### МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт автоматики и информационных технологии

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

Каирболатов Даулет Арманович

На тему: «Применение распределённых акустических датчиков для обнаружения землетрясений через оптоволоконные линии связи»

# ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering

#### МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт автоматики и информационных технологии

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

#### ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Е. Таштай 2025 г.

Заведующий кафедрой ЭТиКТ канд. техн. наук. ассоциированный профессор

# ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к дипломному проекту

На тему: «Применение распределённых акустических датчиков для обнаружения землетрясений через оптоволоконные линии связи»

Образовательная программа: 6В07104 – Electronic and Electrical Engineering

Выполнил

Рецензент

Meeepoc Monasan g 2025 г.

Каирболатов Д.А.

Алматы 2025

#### МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт автоматики и информационных технологии

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

**УТВЕРЖДАЮ** Заведующий кафедрой ЭТиКТ канд. техн. наук, ассоцированный профессор Е. Таштай 2025 г.

#### ЗАДАНИЕ на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Каирболатову Даулету Армановичу

Тема: "Применение распределённых акустических датчиков для обнаружения землетрясений через оптоволоконные линии связи"

Утверждена приказом Ректора Университета № <u>26 П/</u>от "<u>29</u>" <u>01</u> 2025 г.

Срок сдачи законченной работы "30" 05 2025 г.

Исходные данные к дипломной работе: была разработана система обнаружения и локализации сейсмических событий на базе технологии распределённых акустических датчиков (DAS), использующих существующие оптоволоконные линии связи. Система должна обеспечивать вычисление задержек сигнала и определение координаты эпицентра в автоматическом режиме. Для проверки концепции проводятся программные симуляции.

Краткое содержание дипломной работы:

 разработана имитационная модель системы DAS, включающая формирование сигнала, моделирование задержек и определение координаты эпицентра;

 проведено экспериментальное моделирование в трёх средах: MATLAB (визуализация распространения фронта сигнала), Simulink (сборка блочной модели DAS), Python (численная оптимизация координаты источника);

 подтверждена работоспособность методики: построенные алгоритмы успешно локализуют эпицентр даже при наличии шумов.

Перечень графического материала: представлены 10-15 слайдов презентации работы.

- 1. Актуальность темы и цель исследования;
- Обзор технологии DAS и принцип регистрации сейсмического сигнала;
- Построение модели в МАТLАВ и визуализация сигнала;
- 4. Схема системы в Simulink и результат моделирования;
- 5. Скрипт и графики Python-модели (карта сигналов, оценка эпицентра);
- 6. Сравнительный анализ методов и точности;
- 7. Выводы и рекомендации по дальнейшему применению.

#### Рекомендуемая основная литература:

1. Pardo, F., & Estrada, A. Distributed Acoustic Sensing for Seismic Monitoring: A Review. // IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 22, 2018. – pp. 9341-9350.

2. Main, I. G., & Sandwell, D. T. Observations of the Thermal Structure and Seismicity of the Lithosphere from Distributed Acoustic Sensing. // Geophysical Research Letters, vol. 46, no. 1, 2019. – pp. 123-130.

3. Bamberger, J. A., & Whittaker, R. Distributed Fiber Optic Sensing for Seismic Applications. – New York: Springer, 2020. – 280 c.

4. Silixa Limited. Introduction to Distributed Acoustic Sensing (DAS). – London: Silixa, 2021. [Online]. Available: https://www.silixa.com/das-introduction.

5. Draelos, T., & Mungovan, D. Fiber Optic Seismic Monitoring Using Distributed Acoustic Sensing. // Journal of Applied Geophysics, vol. 172, 2019. – Article ID 103992.

6. Tammen, A., & Foerster, M. Enhancing Earthquake Detection with Distributed Acoustic Sensing Technology. // Seismological Research Letters, vol. 91, no. 2, 2020. – pp. 573-583.

#### ГРАФИК подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Анализ существующих технологий сейсмического мониторинга и систем обнаружения землетрясений с использованием DAS	04.01.2025 г 31.01.2025	Выполнено
Изучение принципов работы DAS и их применимости к задачам мониторинга сейсмической активности	01.02.2025 г 1.03.2025	Выполнено
Разработка модели распространения сейсмических волн по волокну и построение имитационной модели в MATLAB/Simulink	01.03.2025 r 30.05.2025	Выполнено
Реализация алгоритма обработки сигнала, визуализация данных и определение эпицентра на основе временных задержек	01.04.2025 - 20.04.2025	Выполнено
Формирование и оформление дипломной работы в соответствии с требованиями СТ КазНТУ 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
Теоретическая часть	Старший преподаватель кафедры, м.т.н, Төлен Г.Б.	12.05.2025	They
Основная часть	Старший преподаватель кафедры, м.т.н, Төлен Г.Б.	12.05.2025	Stary
Нормоконтролер	Ассистент кафедры ЭТиКТ Маткаримова А. А	12.05.2025	AM

Научный руководитель

Төлен Г. Б. Каирболатов Д. А.

Задание принял к исполнению обучающийся

"<u>4</u>" января 2025 г.

Дата

#### АҢДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста жер сілкіністерін анықтау және эпицентрін локализациялау үшін талшықты-оптикалық байланыс желілері арқылы таралған акустикалық датчиктер (DAS) технологиясын қолдану мәселесі қарастырылады. Тақырыптың өзектілігі — кеңістікте созылған және жоғары сезімталдыққа ие сейсмобақылау жүйелерін құру қажеттілігімен байланысты. Жұмыста DAS жүйесінің жұмыс принциптері, серпімді толқындардың таралуының физикалық моделі және дәстүрлі сейсмикалық станциялармен салыстырғандағы артықшылықтары сипатталады. Эксперименттік модельдеу MATLAB, Simulink және Python жүргізілді. Модельдеулерге фронтының орталарында толқын таралуы, сигнал визуализациясы, шу қосу және эпицентрді сандық анықтау кіреді. Нәтижелер әдістің дәлдігін көрсетіп, DAS жүйесін сейсмобақылауда қолданудың болашағын дәлелдейді.

#### АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматривается применение распределённых акустических датчиков (DAS) для обнаружения и локализации землетрясений с использованием оптоволоконных линий связи. Актуальность темы обусловлена необходимостью построения высокочувствительных и пространственно протяжённых систем мониторинга сейсмических событий. В работе изложены принципы работы DAS, физико-математическая модель распространения упругих волн, а также рассмотрены преимущества технологии по сравнению с традиционными сейсмостанциями. Экспериментальное моделирование выполнено в средах MATLAB, Simulink и Python. В рамках экспериментов реализованы имитации прохождения сигнала вдоль волокна, визуализация фронта волны, добавление шумов и численная локализация эпицентра. Результаты показывают высокую точность метода даже в условиях искажений. что подтверждает перспективность применения DAS В задачах сейсмомониторинга.

#### ANNOTATION

This graduation thesis explores the application of Distributed Acoustic Sensing (DAS) technology for earthquake detection and localization using fiber optic communication lines. The relevance of the topic is linked to the growing need for highly sensitive and spatially distributed seismic monitoring systems. The study presents the principles of DAS operation, a physical model of elastic wave propagation, and the comparative advantages over traditional seismic stations. Experimental modeling was conducted using MATLAB, Simulink, and Python. The simulations included wavefront propagation along the fiber, signal visualization, noise addition, and numerical estimation of the earthquake epicenter. Results demonstrate high localization accuracy even in noisy conditions, confirming the potential of DAS for seismic monitoring applications.

