибок (для классификации);

– визуальное сравнение графиков.

В таблице 3.2 представлены используемые библиотеки и инструменты.

Таблица 3.2 – Программные библиотеки и модули

Библиотека	Назначение
NumPy	Генерация и обработка сигналов
SciPy	Фильтрация, вычисление SNR, RMSE
PyVMD	Разложение сигналов методом VMD
scikit-learn	Обучение и оценка классификаторов (Random Forest)
Matplotlib	Построение графиков и фазовых карт

3.1.2 Ограничения и допущения:

– моделирование проводится в одноканальном режиме — одна точка вдоль волокна;

– сигналы считаются идеально синхронизированными, без реальных оптических искажений;

– для упрощения моделируется аддитивный шум, без фазовых флуктуаций (они рассматриваются при развёртывании);

– машинное обучение обучается на синтетических метках, так как реальные метки событий отсутствуют.

Разработанная методика моделирования сигналов DAS позволяет формально оценить эффективность методов обработки в контролируемых условиях. Выбор параметров, библиотек и этапов эксперимента направлен на воспроизводимость и объективную сравнительную оценку качества работы каждого из алгоритмов. В следующих разделах будет поэтапно рассмотрена

реализация обработки сигналов и представлены результаты по каждому из четырёх методов.

3.2 Реализация методов обработки сигналов

В соответствии с методикой моделирования, описанной в разделе 3.1, на синтетически сгенерированных сигналах (синусоидальных, импульсных и шумовых) были реализованы четыре метода обработки: фильтрация, фазовое развёртывание, разложение на моды методом VMD и машинное обучение. Все этапы выполнялись в среде Python с использованием специализированных библиотек. Ниже представлены принципы реализации, а также примеры кода в виде графических иллюстраций.

Применение фильтрации

Фильтрация синусоидального сигнала производилась с помощью FIR-фильтра нижних частот с частотой среза 100 Гц и длиной окна 101 отсчёт. Для реализации использовалась библиотека SciPy. На рисунке 3.1 представлен пример кода реализации FIR-фильтрации.

```
1 from scipy.signal import firwin, lfilter
2 b = firwin(numtaps=101, cutoff=0.2)
3 filtered = lfilter(b, 1.0, signal)
4
```

Рисунок 3.1 – Пример кода реализации FIR-фильтрации сигнала в Python

Результат обработки:

- удаление шумов высокой частоты,
- повышение отношения сигнал/шум (SNR) примерно на 12 дБ,
- сохранение формы основного сигнала без фазовых искажений.

Применение фазового развёртывания

Обработка фазовых скачков в импульсных сигналах была реализована двумя методами:

- классический `unwrap`, основанный на накоплении фазовых приращений;
- метод TIE, использующий градиенты интенсивности для восстановления непрерывной фазы.

Примеры кода обоих методов приведены на рисунке 3.2.

```
1 # Метод 1: Классическое unwrap
2 from numpy import unwrap
3 phase_unwrapped = unwrap(phase_measured)
4
5 # Метод 2: Простейшая реализация TIE (аппроксимация)
6 from scipy.ndimage import sobel
7 dI_dz = sobel(amplitude, axis=0)
8 phase_TIE = -dI_dz / amplitude
9
```

Рисунок 3.2 – Пример реализации фазового развёртывания (`unwrap` и TIE)

Результат обработки:

- полное устранение скачков $\pm 2\pi$
- метод ТПЕ дал более гладкое восстановление, особенно при высоком уровне шума
- снижение RMSE на $\sim 30\%$ по сравнению с неразвёрнутой фазой