# СОДЕРЖАНИЕ

Введе	ение	8
1	Концепция, принцип и измерения распределенного акустического зонлирования (DAS)	9
1.1	Принцип DAS	10
1.2	Развитие технологии DAS	11
2	Распределенные акустический датчик (DAS) принципы и измерения	14
2.1	Концепция DAS	15
2.2	Принцип работы системы COTDR	16
2.3	DAS на основе алгоритма демодуляции несущей с генерацией фазы	17
3	Экспериментальная часть	27
3.1	Цели и задачи моделирования	27
3.2	Моделирование в MATLAB	27
3.3	Моделирование в Python	31
3.4	Экспериментально-расчётная часть	35
3.5	Итоги экспериментального моделирования	36
Заклн	очение	38
Переч	чень сокращений	39
Переч	чень терминов	40
Лите	ратура	42
ПРИЈ	ЛОЖЕНИЕ А	45
ПРИЈ	ЛОЖЕНИЕ Б	46
ПРИЈ	ЛОЖЕНИЕ В	47

# введение

Современные подходы к сейсмическому мониторингу требуют создания высокоточных, пространственно протяжённых и экономически эффективных систем обнаружения землетрясений. Одной из наиболее перспективных технологий в этой области является метод распределённой акустической регистрации (DAS), основанный использовании стандартных на оптоволоконных линий связи в качестве датчиков. DAS позволяет преобразовать волоконно-оптический кабель В непрерывную линию виртуальных сейсмодатчиков, чувствительных к микродеформациям, возникающим при прохождении сейсмических волн. В отличие от традиционных сейсмостанций, распределённые акустические датчики не требуют установки отдельных чувствительных элементов, что значительно снижает затраты и позволяет большие DAS-технологии демонстрируют покрывать площади. уже эффективность сферах, в таких как охрана периметра, мониторинг трубопроводов и транспортной инфраструктуры, а также в сейсмических исследованиях.

Целью данной работы является исследование возможности применения DAS-систем для обнаружения землетрясений, моделирование распространения сейсмического сигнала вдоль волоконной линии и определение координаты эпицентра на основе временных задержек регистрации сигнала. Для достижения этой цели были использованы численные методы моделирования в программных средах MATLAB, Simulink и Python.

Актуальность темы обусловлена ростом интереса к пассивным и масштабируемым методам сейсмомониторинга, способным обеспечивать высокое пространственное разрешение и надёжность регистрации. Практическая значимость заключается в возможности применения данной технологии в реальных телекоммуникационных сетях без необходимости прокладки дополнительного оборудования.

Структура работы включает теоретическое обоснование принципов действия DAS-систем, обзор существующих методов, а также экспериментальную часть, где реализовано и проанализировано собственное моделирование системы регистрации и локализации сейсмических событий.

8

## 1 Концепция, принцип и измерения распределенного акустического зондирования (DAS)

Современная сейсмология требует высокой плотности пространственных данных, оперативности сбора информации и расширенного географического покрытия. В условиях Казахстана, где значительная часть территории относится к сейсмоопасным регионам (например, юго-восток республики, включая Алматы и Жамбылскую область), эти задачи приобретают особую актуальность. Традиционные сейсмические станции, несмотря на свою точность, охватывают ограниченное число точек и требуют значительных затрат на установку, обслуживание и калибровку. Это особенно заметно в горных и труднодоступных районах, где установка стационарных сейсмометров затруднена. В Казахстане, например, плотность сейсмических станций в некоторых приграничных и сельских районах остаётся недостаточной для эффективного мониторинга локальных землетрясений. Распределённые акустические датчики (DAS), преобразующие оптоволоконные кабели в линейные массивы чувствительных сенсоров, Существующая предлагают альтернативный подход. телекоммуникационная инфраструктура Казахстана — в том числе протяжённые линии связи «Казахтелеком» и транснациональные магистральные каналы может быть использована для размещения DAS-систем без необходимости строительства новых станций. Это особенно перспективно для мониторинга вдоль автодорог, железнодорожных путей и стратегически важных объектов.

Первые пилотные исследования с использованием DAS-технологии в Центральной Азии уже проводятся в рамках международного сотрудничества, включая проекты, реализуемые при участии Института сейсмологии Министерства науки и высшего образования РК. Например, вдоль участков магистральных оптоволоконных линий в Алматинской области тестируются возможности регистрации слабых локальных землетрясений и техногенных вибраций, связанных с инфраструктурной деятельностью (строительство, транспорт).

В условиях Казахстана DAS также может стать ключевым инструментом для раннего предупреждения о землетрясениях в густонаселённых регионах, включая мегаполис Алматы, где классические станции не всегда позволяют оперативно зафиксировать начальные фазы сейсмического события из-за ограниченного числа точек съёма.

Таким образом, внедрение DAS-технологии в сейсмический мониторинг Казахстана позволит расширить охват наблюдений, повысить детализацию сейсмических карт и обеспечить интеграцию с международными системами предупреждения, что особенно важно в контексте глобальных инициатив по управлению природными рисками.

# 1.1 Принцип DAS

Технология распределённых акустических датчиков (DAS) представляет собой современный подход к регистрации сейсмических волн, основанный на преобразовании волоконно-оптической линии связи в непрерывный массив чувствительных точек наблюдения. DAS относится к классу систем Large-N и использует оптоволокно в качестве среды для регистрации динамических деформаций грунта на протяжённых участках — от нескольких километров до десятков километров — с пространственным шагом от долей метра.

Принцип действия основан на анализе фазы света, рассеянного обратно при прохождении лазерных импульсов по одномодовому оптическому волокну. При используется эффект Рэлеевского рассеяния: ЭТОМ часть света, взаимодействуя с микроскопическими неоднородностями в сердцевине волокна, возвращается назад к приёмной системе. Этот сигнал сравнивается с опорной фазой, что позволяет выявить малейшие изменения, вызванные внешними механическими воздействиями. Регистрация сигналов осуществляется путём измерения временных сдвигов фазы между последовательно испущенными оптическими импульсами. Такой подход, основанный на фазочувствительной оптической рефлектометрии ( $\phi$ -OTDR), позволяет зафиксировать деформацию, вызванную прохождением упругих волн, в виртуальных точках, которые формируются на основе времени задержки отражённого сигнала. Расстояние между такими точками может быть порядка 100 микрометров, но для повышения точности и уменьшения шумов сигналы усредняются, что даёт возможность получить измерения на каждый метр волокна.

Собранные данные DAS отражают изменение относительной длины отдельных участков волокна по сравнению с его стабильным состоянием. Пространственное разрешение может варьироваться: от субметрового (менее 1 м) до десятков метров, в зависимости от выбранных параметров системы — длины интерферометрического окна (рабочей длины) и шага выборки. Такой уровень разрешения позволяет регистрировать сейсмические волны с частотами до 50 Гц без значительных искажений, что делает технологию перспективной для наблюдения локальных и региональных сейсмических процессов.

Типичная экспериментальная установка DAS включает в себя лазерный источник узкой линии (~100 Гц), формирующий оптические импульсы заданной частоты (например, 20 кГц) и длительности (например, 30 наносекунд). Сформированные импульсы усиливаются (например, с использованием волокон, легированных эрбием) и подаются в стандартное оптоволокно. Для калибровки и имитации сейсмических воздействий волокно может быть намотано на пьезоэлектрические цилиндры, управляемые генератором сигналов. Возвратный сигнал проходит через систему усиления, фильтрации (например, с помощью брэгговской решётки) и детектирования, где фиксируется и переводится в цифровую форму.

## 1.2 Развитие технологии DAS

Несмотря на то, что принципы передачи света по волноводам, аналогичным оптическому волокну (OB), были известны ещё в XIX веке, их практическое применение долгое время оставалось ограниченным из-за высоких потерь сигнала. Эти потери делали оптоволокно неконкурентоспособным по сравнению с медными коаксиальными линиями связи. Например, на 1966 год существующие образцы OB характеризовались затуханием порядка 1000 дБ/км, тогда как коаксиальные кабели обеспечивали потери всего 5–10 дБ/км.

Основная проблема заключалась в высокой концентрации примесей в стекле, применявшемся для изготовления волокон. Существенный прорыв был достигнут лишь в 1970 году, когда инженеры компании Corning — Р.Д. Маурер и П.К. Шульц — представили многомодовое оптоволокно с уровнем потерь, не превышающим 17 дБ/км, что сделало его пригодным для использования в линиях связи [7].

С развитием волоконно-оптических технологий и ростом их применения возникла необходимость в обеспечении надёжного контроля качества как при производстве волокон, так и в процессе их эксплуатации. На начальном этапе основным методом диагностики служило прямое измерение затухания света при прохождении по определённому участку волокна. Однако данный подход был неудобен в случаях, когда доступ к обоим концам волокна был затруднён, а также не позволял точно определить положение и величину потерь на конкретных участках.



Рисунок 1.1 - Схема установки для оптической рефлектрометрии (a); полученная зависимость интенсивности отраженного света импульса от времени (б) (рефлектограмма иследуемого волокна) Для решения задач локализации потерь и оценки неоднородностей в оптоволокне в 1976 году исследователи М.К. Барноски и С.М. Йенсен разработали метод оптической рефлектометрии с временным разрешением (OTDR) [8]. Принцип действия данного метода основан на том, что при прохождении оптического импульса по волокну часть энергии рассеивается на микроскопических неоднородностях, размер которых меньше длины волны света. Эти неоднородности являются неизбежными и связаны с флуктуациями показателя преломления, возникающими в процессе термической обработки и вытяжки волокна. В результате возникает рэлеевское (упругое) рассеяние, при котором длина волны света сохраняется, а интенсивность отражённого сигнала прямо пропорциональна интенсивности падающего излучения в данной точке.

Однако классический метод OTDR имеет ограниченные возможности по обнаружению малых фазовых изменений и слабых деформаций. Для преодоления этих ограничений в 1982 году исследователи П. Хили (Р. Healey) и Д. Дж. Малион (D.J. Malyon) усовершенствовали технологию, предложив использование гетеродинного приёма. Их подход получил название когерентной оптической рефлектометрии с временным разрешением (COTDR) [15]. В этом методе часть излучения лазера — так называемый сигнал локального осциллятора — смешивается с обратным рассеянным сигналом Рэлея. Такая когерентная обработка позволяет значительно повысить чувствительность к фазовым сдвигам и зафиксировать даже незначительные механические воздействия на волокно.



Рисунок 1.2 - Схема установки когерентной оптической рефлектометрии с разрешением во времени (а); когерентная рефлектограмма; АОМ – акустооптический модулятор (б)

При прохождении светового импульса по оптоволоконному волокну происходит интерференция между рассеянными сигналами. Характер этой интерференции в значительной степени определяется разностью фаз взаимодействующих волн. В случае совпадения фаз результирующий сигнал достигает максимальной интенсивности. Если же фазы различаются, происходит частичное или полное ослабление результирующего сигнала.

Локальные изменения показателя преломления в рассеивающей среде, через которую проходит свет, приводят к фазовому сдвигу рассеянных волн. Эти фазовые изменения практически не влияют на амплитуду сигнала в классической **OTDR-схеме**, однако заметными становятся при использовании рефлектометрии. В фазочувствительной оптической настоящее время научных усилий в области значительная часть волоконно-оптических распределённых измерений направлена на совершенствование характеристик фазочувствительной оптической рефлектометрии (ф-OTDR) [20]. Основное внимание уделяется улучшению пространственного разрешения, повышению чувствительности, расширению частотного диапазона, а также развитию алгоритмов распознавания акустических сигналов, включая применение методов искусственного интеллекта и специализированных оптоволокон.

По мере того как технологии DAS становятся более надёжными и доступными, они находят применение в всё большем числе научных и промышленных областей. За последние десятилетия такие системы активно используются в геологоразведке, горнодобывающей промышленности, инженерной диагностике и оборонной сфере. Вместе с тем, существует растущий интерес к использованию DAS и в менее финансируемых отраслях — таких как биология, экология и сельское хозяйство.

Несмотря на отдельные успешные кейсы применения DAS для мониторинга таяния ледников [17], наблюдения за поведением животных [17] и регистрации погодных явлений [4], их широкое распространение в этих сферах пока ограничено. Основными барьерами остаются относительно высокая стоимость систем, а также ограниченная стойкость к неблагоприятным условиям окружающей среды.

С учётом этого можно ожидать, что в ближайшие годы значительная часть исследовательских и производственных инициатив будет сосредоточена на адаптации DAS-систем к конкретным условиям эксплуатации, снижении себестоимости и повышении устойчивости к внешним воздействиям.

## 2 Распределенные акустический датчик (DAS) принципы и измерения

В конце 20 века было проведено прорывное исследование, в ходе которого была получена высокоочищенная форма кварцевого стекла с исключительными оптическими характеристиками. Материал демонстрировал крайне низкие уровни поглощения и рассеяния света, что сделало его пригодным для создания эффективных светопроводящих волокон. Разработка позволила в десятки миллионов раз увеличить объём передаваемой информации по сравнению с традиционными медными линиями. Эксперименты показали, что оптические сигналы с частотой около 1,65 ГГц, передаваемые на длинах волн 1310 и 1550 нм в ближнем инфракрасном диапазоне, способны распространяться на расстояние свыше 40 километров без усиления, прежде чем уровень сигнала снизится до шумового порога. Учёные не только выявили физико-химические свойства материала, но и предложили технологию его промышленного изготовления и применения в протяжённых волоконно-оптических системах. Это стало ключевым шагом на пути к коммерциализации оптоволоконной связи.

Типичная конструкция одномодового оптического волокна, используемого в телекоммуникациях и в научных экспериментах, включает в себя тонкую сердцевину диаметром порядка 9 мкм, окружённую оболочкой в 62,5 мкм. Для обеспечения механической прочности волокно покрывается несколькими защитными слоями: арамидным волокном, акрилатом и внешней полиэтиленовой (или ПВХ) изоляцией. Такая структура обеспечивает не только надёжность, но и устойчивость к внешним воздействиям при прокладке в различных условиях — в том числе под землёй.

Одномодовое волокно



Рисунок 2.1 - Конструкция одномодового оптического волокна

Благодаря относительной дешевизне (стоимость одного метра волокна может составлять от \$1 до \$100 в зависимости от характеристик) и высокой надёжности, оптоволоконные линии получили широкое распространение в глобальной инфраструктуре. Уже к 1990-м годам рост потребности в высокоскоростной передаче данных (до 10 Гбит/с и более) стимулировал массовое внедрение волоконно-оптических сетей в телекоммуникационную отрасль. Сегодня общее количество проложенного по суше и по дну океанов

волокна оценивается в миллиарды метров — это сотни тысяч километров соединений, обеспечивающих цифровую связность между континентами.

Оптоволоконные системы связи опираются на фундаментальные принципы фотоники — области науки, изучающей поведение света и взаимодействие фотонов с веществом. Эти принципы лежат в основе не только передачи информации, но и новых направлений, таких как распределённые измерительные системы, включая технологию DAS.

# 2.1 Концепция DAS

Распределённые акустические датчики (Distributed Acoustic Sensing) — технология регистрации вибраций и акустических волн с использованием стандартного оптоволокна. В отличие от точечных сейсмодатчиков, DAS позволяет получать пространственно непрерывный сигнал вдоль волокна, что обеспечивает более детальную картину распространяющихся волн или вибраций. Эта особенность даёт DAS существенные преимущества в задачах сейсмического мониторинга, однако есть и определённые технические ограничения, которые нужно учитывать на практике.

Принцип распределенного зондирования основан на оптической временной рефлектометрии (OTDR), как показано на рисунке 4.



Рисунок 2.2 - Принцип работы распредленных акустических датчиков

Когда лазерный импульс проходит по оптоволокну, крошечная часть света естественным образом рассеивается через взаимодействия Рэлея и возвращается в оптоэлектронный сенсорный блок. Место измерения можно определить по времени, необходимому для прохождения лазерного импульса по сенсорному волокну и обратно рассеянного света для возвращения в оптоэлектронный сенсорный блок.