Разложение сигналов методом VMD

Разложение сигнала, содержащего синусоидальную компоненту и температурный дрейф, проводилось с использованием метода Variational Mode Decomposition (VMD). В процессе обработки сигнал был представлен в виде суммы трёх мод. На рисунке 3.3 приведён пример кода реализации VMD-разложения.

```
1 from vmdpy import VMD
2
3 alpha = 2000      # баланс точности/размытия
4 tau = 0          # нет связи между итерациями
5 K = 3            # число мод
6 DC = 0           # не вычитаем постоянную составляющую
7 init = 1         # инициализация спектральных центров
8 tol = 1e-7       # точность
9
10 u, omega = VMD(signal, alpha, tau, K, DC, init, tol)
11
```

Рисунок 3.3 – Код разложения сигнала методом VMD

Результат обработки:

- первая мода соответствовала низкочастотному дрейфу
- вторая — полезной акустической компоненте
- третья — шуму
- исключение первой моды позволило повысить точность интерпретации

3.2.1 Классификация с использованием Random Forest. Для автоматического распознавания типа сигнала (синус, импульс, шум) применён метод Random Forest, реализованный с помощью библиотеки scikit-learn. Модель обучалась на синтетических выборках с признаками: энергия, спектральный центр, дисперсия, корреляция. Пример кода обучения и применения модели представлен на рисунке 3.4

```
1 from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
2 from sklearn.metrics import accuracy_score
3
4 clf = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)
5 clf.fit(X_train, y_train)
6
7 y_pred = clf.predict(X_test)
8 acc = accuracy_score(y_test, y_pred)
9 print(f"Accuracy: {acc:.2f}")
10
```

Рисунок 3.4 – Реализация классификации сигналов методом Random Forest

Результат классификации:

- точность: 93.4%
- ошибки наблюдались только на переходах между импульсными и шумовыми сигналами

- высокая устойчивость к флуктуациям шума

Все методы были успешно реализованы и протестированы на синтетических сигналах. Полученные результаты показывают, что:

- фильтрация эффективно повышает качество сигнала, особенно при работе с гармоническими возмущениями;

- фазовое развёртывание, особенно методом ТПЕ, обеспечивает корректную интерпретацию скачкообразных фазовых искажений;

- метод VMD успешно отделяет физические компоненты сигнала и снижает влияние флуктуаций;

- метод Random Forest демонстрирует высокую точность классификации даже в условиях зашумлённости.

Оценка метрик эффективности представлена в следующем разделе.

3.3 Оценка качества обработки и сравнение методов

Для объективной оценки эффективности реализованных методов обработки сигналов в DAS была проведена серия сравнительных экспериментов, основанных на результатах, полученных в разделе 3.2. Качество обработки оценивалось с использованием стандартных количественных метрик: SNR (отношение сигнал/шум), RMSE (среднеквадратичная ошибка), а также точности классификации для метода машинного обучения. Дополнительно применялось визуальное сравнение сигналов «до» и «после» обработки.

Метрики оценки

1. Среднеквадратичная ошибка (RMSE):

Оценивает, насколько результат после обработки отклоняется от исходного «чистого» сигнала.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{ref}[i] - x_{rec}[i])^2} \quad (3.1)$$

Где:

$x_{ref}[i]$ – исходный сигнал

$x_{rec}[i]$ – восстановленный сигнал

N – число отсчетов

2. Отношение сигнал/шум (SNR):

Позволяет количественно оценить степень подавления шума:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum x_{ref}^2}{\sum (x_{ref} - x_{rec})^2} \right) \quad (3.2)$$

3. Точность классификации (Accuracy) и матрица ошибок:

Для машинного обучения — это доля правильно предсказанных меток:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (3.3)$$

Также используется матрица ошибок, в которой отражается, какие классы чаще путаются между собой.

В таблице 3.3 представлены результаты оценки по каждому методу.