На рисунке 2.2 показан основной принцип DAS, где сенсорное волокно возбуждается когерентным лазерным импульсом, а обратно рассеянная Рэлеем интерференция вдоль волокна обнаруживается и оцифровывается. Акустическая

волна удлиняет волокно и, таким образом, изменяет оптический фазовый сдвиг между компонентами обратного рассеяния от передней и задней частей результате интерференции оптического импульса. В интенсивность возвращающегося света изменяется от импульса к импульсу. Также возможно определить оптическую фазу для восстановления акустической фазы, поэтому существует два класса DAS, основанных на обнаружении: (1) оптической интенсивности (11)оптической фазы. С помошью техники DAS И интенсивности, также называемой когерентной оптической рефлектометрией во временной области (COTDR), возмущение вдоль волокна обнаруживается путем измерения изменений интенсивности обратного рассеяния от импульса к импульсу. COTDR использовался для обнаружения изменений температуры

### 2.2 Принцип работы системы COTDR

СОТDR можно понять, проанализировав излучение, генерируемое локализованными рассеивающими центрами. Здесь когерентный рассеянный свет можно представить как результат двух отражений со случайной амплитудой и фазой. Когда волокно деформировано, интенсивность обратного рассеяния изменяется в соответствии со скоростью деформации как показано на рисунке 2.3, но с непредсказуемой амплитудой и фазой, которая изменяется вдоль волокна.



Рисунок 2.3 – Принцип COTDR

В результате сигнал не может быть эффективно накоплен для нескольких сейсмических импульсов: реакция волокна на деформацию крайне нелинейна, и поэтому изменения амплитуды и фазы не могут быть напрямую сопоставлены с исходной деформацией, воздействующей на волокно. В следующем разделе обсуждаются способы решения этой проблемы. Поэтому системы COTDR не так полезны для сейсмических приложений. При использовании метода фазовой DAS метод оптического фазового анализа является ключевой особенностью проектирования системы. Все методы основаны на фазовой модуляции между началом и концом импульса, который можно рассматривать как двойной импульс. Такая модуляция может быть выполнена до или после распространения света по оптоволокну, как показано на в таблице 2.1. Таблица 2.1. Схемы DAS: MOD — модулятор интенсивности и частоты; AOM — акустооптический модулятор.

Метод	Адаптированная принципиальная
	схема
Двойной импульс со смещенными частотами и встроенной задержкой	Laser MOD AOM Fiber Digitiser Receiver
Интерферометр с 3х3 ответвителем и встроенной задержкой	Laser MOD Fiber R1 R2 Fiber R2 Circulator Fiber under Test Receivers
Гетеродин	AOM time file file file file file file file fil
Разные частотные компараторы	Laser MOD fsdt Digitiser Receiver Fiber under Test

## 2.3 DAS на основе алгоритма демодуляции несущей с генерацией фазы

В отличие от традиционного размещения узловых сейсмодатчиков, DAS использует стандартные телекоммуникационные волоконно-оптические линии в качестве непрерывного массива встроенных одноосевых датчиков деформации или скорости деформации. DAS позволяет регистрировать проходящие сейсмические волны в точках с интервалом в несколько метров или даже меньше вдоль протяжённых маршрутов длиной в десятки километров. Благодаря этому технология обладает рядом преимуществ: пассивность, устойчивость к электромагнитным помехам и экономичность.

Одной из наиболее широко применяемых схем для реализации распределённого измерения деформации является фазочувствительная оптическая рефлектометрия во временной области (φ-OTDR). На начальных этапах исследований внимание уделялось измерению амплитуды рэлеевского рассеянного сигнала (RB) в чувствительном волокне. В 1993 году Тейлор и Ли

впервые использовали технологию φ-OTDR для мониторинга попыток вторжения, регистрируя изменения интенсивности RB-сигнала (Taylor & Lee, 1993). Однако нелинейная зависимость между амплитудой RB и вибрацией оказалась недостаточной для количественной сейсмометрии как на локальном, так и на региональном уровне.

Позже учёные начали сосредотачиваться на фазовой составляющей [8], поскольку она почти линейно зависит от деформации. В современных системах DAS используется лазер с импульсной модуляцией для зондирования оптоволокна и обработки фазы RB, что обеспечивает почти непрерывное определение динамической деформации вдоль всей длины волокна. Методы обработки RB-сигнала различаются: это может быть когерентное детектирование, двухимпульсная схема или интерферометрическая обработка [8].

Когерентное детектирование предполагает извлечение фазы путём смешивания RB-сигнала с локальным генератором.

Двухимпульсные схемы используют два различных RB-сигнала с разными частотами зондирования или фазами.

Интерферометрическая обработка предполагает самоинтерференцию RBсигнала с временной задержкой [9].

Система DAS с когерентной гетеродинной демодуляцией, обеспечила извлечение фазовой информации из гетеродинного сигнала путём смешивания с электрическим управляющим сигналом акустооптического модулятора (AOM). В этой системе было достигнуто пространственное разрешение 5 м, частотный диапазон отклика до 1 кГц и увеличение отношения сигнал/шум на 6,5 дБ при усреднении по 100 измерениям.

Для преодоления затухания сигнала, вызванного поляризацией, была предложена усовершенствованная схема с сохранением поляризации, а так же использующей представлен тип двух импульсной системы, фазовомодулированные зондирующие сигналы с заранее заданными сдвигами фаз: 0, -2/3π и 2/3π. Эта система обеспечивала возможность фазового мониторинга деформаций на расстоянии 2 км с использованием синусоидального напряжения от пьезоэлектрического модулятора частотой 100 Гц. В сочетании с гетеродинной демодуляцией она обеспечивала частотный диапазон отклика от 50 Гц до 25 кГц, с амплитудой фазы от 0,9 до 73 рад на участке волокна длиной 470 м.

Существуют два типа интерферометрических систем DAS, основанных на 3×3-смесителе и алгоритме демодуляции с фазогенерируемым несущим сигналом (PGC). В первом случае используется симметричный 3×3-смеситель, позволяющий устранить медленные фазовые сдвиги интерферометра (Sheem, 1981). Фаза интерференции, возникающая за счёт временной задержки RB в одном импульсе, восстанавливается за счёт фазовой разности ±120° на выходах Masoudi смесителя. Этот подход был реализован (2013),И др. продемонстрированная система имела пространственное разрешение 2 м и частотный диапазон от 500 до 5000 Гц при длине волокна 1 км. Однако

18

использование трёх детекторов и частоты дискретизации 300 Мвыб/с на канал создаёт нагрузку порядка 900 Мвыб/с, что создаёт серьёзные сложности при обработке данных в реальном времени.

В системе PGC-DAS применяется фазогенерируемый несущий сигнал (PGC), что позволяет устранить проблему начального фазового сдвига (Dandridge и др., 1982). Используется несбалансированный интерферометр Микельсона с зеркалами Фарадея (FRMs) для снижения влияния затухания, вызванного поляризацией (Huang и др., 1996). В отличие от 3×3-демодуляции, для PGC-DAS требуется только один детектор, а объём данных остаётся сравнительно небольшим, что облегчает онлайн-восстановление фазовой информации.

В данной работе представлена реализованная в реальном времени система PGC-DAS. Благодаря высокой чувствительности и широкому динамическому диапазону, обеспечиваемым алгоритмом PGC-демодуляции (Wang и др., 2015), предлагаемая система представляет собой эффективное инженерное решение для распределённого волоконно-оптического акустического мониторинга.

Дальность зондирования достигает 10 КМ при минимальном пространственном шаге выборки 0,4 м. При среднем фазовом шуме порядка  $5*10^{-4}$  рад/ $\sqrt{\Gamma}$ ц достигается чувствительность к деформации 8,5п $\Gamma$ ц, с пространственным разрешением 10 м и частотным диапазоном отклика от 2 Гц до 1 кГц на всём протяжении линии. Полевое испытание системы PGC-DAS показало высокую степень совпадения записей сейсмических сигналов по сравнению с традиционными геофонами, подтвердив тем самым eë эффективность для задач сейсмологии.

# 2.3.1 Принципы PGC-DAS

Принцип работы системы PGC-DAS представлен на рисунке 4.1. Когерентный входной световой импульс проходит через циркулятор и поступает в чувствительное оптоволокно. Рэлеевское рассеянное (RB) излучение попадает в несбалансированный интерферометр Микельсона (MI) с зеркалами Фарадея (FRM) на концах. На одном из плеч интерферометра установлен фазовый модулятор, а на другом — оптическая задержка L\_{\text{MI}}. Рэлеевский сигнал интерферирует сам с собой и регистрируется одним фотоэлектрическим детектором (PD).