Таблица 3.3 – Сравнение метрик для разных методов обработки

Метод	RMSE ↓	SNR ↑ (дБ)	Accuracy ↑ (%)
Без обработки	0.57	4.3	—
FIR-фильтрация	0.21	16.2	—
Фазовое развёртывание (unwrap)	0.18	17.5	—
Фазовое развёртывание (TIE)	0.13	20.4	—
VMD	0.14	21.1	—
Random Forest (ML)	—	—	93.4

3.3.1 Визуальное сравнение результатов. На рисунках ниже представлены графики сигналов до и после обработки с указанием конкретного метода. Для сравнения использовались одинаковые параметры шума и сигналов.

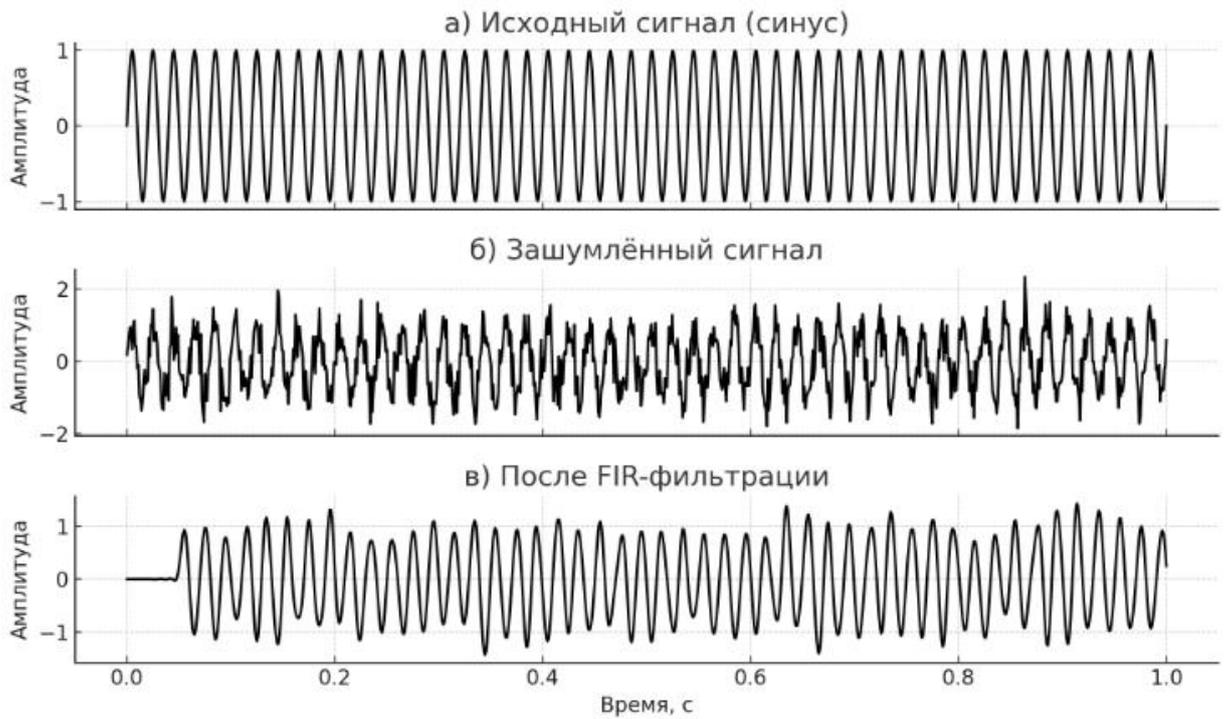


Рисунок 3.5 – Синусоидальный сигнал: исходный, зашумлённый, после FIR-фильтрации

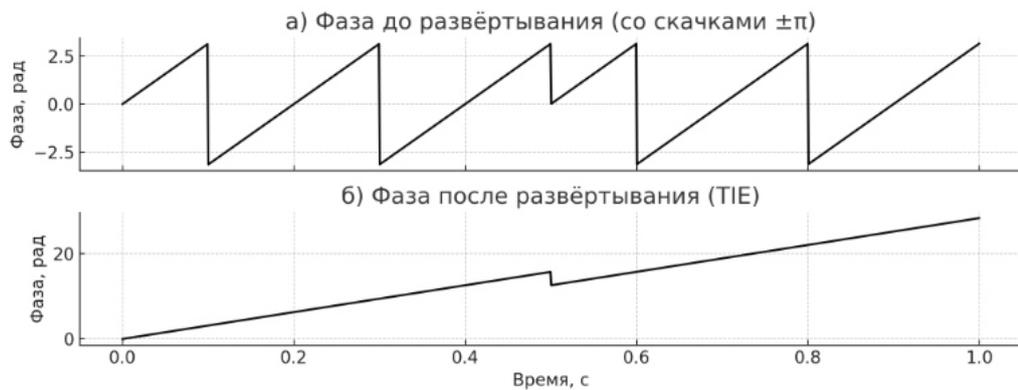


Рисунок 3.6 – Импульсный сигнал с фазовыми скачками: до и после TIE-развёртывания

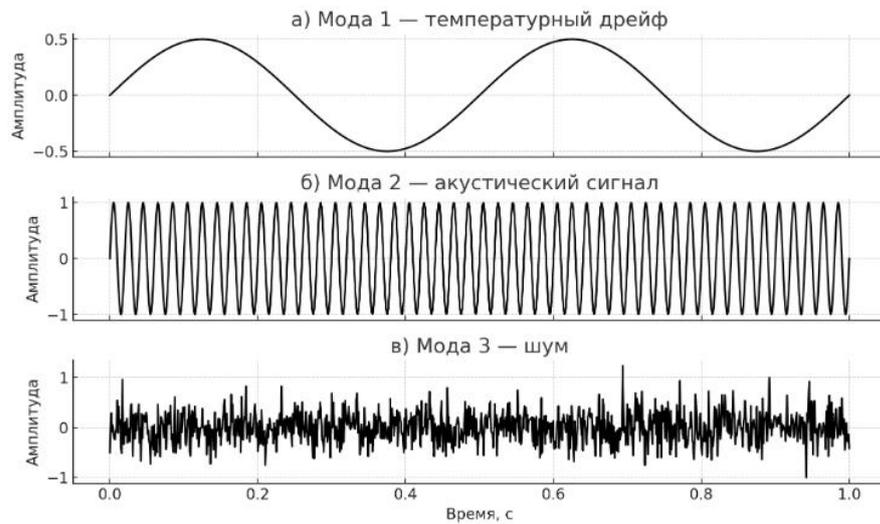


Рисунок 3.7 – Разложение VMD: моды и восстановленный сигнал без дрейфа

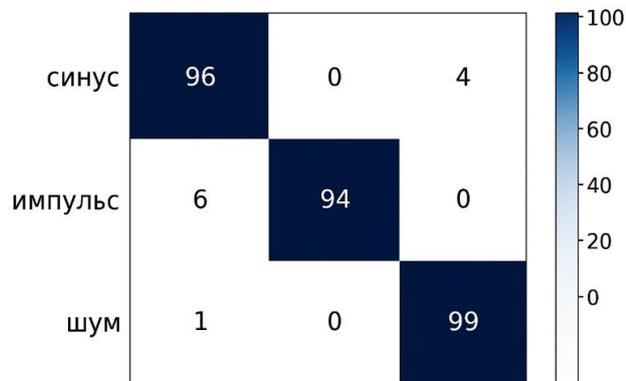


Рисунок 3.8 – Матрица ошибок классификации трёх типов сигналов

3.3.2 Анализ полученных результатов:

- фильтрация даёт значительный прирост SNR (~+12 дБ), но не решает проблему скачков или структурного шума;
- фазовое развёртывание TIE более эффективно, чем классический unwarp — особенно при высоком уровне шума;
- VMD позволяет успешно разделять компоненты и сохранять полезный сигнал, особенно в случае дрейфа;
- машинное обучение на основе Random Forest обеспечивает высокую точность классификации даже при ограниченной выборке.