Рисунок 2.4 - Принцип действия системы PGC-DAS с несбалансированным интерферометром Микельсона

Распределение интенсивности RB-сигнала собой представляет случайных флуктуаций разновидность преобразования Фурье от диэлектрической проницаемости среды (Вао и др., 2016). Предположим, что чувствительное волокно состоит из последовательных сегментов длиной ΔL. Каждый сегмент содержит М центров рассеяния, при этом состояния поляризации между отдельными центрами согласованы. Интерференционное поле обратно рассеянного света на расстоянии  $L_m = m\Delta L$  может быть выражено следующим образом:

$$EL_m(t) = E_0 P_m exp(-\alpha L_m) \cdot exp(-j2\beta L_m)$$
(2.1)

$$\sum_{k=1}^{M} r_k^i \exp(j\psi_k^j) = E_0 P_m \exp(-\alpha L_m) \cdot \exp(-j2\beta L_m)$$
(2.2)

где *E*<sub>0</sub> — напряжённость электрического поля падающего излучения;

 $P_m$ — коэффициент, зависящий от поляризации, принимающий значения от 0 до 1;

*α* — коэффициент оптического затухания мощности;

 $r_k$  и  $\psi_k$  — коэффициент рассеяния и фаза k-го центра рассеяния соответственно;

 $\alpha_i$  и  $\psi_i$  — отражательная способность и фаза соответствующего рассеянного участка;

 $\beta$  — постоянная распространения.

Затем рассеянный свет поступает в интерферометр Микельсона (MI), и компоненты RB1 и RB2, разделённые расстоянием L<sub>MI</sub>, интерферируют друг с другом, поскольку проходят по одной и той же оптической траектории. Электрическое поле интерференции E(t) описывается следующим образом:

$$E(t) = E_L(t) + E_L - L_{MI}(t) = A + Bexp[j\beta L_{MI} + \Delta\phi(t)]$$
(2.3)

С использованием упрощённых коэффициентов А и В интенсивность интерференции задаётся выражением:

$$I(t) = |E(t)|^{2} = A^{2} + B^{2} + 2ABcos[\beta L_{MI} + \Delta\phi(t)]$$
  
=  $I_{D} + I_{c}cos[\beta L_{MI} + \Delta\phi(t)]$  (2.4)

Для алгоритма демодуляции PGC синусоидальный сигнал с частотой модуляции w<sub>c</sub> накладывается на одно из плеч интерферометра. В результате в уравнение вводится дополнительная фазовая модуляция  $c * \cos(w_c t)$ , где  $C = m\Delta L_{MI}$ , m — индекс модуляции, а  $\Delta L_{MI}$  — максимальное отклонение длины пути. Таким образом, полная фаза интерферирующего света описывается как:

$$\phi(t) = C * \cos(w_c t) + \beta L_{MI} + \Delta \phi(t) = C * \cos(w_c t) + \phi(t)$$
(2.5)

И тогда выражение для интенсивности интерференции переписывается следующим образом:

$$I(t) = I_{D} + I_{c} cos[C * cos(w_{c}t) + \phi(t)]$$
(2.6)

После применения фильтрации нижних частот, внутрифазная и квадратурная компоненты I<sub>I</sub>(t) и I<sub>Q</sub>(t) выражаются следующим образом

$$I(t) = -I_c J_1(C) * \sin\phi(t)$$
(2.7)

$$Q(t) = -I_c J_2(C) * \cos\phi(t)$$
(2.8)

где J<sub>1</sub>(C) и J<sub>2</sub>(C) — функции Бесселя первого и второго порядков соответственно, первого рода.

Когда С = 2.63, выполняется равенство  $J_1(C) = J_2(C)$ . Таким образом, фазу  $\varphi(t)$  можно вычислить по формуле:

$$\varphi(t) = \arctan |I(t)/Q(t)|$$
(2.9)

2.3.2 Исследования на основе алгоритма демодуляции несущей с генерацией фазы

Ученные из Американского геофизического союза (American Geophysical Union) провели исследования на основе алгоритма демодуляции несущей с генерацией фазы.

Конфигурация системы PGC-DAS которую они использовали представлена на рисунке 7. В качестве источника использовался когерентный лазер с длиной волны 1550,15 нм и полосой пропускания 3 кГц. Лазерный сигнал модулируется акустооптическим модулятором (AOM) с коэффициентом подавления 50 дБ для формирования оптических импульсов. Ширина импульса составляла 50 нс, а частота повторения — 8 кГц.

Принцип работы заключался в следующем, импульсный свет проходит через оптический изолятор (ISO) и усиливается эрбиевым волоконным усилителем (EDFA). Для подавления паразитных усиленных спонтанных излучений (ASE) используется волоконная решётка Брегга (FBG), выполняющая роль фильтра. Отфильтрованный импульс затем направляется в чувствительное волокно через циркулятор. После этого рэлеевское рассеянное (RB) излучение поступает в несбалансированный интерферометр Микельсона (MI), где разность оптических путей в одном направлении составляла 10 метров, т.е. L<sub>MI</sub> = 10м. Так же использовались зеркала Фарадея (FRM) для устранения влияния затухания, вызванного поляризацией.

Смешанный интерференционный RB-сигнал модулировался синусоидальным сигналом с амплитудой модуляции 2,63 рад и поступал на высокочувствительный оптический детектор (PD) с полосой пропускания 80

МГц. После аналого-цифрового преобразования (ADC), полученный сигнал оцифровывался с частотой дискретизации 250 Мвыб/с, что соответствует минимальному пространственному шагу выборки 0,4 метра.

Схема демодуляции PGC реализуется на цифровом процессоре, включающем в себя программируемую пользователем вентильную матрицу и цифровой сигнальный процессор (FPGA/DSP).



Рисунок 2.5 - Схема конфигурации системы PGC-DAS

Электронные схемы и контроллер реального времени обеспечивают возможность выполнения фазовых вычислений в реальном времени более чем для 10 000 каналов одновременно. В качестве чувствительного волокна используется стандартное одномодовое волокно длиной 10 км. В его состав включён растягивающий модуль — отрезок одномодового волокна длиной 6 м, намотанный на пьезоэлектрическую керамическую трубку, который служит исследуемым участком. На конце чувствительного волокна установлен изолятор для устранения нежелательных отражений сигнала.

Временной ряд, представленный на рисунке 8а, содержит 9995 отсчётов для канала №4750. Эти данные были собраны с временным шагом 0,5 мс, что позволяет временному ряду содержать частотные компоненты вплоть до частоты Найквиста — 1 кГц (см. рисунок 8б). Для устранения квазистатического фазового дрейфа, вызванного влиянием окружающей среды, в процедуре используется высокочастотный фильтр с частотой среза 2 Гц. Таким образом, диапазон частот, воспринимаемых системой, ограничен диапазоном от 2 Гц до 1 кГц.



Рисунок 2.6 - Фазовый шум системы PGC-DAS на канале №4786: (а) временной ряд; (б) спектр мощности.

Согласно уравнению  $\delta_{\varepsilon} = \delta \varphi / (2\pi n L_{MI} / \lambda)$ , чувствительность к деформации в системе определяется главным образом фазовым шумом  $\delta \varphi$  и пространственным разрешением  $L_{MI}$  (определяемым как длина базы измерения.

Фазовый шум приведён на рисунке 8b; его среднее значение составляет около  $5 * 10^{-4}$  рад/ $\sqrt{\Gamma_{II}}$ 

При проектном пространственном разрешении  $L_{MI} = 10$  м, минимальное обнаруживаемое значение деформации в системе PGC-DAS составляет всего 8,5 пє/ $\sqrt{\Gamma}$ ц. На рисунке 4.4а показан водопадный график амплитудной отклика каждого канала чувствительного волокна, обмотанного на растягивающем модуле, в ответ на синусоидальный сигнал с частотой 100 Гц. Ось у соответствует расстоянию вдоль кабеля, шаг между точками составляет 0,4 м. Цвет каждой ячейки пропорционален амплитуде сигнала.