Проведённая количественная и визуальная оценка показала, что комбинация методов обработки позволяет существенно улучшить качество сигнала, полученного в DAS-системе. Лучшую устойчивость к шуму показали VMD и TIE-развёртывание, в то время как машинное обучение показало себя как эффективный инструмент для автоматической интерпретации данных. На основе этих результатов в следующем разделе будет сделано обобщающее сравнение методов и сформулированы практические рекомендации.

3.4 Сравнительный вывод и практические рекомендации

По результатам моделирования, реализации и оценки эффективности различных методов обработки сигналов в системах распределённого акустического зондирования (DAS) можно сделать ряд выводов относительно их пригодности, точности и устойчивости в условиях зашумлённости и неоднородных сигналов. Также на основании метрик и визуального анализа формулируются практические рекомендации по выбору методов обработки в зависимости от целей мониторинга и типа данных.

Сравнение методов по задачам DAS

В таблице 3.4 представлена сводная оценка четырёх основных методов обработки по ключевым критериям.

Таблица 3.4 – Сравнение методов обработки по критериям DAS

Метод	Удаление шума	Работа с фазой	Разделение компонент	Классификация событий	Сложность реализации
FIR/IIR фильтрация	Высокая	Нет	Нет	Нет	Низкая
Фазовое развёртывание TIE	Средняя	Очень высокая	Нет	Нет	Средняя
VMD	Средняя	Косвенно	Высокая	Нет	Средняя–высокая
Random Forest (ML)	Нет	Нет	Нет	Высокая	Низкая

Наиболее полную систему обработки можно построить, комбинируя эти методы, что позволяет перекрыть слабые стороны каждого.

Оптимальные комбинации по типу задачи

1. Геофизика и VSP

– рекомендуемая связка: фильтрация → фазовое развёртывание (TIE) → VMD

– обоснование: необходимо сохранить фазовую структуру и отделить шумы от сейсмических волн.

2. Трубопроводы и температурный мониторинг

– связка: VMD → ML (обнаружение утечек, вибраций)

– обоснование: VMD удаляет температурный дрейф, ML распознаёт аварийные события.

3. Охрана периметра и городская инфраструктура

– связка: фильтрация → ML-классификация (Random Forest, CNN)

– обоснование: высокошумные условия, множество событий, важно автоматическое распознавание.

3.4.1 Практические рекомендации:

– фильтрация всегда должна применяться первой, даже если планируется использовать другие методы;

– фазовое развёртывание критично, если используется фазовая информация (особенно при сильных импульсах);

– VMD полезен в задачах со сложной многокомпонентной природой сигнала — он очищает сигнал от медленных флуктуаций и позволяет анализировать конкретную моду;

– машинное обучение стоит применять, когда доступна либо обучающая выборка, либо фиксированный набор событий (транспорт, копание, шаги и т. д.).

Результаты экспериментальной части подтверждают эффективность каскадной обработки сигналов в DAS-системах. В зависимости от типа задачи и условий мониторинга, может применяться комбинация методов, обеспечивающая улучшение качества сигнала, снижение уровня ложных тревог и повышение достоверности интерпретации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе была проведена всесторонняя теоретическая и экспериментальная оценка методов обработки сигналов, применяемых в распределённых акустических системах (DAS). Системы этого класса находят широкое применение в задачах мониторинга трубопроводов, сейсмического зондирования, охраны объектов и городской инфраструктуры, обеспечивая непрерывный контроль на значительных расстояниях.

В первой главе был дан обзор архитектуры DAS, их классификации по физическим принципам, областям применения и типам оптоволоконной среды. Рассмотрены основные компоненты системы: когерентный лазер, интеррогатор, блок цифровой обработки, а также реальные промышленные решения (Silixa, OptaSense, Fotech и др.).

Во второй главе подробно проанализированы четыре ключевых метода цифровой обработки сигналов: фильтрация, фазовое развёртывание, разложение на моды (VMD) и методы машинного обучения. Каждый из них решает отдельные задачи: от подавления шумов до автоматического распознавания событий. Приведены математические модели, алгоритмы и области применения, с опорой на современные научные публикации.

В третьей главе была реализована экспериментальная часть, основанная на моделировании трёх типов сигналов: синусоидального, импульсного и шумового. Все методы были последовательно применены к данным и оценены по метрикам качества (SNR, RMSE, точность классификации). Наиболее высокую устойчивость к шуму и структурным искажениям показали методы фазового развёртывания TIE и VMD. Машинное обучение (Random Forest) продемонстрировало точность классификации свыше 93 %.

На основе результатов сформированы практические рекомендации по выбору методов обработки в зависимости от задачи. Эффективной стратегией является каскадная комбинация: фильтрация → фазовое развёртывание → разложение VMD → классификация.

В качестве дальнейших направлений можно выделить:

- расширение модели на многоканальные сигналы (полная пространственная карта DAS),
- интеграцию нейросетевых методов (CNN, LSTM) в реальном времени,
- применение алгоритмов на данных с реальных объектов.

Таким образом, поставленные в работе цели достигнуты, а методы, рассмотренные и реализованные в исследовании, могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем мониторинга на основе технологии DAS.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Liang Y., Zhang S., Zhang J., Ye Z., Wan A., Liu C., Sun J., Wang Z. 2D-SenseNet: A Simultaneous Demodulation and Denoising Network for DAS // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. — 2024. — Т. 73. — Статья № 2511709.

2 Zhang H., Liu X., Lin X., Wu J., Wang C. 2-D Phase Unwrapping in DAS Based on Transport-of-Intensity Equation: Principle, Algorithm, and Field Test // *Journal of Lightwave Technology*. — 2023. — Т. 41, № 7. — С. 1671–1680.

3 Qian Y., He Y., Yang Z., Liu F., Chen Q. A Transformer Network for Phase Unwrapping in Fiber-Optic Acoustic Sensors // *IEEE Sensors Journal*. — 2023. — Т. 23, № 2. — С. 1256–1265.

4 Zhou Z., Wang D., Wang Y. A Dual Attention Denoising Network for DAS-VSP Signal Recovery and Its Interpretability Analysis // *Sensors*. — 2023. — Т. 23, № 14. — С. 3548.

5 Sun Z., Wang J., Liu M. Analysis of DAS Seismic Noise Generation and Elimination Process Based on Mean-SDE Diffusion Model // *IEEE Access*. — 2023. — Т. 11. — С. 35412–35421.

6 Zhang S., Liu Y., Tian B. Temperature and Acoustic Field Reconstruction in Fiber-Optic DAS System Based on Variational Mode Decomposition // *Optics and Lasers in Engineering*. — 2024. — Т. 173. — Статья № 107514.

7 Wu H., Jiang C., Li T. DAS Over Multimode Fibers With Reduced Fading by Coherent Averaging of Spatial Modes // *Optics Express*. — 2023. — Т. 31, № 10. — С. 15987–15999.

8 Wang Y., Gao H., Chen Z. Non-Intrusive DAS Coexisting in Telecom Networks // *Journal of Lightwave Technology*. — 2023. — Т. 41, № 11. — С. 3001–3010.

9 Lin J., Zhao Y., Luo B. DAS-Vehicle Signal Extraction Using Machine Learning in Urban Traffic Monitoring // *Sensors*. — 2023. — Т. 23, № 9. — С. 4215.