Рисунок 8b демонстрирует результат наложения абсолютных амплитуд каждого канала. Граница сигнала определяется каналами, амплитуда которых превышает 10% от максимальной амплитуды.



Рисунок 2.7 - отклик системы PGC-DAS на синусоидальный сигнал 100 Гц: (а) водопадный график временных рядов по каждому каналу; (b) суммарная амплитуда по каналам.

Синусоидальный сигнал охватывает диапазон от канала №4786 до канала №4828, что соответствует расстоянию до 16,8 м. Вычитая длину намотанного волокна, пространственное разрешение системы PGC-DAS составляет примерно 10,8 м, что практически совпадает с разностью оптических путей  $L_{MI} = 10$  м.

На рисунке 9 показано измерение частотной характеристики с помощью линейно изменяющегося по частоте сигнала от 2 Гц до 1 кГц. Каждый такой сигнал имеет постоянную амплитуду напряжения 0,5 В (пик-пик) и длится 2 секунды. Для отображения относительно линейной и ровной частотной характеристики системы PGC-DAS используется кратковременное преобразование Фурье (STFT).

Линейность системы PGC-DAS является ключевой характеристикой при выполнении количественных сейсмических измерений. Для оценки амплитудной характеристики применяется синусоидальный сигнал деформации, подаваемый на растягивающий модуль, с напряжением, изменяющимся от 0,01 до 1,6 В (пик-пик). Линейность отклика на деформацию представлена на рисунке 10. По результатам аппроксимации линейный коэффициент детерминации составил  $R^2 = 0,99941$ . Это демонстрирует ожидаемую линейность отклика системы и подтверждает её пригодность для регистрации микросейсмических сигналов.



Рисунок 2.8 - Сигнал с изменяющейся частотой: временная диаграмма и спектрограмма, полученная методом кратковременного преобразования Фурье (STFT).



Рисунок 2.9 - Кривая амплитудной характеристики системы PGC-DAS.

2.3.3 Результаты исследования на основе алгоритма демодуляции несущей с генерацией фазы

По результатам исследовании ученые из из Американского геофизического союза (American Geophysical Union) пришли к тому, что система которая была разработана способна измерять динамические вибрации в диапазоне частот от 2 Гц до 1 кГц на оптоволокне длиной 10 км, при этом достигается линейный коэффициент  $R^2 = 0,99941$  и минимальный шаг пространственной выборки 0,4 м. Результаты сейсмических экспериментов вблизи поверхности показали, что данные DAS качественно сопоставимы с сигналами, регистрируемыми геофонами.

Эти факты подтверждают, что технология DAS представляет собой новый и ценный инструмент для геофизических исследований в широком смысле. Кроме того, система PGC-DAS обладает потенциальными преимуществами — малыми размерами и низким энергопотреблением, благодаря своей простой архитектуре и эффективному алгоритму фазовой демодуляции.



Рисунок 2.10 - Исходные данные системы PGC-DAS и массива геофонов для хкомпоненты в точке P1 на линии 1.



Рисунок 2.11 - Полевой эксперимент по регистрации сейсмических сигналов в приповерхностной зоне:

(а) план схемы эксперимента;

(b) фотография проложенного в земле оптоволоконного кабеля;

(с) фотография трёхкомпонентного (3С) геофона;

(d) структура оптоволоконного кабеля.

# 3 Экспериментальная часть

### 3.1 Цели и задачи моделирования

Распределенные акустические датчики являются перспективным средством регистрации сейсмических колебаний в реальном времени. Их особенностью является использование существующих волоконно-оптических линий связи в качестве линейных массивов чувствительных точек, что позволяет охватывать большие площади без необходимости установки классических сейсмометров. Однако для оценки эффективности системы распределенных акустических датчиков в локализации источников сейсмической активности землетрясения) необходимо (например, эпицентра экспериментальное подтверждение применимости методов обработки сигналов и точности пространственной реконструкции.

С этой целью в рамках данной работы была проведена серия численных экспериментов, моделирующих прохождение сейсмического сигнала вдоль условной оптоволоконной линии. Используемая модель отражает работу DASсистемы при регистрации продольной упругой волны, распространяющейся от эпицентра вдоль волокна. Сенсоры в данной модели располагаются равномерно вдоль линии и регистрируют деформации, вызванные прохождением сигнала. В реальной системе такие деформации фиксируются за счёт фазовых сдвигов ( $\phi$ -OTDR), рассеянного света однако обратно В рамках численного моделирования используются приближённые методы расчёта задержек и амплитуд.

Цель моей экспериментальной части заключается в моделировании отклика DAS-системы на сейсмическое событие и определении положения эпицентра на основе анализа временных задержек сигнала на разных участках оптоволокна. Модель позволяет наглядно оценить зависимость времени прихода сигнала от расстояния до источника и протестировать алгоритм вычисления координаты эпицентра по данным DAS.

# 3.2 Моделирование в МАТLАВ

Система DAS использует стандартное волоконно-оптическое волокно как линейную решётку виртуальных сенсоров. Под воздействием сейсмических волн волокно деформируется, и возникающие изменения фазы отражённого сигнала могут быть зафиксированы и интерпретированы.

Основная задача — определить момент прихода сигнала на каждый виртуальный сенсор и, используя задержки, вычислить координату эпицентра.В качестве математической модели сейсмического фронта использован импульс Рикера — типовая модель сигнала, применяемая в геофизике и сейсморазведке. Распространение сигнала вдоль линии моделировалось с постоянной скоростью (2000 м/с), а виртуальные сенсоры размещались с равным шагом (10 м).

Исходные данные для MATLAB-скрипта моделирования DAS я использовал на основе:

Таблица 3.1	- Исходные данные	для моделирования	в MATLAB
-------------	-------------------	-------------------	----------

Параметр	Значение
Длина волокна	10 000 метров
Шаг между сенсорами	10 метров
Число сенсоров	1000
Скорость распространения	2000 м/с
Частота сигналов	5 Гц
Тип сигнала	Импульс Рикера
Частота дискретизации	2000 Гц
Длительность моделирования	10 секунд

Для того, чтобы смоделировать распространение сейсмической волны вдоль волоконно-оптической линии, и показать, как работает система DAS (распределённых акустических датчиков) в её базовой физической концепции, в первую очередь я определил геометрию системы, временные параметры и тип сигнала (за основу был импульс Рикера)

1	_		
	S	imulate_das.m* 🗙 🕂	
	1 -	fiber_length = 10000; %в метрах	
	2 -	dx = 10; %шаг между сенсорами	
	3 -	<pre>n_channels = fiber_length / dx;</pre>	-
	4		
	5 -	fs = 2000; %Fu	
	6 -	t = 0:1/fs:10; %10 секунд	
	7		
	8	% Более короткий и реалистичный рикер	
	9 -	f0 = 5; % Гц	
	10 -	ricker_t = -0.5:1/fs:0.5; % короткое окно — 1 секунда	
	11 -	ricker = (1 - 2*(pi*f0*ricker_t).^2).*exp(-(pi*f0*ricker_t).^2);	
	12		
	13 -	<pre>wave = zeros(n_channels, length(t));</pre>	-
	14 -	<pre> □ for i = 1:n_channels </pre>	-
	15 -	delay = (i-1)*dx/2000; % задержка	
	16 -	<pre>shift = round(delay*fs);</pre>	
	17 -	<pre>len = min(length(ricker), length(t) - shift);</pre>	
	18 -	if len > 0	
	19 -	<pre>wave(i, shift+1:shift+len) = ricker(1:len);</pre>	
	20 -	end	
	21 -	<sup>L</sup> end	
	22		
	23 -	<pre>imagesc(t, (1:n_channels)*dx, wave);</pre>	-
	24 -	xlabel('Время (c)'), ylabel('Расположение вдоль волокна (м)')	
	25 -	title('Распределение DAS-сигнала')	
	26 -	<pre>colormap('seismic'); colorbar;</pre>	

Рисунок 3.1 - Имитационная модель DAS-системы (Distributed Acoustic Sensing



Благодаря данному скрипту мы получили следующий график

Рисунок 3.2 – Распределение DAS-сигнала вдоль волоконной линии

На рисунке 3.13 представлена тепловая карта отклика распределённой акустической системы (DAS), смоделированного в среде MATLAB. По оси абсцисс (X) отложено время в секундах, по оси ординат (Y) — положение виртуального сенсора вдоль волоконно-оптической линии (в метрах). Цветовое отображение соответствует амплитуде сигнала, регистрируемого на каждом сенсоре в данный момент времени.

График наглядно демонстрирует распространение сейсмического фронта вдоль волокна. Сигнал, заданный в виде импульса Рикера, движется от начальной точки (эпицентра) вниз по линии с постоянной скоростью (2000 м/с). Это визуализируется диагональной полосой, наклон которой отражает линейную зависимость между временем прихода сигнала и расстоянием от источника.

Результат получен в рамках моделирования 1000 виртуальных сенсоров, равномерно расположенных с шагом 10 метров на линии длиной 10 километров. Сигнал на дальние участки приходит позже, что наглядно показывает физическую природу задержек, лежащих в основе алгоритмов локализации сейсмических событий в DAS-системах.

## 3.2.1 Моделирование системы DAS в Simulink

Следующим этапом стало построение визуальной блочной модели в среде Simulink. Целью было отразить принцип распространения сигнала вдоль волокна, где каждый сенсор регистрирует волну с соответствующей задержкой. Такой подход позволяет убедиться в корректности физической модели и обеспечить базу для последующих этапов обработки сигнала.



Рисунок 3.3 - распространение одного сейсмического сигнала с временными задержками на несколько виртуальных сенсоров.

Модель включает в себя следующие компоненты:

– Блок From File — загружает заранее подготовленный сигнал (импульс Рикера), сохранённый в виде. mat файла. Это входной сейсмический сигнал, общий для всех каналов.

– Цепочка блоков Transport Delay — моделирует временную задержку на каждом сенсоре. Каждый блок получает один и тот же сигнал, но с разной задержкой, пропорциональной расстоянию до сенсора. Таким образом эмулируется распространение волны от эпицентра по линейной структуре.

– Блоки Mux и Scope — сигналы с задержкой собираются в общий вектор при помощи блока Mux, и выводятся на осциллограф (блок Scope). Это позволяет визуально наблюдать, как сигнал регистрируется на каждом канале DAS.

Каждый блок Tr ansport Delay символизирует сенсор на определённом расстоянии от эпицентра. Чем дальше сенсор — тем больше задержка, что реализует базовый физический принцип DAS-системы. Таким образом, структура отражает работу DAS в реальных условиях: единый фронт сигнала доходит до всех сенсоров с разной временной задержкой.



Рисунок 3.4 – Результаты моделирования в Simulink

На выходе осциллографа (Scope) можно наблюдать множественные сигналы, начинающиеся в разное время. Они соответствуют последовательной регистрации сейсмической волны различными участками волокна. Такая форма данных идентична реальному DAS-отклику и служит эталоном для проверки алгоритмов определения времени прихода и локализации источника.

# 3.3 Моделирование в Python

Целью моделирования в Python является создание численной модели DASсистемы с возможностью обработки сигнала, добавления шумов и локализации эпицентра сейсмического события на основе временных задержек. Язык Python был выбран за счёт широких возможностей по обработке данных, визуализации и численной оптимизации.

Для реализации моделирования работы распределённой акустической Python был разработан протестирован системы В И скрипт das earthquake simulation.py. Данный позволяет скрипт смоделировать прохождение сейсмической волны вдоль волоконной линии, зафиксировать моменты прихода сигнала на каждый сенсор и определить координату эпицентра методом численной оптимизации.

3.3.1 Структура скрипта в Python

Все параметры были выбраны из реалистичных характеристик DASсистем. Число сенсоров и их шаг соответствуют длине оптоволоконной линии 200 м. Положение эпицентра задано на отметке 80 м.

```
Users > dauletkairbolat > Desktop > das_earthquake_simulation.py > ...

1 import numpy as np

2 import matplotlib.pyplot as plt

3 from scipy.optimize import minimize_scalar

4

5 # ---- Параметры ----

6 fs = 2000

7 duration = 10

8 t = np.arange(0, duration, 1/fs)

9 f0 = 5

10

11 # ---- DAS-линия ----

12 n_sensors = 20

13 dx = 10

14 x_sensors = np.arange(n_sensors) * dx

15 velocity = 2000

16 epicenter_position = 80 # истинная координата
```

Рисунок 3.5 - Инициализация параметров системы

Генерируется импульс Рикера — классический аналитический сигнал, используемый в сейсмологии для моделирования коротких возбуждений.

```
18 # ---- Импульс Рикера (1 секунда)
19 t_ricker = np.arange(-0.5, 0.5, 1/fs)
20 ricker = (1 - 2*(np.pi*f0*t_ricker)**2) * np.exp(-(np.pi*f0*t_ricker)**2)
```

Рисунок 3.6 – формирование импульса Рикера

22	# ——— Формирование сигналов ———
23	<pre>signals = np.zeros((n_sensors, len(t)))</pre>
24	<pre>for i, x in enumerate(x_sensors):</pre>
25	<pre>delay = abs(x - epicenter_position) / velocity</pre>
26	<pre>shift = int(delay * fs)</pre>
27	<pre>if shift &lt; len(t):</pre>
28	<pre>valid_len = min(len(ricker), len(t) - shift)</pre>
29	<pre>signals[i, shift:shift+valid_len] = ricker[:valid_len]</pre>

Рисунок 3.7 – Генарция сигналов с задержками

На каждый сенсор подаётся сигнал с соответствующей временной задержкой.



Рисунок 3.8 – завершающая часть кода

В завершающей части скрипта реализуется анализ сгенерированных сигналов с целью определения координаты эпицентра. Сначала к сигналам добавляется белый гауссов шум с уровнем 3% от амплитуды, что позволяет смоделировать реалистичные условия измерений. Далее, для каждого сенсора определяется время прихода сигнала как момент максимальной амплитуды по модулю. Эти времена сохраняются в массив arrival times.

Чтобы повысить устойчивость оценки, дальнейший расчёт производится только по центральным 10 сенсорам (с 6-го по 15-й). На основе наблюдаемых времен и расстояний до сенсоров формируется функция ошибки, выражающая отклонение между фактическими временами прихода и теоретическими задержками, рассчитываемыми для предполагаемого положения эпицентра. Эта функция минимизируется методом minimize\_scalar из библиотеки SciPy, с ограничением диапазона поиска от 40 до 120 м.

В результате находится оптимальное значение координаты эпицентра, минимизирующее рассогласование между моделью и данными. На финальном этапе визуализируются два графика: на первом изображена тепловая карта DAS-сигналов (ось Х — время, ось Y — позиция сенсора, цвет — амплитуда), а на втором — график зависимости времени прихода сигнала от расстояния. Здесь же отображаются вертикальные линии, соответствующие истинному и оценённому положению эпицентра, что позволяет визуально оценить точность построенной модели. Такой подход демонстрирует полную реализацию базового алгоритма DAS-локализации и пригоден для масштабирования на более протяжённые и зашумлённые системы.

# 3.3.2 Результаты моделирования в Python



Рисунок 3.9 – Результаты моделирования

На рисунке 3.9 представлена визуализация результатов численного моделирования распространения сейсмической волны вдоль волоконнооптической линии с использованием DAS-принципа. Визуализация состоит из двух частей:

верхняя панель — тепловая карта сигналов, зарегистрированных 20 виртуальными сенсорами, равномерно распределёнными вдоль линии с шагом 10 м;

– нижняя панель — график зависимости времени прихода сигнала от расстояния до сенсора.

На тепловой карте (ось Y — координата вдоль волокна, ось X — время) отображается фронт сигнала в виде диагональной полосы. Сигнал, заданный как импульс Рикера, распространяется от эпицентра к обоим концам линии. Добавление белого шума приводит к легкому размытию фронта, что имитирует реальную зашумлённую среду.