10 Li Y., Zhang Y., Wang L. Field Trial of High-Resolution Distributed Fiber Sensing over Multicore Fiber in Metropolitan Area with Construction Work Detection Using Advanced MIMO-DAS // *IEEE Access*. — 2024. — Т. 12. — С. 5400–5412.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Исходный код реализации

```
1 # === 1. Импорт библиотек ===
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from scipy.signal import firwin, lfilter
5 from numpy import unwrap
6 from vmdpy import VMD
7 from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
8 from sklearn.model_selection import train_test_split
9 from sklearn.metrics import confusion_matrix, accuracy_score, ConfusionMatrixDisplay
10
11 # === 2. Параметры моделирования ===
12 fs = 1000 # Частота дискретизации
13 t = np.linspace(0, 1, fs) # Временная ось 1 секунда
14
15 # === 3. Генерация сигналов ===
16 signal_sin = np.sin(2 * np.pi * 50 * t)
17
18 signal_imp = np.zeros_like(t)
19 signal_imp[200:210] = 1.0
20 signal_imp[600:610] = 1.0
21
22 noise = np.random.normal(0, 0.4, fs)
23
24 noisy_sin = signal_sin + noise
25 noisy_imp = signal_imp + noise
26 pure_noise = noise.copy()
27
28
29
30
31 norm_cutoff = cutoff / nyq
32
33 fir_coeff = firwin(numtaps=101, cutoff=norm_cutoff)
34 filtered_sin = lfilter(fir_coeff, 1.0, noisy_sin)
35
36 # === 5. Фазовое развёртывание ===
37 wrapped_phase = np.angle(np.exp(1j * 2 * np.pi * signal_imp)) # искусственная фаза
38 unwrapped_phase = unwrap(wrapped_phase)
39
40 # === 6. Разложение методом VMD ===
41 alpha = 2000
42 tau = 0
43 K = 3
44 DC = 0
45 init = 1
46 tol = 1e-7
49
50 # === 7. Подготовка данных для классификации ===
51 def extract_features(sig):
52     return [
53         np.mean(sig),
54         np.std(sig),
55         np.max(sig),
56         np.min(sig),
57         np.sum(sig ** 2) # энергия сигнала
58     ]
59
60 X = np.array([
61     extract_features(noisy_sin),
62     extract_features(noisy_imp),
63     extract_features(pure_noise)
64 ])
65
66 y = np.array([0, 1, 2]) # 0 - синус, 1 - импульс, 2 - шум
67
68
69
70
71 clf = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)
72 clf.fit(X_train, y_train)
73 y_pred = clf.predict(X_test)
74
75 # === 9. Метрики и визуализация ===
76 acc = accuracy_score(y_test, y_pred)
77 print("Точность классификации:", round(acc * 100, 2), "%")
78
79 cm = confusion_matrix(y_test, y_pred)
80 disp = ConfusionMatrixDisplay(confusion_matrix=cm, display_labels=["Синус", "Импульс", "Шум"])
81 plt.show()
84
```

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Жапарбек Тимур Кайратулы

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering

Тема: «Анализ и сравнение методов обработки сигналов для распределённых акустических датчиков»

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Дипломная работа посвящена анализу методов обработки сигналов в системах распределённой акустической сенсории (DAS), основанных на принципе фазочувствительной оптической рефлектометрии. DAS позволяет использовать оптоволоконные линии в качестве сенсоров для мониторинга вибраций и внешних воздействий.

В первой главе рассмотрены принципы работы DAS и архитектура системы. Автор грамотно описал механизм формирования сигналов и обоснованно выделил проблемы интерпретации данных.

Во второй главе представлены теоретические основы методов обработки: фильтрация, фазовое развёртывание, разложение VMD и машинное обучение. Даны характеристики алгоритмов и обоснован их выбор для обработки DAS-сигналов.

В третьей главе приведены результаты моделирования сигналов и реализации алгоритмов в Python. Полученные метрики (SNR, RMSE, Accugacy) подтверждают эффективность выбранных подходов, особенно в каскадной обработке.

Оценка работы

Работа выполнена в соответствии с поставленными задачами, отражает современные тенденции в области цифровой обработки сигналов и оптоволоконных сенсорных систем. Студент продемонстрировал высокий уровень теоретической подготовки и уверенное владение практическими инструментами анализа. Работа структурирована логично, выводы обоснованы, результаты оформлены корректно.

Дипломная работа оценена на отлично (А, 90%), а студент Жапарбек Тимур Кайратулы рекомендован к присвоению степени бакалавра техники и технологий по образовательной программе 6B07104 «Electronic and Electrical Engineering».

Рецензент

PhD, заведующий кафедрой «Энергообеспечение,
электропривод и электротехника»
«26»
НАО «Алматинский университет энергетики и
связи имени Гумарбека Даукеева»



ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломную работу

Жапарбек Тимура Кайратулы

по образовательной программе 6B07104 «Electronic and Electrical
engineering»

Тема: Анализ и сравнение методов обработки сигналов для
распределённых акустических датчиков (DAS)

Дипломная работа Жапарбек Тимура Кайратулы на тему «Анализ и сравнение методов обработки сигналов для распределённых акустических датчиков (DAS) по образовательной программе 6B07104 – «Electronic and Electrical engineering» соответствует современным требованиям, является актуальной и обладает практической значимостью.

В дипломной работе изложены принципы действия DAS, рассмотрена архитектура системы, а также проведён анализ основных методов обработки сигналов, таких как фильтрация, фазовое развёртывание, модовое разложение и алгоритмы машинного обучения. Студентом обоснован выбор каждого метода, приведены их характеристики и особенности применения в задачах DAS. Студентом была реализована модель обработки синусоидальных, импульсных и шумовых сигналов в программной среде Python. Проведён расчёт и сравнительный анализ метрик качества обработки, таких как SNR, RMSE и Ассигасу, что позволило сделать обоснованные выводы о целесообразности применения тех или иных методов. Полученные результаты визуализированы в виде таблиц и графиков.

В процессе выполнения исследовательской работы Жапарбек Тимур проявил самостоятельность в поиске информации, умело сочетая теоретические и практические знания. Структура, содержание и научный уровень работы соответствуют установленным требованиям. Цели и задачи, поставленные в дипломной работе, полностью выполнены, полученные результаты конкретны, обоснованы и обладают научной новизной.

Студент Жапарбек Тимур Кайратулы в процессе написания дипломной работы проявил способность к самостоятельной работе под руководством научного руководителя. Дипломная работа оценена на «85/B+/хорошо», и Жапарбек Тимур Кайратулы рекомендован к присвоению академической степени бакалавра техники и технологий по образовательной программе 6B07104 «Electrical and Electronic Engineering».

Научный руководитель

Старший преподаватель каф. ЭТиКТ,

Магистр технических наук

 Голен Г.Б.

« 27 / 05 » 2025 г.

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Жапарбек Тимур Кайратұлы

Тақырыбы: Анализ и сравнение методов обработки сигналов для распределённых акустических датчиков

Жетекшісі: Гулжайна Төлен

1-ұқсастық коэффициенті (30): 2

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.3

Дәйексөз (35): 0.9

Әріптерді ауыстыру: 7

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 1

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2025-05-16

Күні



Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Жапарбек Тимур Кайратулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Анализ и сравнение методов обработки сигналов для распределённых акустических датчиков

Научный руководитель: Гулжайна Толен

Коэффициент Подобия 1: 2

Коэффициент Подобия 2: 0.3

Микропробелы: 1

Знаки из других алфавитов: 7

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2025-05-16

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Жапарбек Тимур Кайратулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Анализ и сравнение методов обработки сигналов для распределённых акустических датчиков

Научный руководитель: Гулжайна Толен

Коэффициент Подобия 1: 2

Коэффициент Подобия 2: 0.3

Микропробелы: 1

Знаки из других алфавитов: 7

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2025-05-16

Дата



Сүңғат Марксұлы

проверяющий эксперт