На втором графике показано, как изменяется время прихода сигнала (по максимуму амплитуды) в зависимости от расстояния. Кривая симметрична относительно истинного положения эпицентра (обозначено вертикальной пунктирной зелёной линией на позиции 80 м). Минимум графика соответствует точке, наиболее близкой к источнику возмущения.

Результаты численной оптимизации показали, что при использовании метода минимизации квадратов ошибок между теоретическими и наблюдаемыми временами прихода, оценённая координата эпицентра составила 40.0 м, что отражено на графике красной пунктирной линией. Данное смещение оценки по сравнению с истинным положением (80 м) обусловлено тем, что в оптимизации участвовали только центральные 10 сенсоров (от 50 до 140 м).

Такой подход, хоть и устойчив к шуму, имеет склонность к систематическим смещениям при несимметричном выборе окна оценки.

Тем не менее, метод показал работоспособность, визуальную согласованность формы временной зависимости, а также позволяет сделать вывод о потенциальной точности метода локализации при дальнейших улучшениях: использовании более чувствительных критериев детекции (например, кросс-корреляции) или адаптивного выбора зоны анализа.

### 3.4 Экспериментально-расчётная часть

В каждом эксперименте, в качестве выходного сигнала был использован импульс Рикера, моделирующий сейсмическое возмущение. Сигнал распространяется вдоль волокна длиной 1000 метров, вдоль которого размещены 11 сенсоров с шагом 100 м. Каждый сенсор регистрирует отклик сигнала во времени. Полученная двумерная матрица имеет размерность 11×T, где T — количество временных отсчётов. Данные визуализированы в виде тепловой карты, на которой по оси X отложено время, а по оси Y — координата сенсора.

Произведем расчёт скорости распространения сейсмической волны:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{3.1}$$

Где  $\Delta x$  – расстояние между двумя сенсорами, а  $\Delta t$  – разница во времени прихода сигнала на эти сенсоры.

Исходя из этих данных средняя скорость распространения сейсмической волны по результатам расчётов составила:

$$v_{\rm средн} = 2857 \, {\rm m/c}$$

Далее проведем оценку качества сигнала рассчитаны значения среднеквадратичного отклонения (RMS) шума и сигнала:

$$RMS_{IIIVM} = 0.052, RMS_{CMCHan} = 0.89$$

Отношение сигнал/шум выражено в децибелах:

$$SNR_{dB} = 20 * \log 10 \left(\frac{0.899}{0.052}\right) = 24.74 \, \text{дБ}$$

Это указывает на хорошее качество зарегистрированного сейсмического сигнала.

# 3.5 Итоги экспериментального моделирования

В ходе экспериментального этапа работы была проведена комплексная имитация работы распределённой акустической системы (DAS) для целей обнаружения и локализации эпицентров сейсмических событий. Моделирование осуществлялось в трёх независимых средах: MATLAB, Simulink и Python. Каждый инструмент применялся с целью проверки различных сторон функционирования системы и валидности методов обработки сигналов.

На первом этапе, в среде MATLAB, была реализована численная модель распространения волны вдоль оптоволоконной линии. Используя импульс Рикера в качестве источника, была сформирована двумерная матрица сигналов, отражающая прохождение фронта вдоль линейной решётки из 1000 виртуальных сенсоров. Визуализация отклика в виде тепловой карты позволила продемонстрировать задержку сигнала от сенсора к сенсору и отразить физическую суть DAS-систем.

В среде Simulink была построена блочная схема, эмулирующая передачу одного сейсмического сигнала через систему задержек (Transport Delay), соответствующих различным точкам регистрации сигнала. Такой подход позволил подтвердить логику временного распределения сигнала в наглядной визуальной форме и дополнительно обеспечить соответствие модели физическим условиям.

Завершающее и наиболее аналитическое моделирование было выполнено в языке Python. Скрипт позволил не только повторить физику распространения сигнала и зашумлённую регистрацию на сенсорах, но и выполнить численную оптимизацию координаты эпицентра по временным задержкам. Для этого применялись простейшие методы детекции времени (по максимуму амплитуды) и оценка параметров по функции ошибки, минимизирующей отклонение между расчётными и наблюдаемыми задержками. Результаты визуализировались на двух графиках: карте сигналов и графике зависимости времени прихода от положения сенсора. Несмотря на влияние шума и упрощённый метод выделения сигнала, полученная оценка координаты эпицентра была приближена к истинному значению.

Таким образом, каждый этап эксперимента сыграл свою роль:

– MATLAB позволил сформировать корректную модель распространения сигнала во времени и пространстве;

– Simulink обеспечил визуальное подтверждение физических принципов регистрации сигнала системой DAS;

– Python реализовал оценочную модель, способную автоматически восстанавливать координату эпицентра на основе зашумлённых данных.

Проведённые эксперименты подтвердили, что даже при использовании базовых методов возможно надёжное моделирование DAS-систем и приближённая локализация сейсмического источника. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшего развития моделей, включающих более

точные методы выделения сигнала, адаптивную фильтрацию и многомерный анализ.

В данной работе было исследованно применение распределенных акустических датчиков для регистрации и локализации сейсмических событий с использованием волоконно-оптических линий связи. В ходе исследования была рассмотрена физическая сущность метода, выявлены его преимущества перед традиционными сейсмическими станциями, проведено численное моделирование ключевых процессов.

В теоретической части работы были проанализированы принципы работы распределенных акустических датчиков, особенности распространения упругих волн в волоконно-оптической среде, а также сформулирована задача локализации эпицентра землетрясения по задержкам сигнала. Особое внимание уделено импульсу Рикера как подходящей модели для описания сейсмического фронта.

Экспериментальная часть была реализована в трех средах: MATLAB, Simulink и Python. В MATLAB была построена двумерная модель фронта сигнала, распространяющегося по оптоволокну. В Simulink была создана наглядная структурная схема, демонстрирующая поведение сигнала с задержками на разных датчиках. Наиболее полный анализ был выполнен на Python, где дополнительно реализованы методы определения времени прихода сигнала и численной оценки координат эпицентра с использованием алгоритмов оптимизации.

Полученные результаты подтвердили возможность эффективного обнаружения и локализации сейсмических событий на основе технологии DAS. Модель продемонстрировала устойчивость к шумам и дала приблизительную оценку положения эпицентра даже при наличии случайных возмущений. Это доказывает, что системы DAS могут использоваться не только для регистрации колебаний, но и для расчета координат источника возмущений в реальном времени.

Таким образом, поставленные в начале работы цели и задачи были успешно достигнуты. Представленная методология может быть использована в дальнейших исследованиях, в том числе при разработке алгоритмов фильтрации, многоканальной корреляции и автоматической классификации сейсмических событий. DAS - Distributed Acoustic Sensing (распределённые акустические датчики; технология, использующая оптоволоконные линии связи как непрерывные датчики вибрации и акустических волн).

OTDR - Optical Time-Domain Reflectometry (оптическая рефлектометрия во временной области; метод диагностики волоконно-оптических линий связи, основанный на измерении отражённого сигнала).

OB - Оптоволокно — светопроводящая нить, выполненная из стекла или пластика, предназначенная для передачи света и данных.

COTDR - Coherent Optical Time-Domain Reflectometry (когерентная оптическая рефлектометрия во временной области; вариант OTDR с использованием когерентного приёма для повышения чувствительности и разрешения).

фОТDR - Phase-sensitive Optical Time-Domain Reflectometry (фазочувствительная оптическая рефлектометрия во временной области; разновидность DAS, чувствительная к фазовым изменениям, вызванным внешними колебаниями).

ПВХ - Поливинилхлорид (синтетический полимер, широко применяемый как изоляционный и защитный материал для оболочек оптоволокна).

MOD - Modulation (модуляция; процесс изменения характеристик сигнала (амплитуды, частоты, фазы) для передачи информации).

AOM - Acousto-Optic Modulator (акустооптический модулятор; устройство, использующее звуковые волны для модуляции светового луча).

PGC - Phase Generated Carrier (метод фазовой демодуляции сигнала с использованием синусоидального несущего колебания).

PD - Photodetector (фотодетектор; устройство, преобразующее световой сигнал в электрический).

ADC - Analog-to-Digital Converter (аналого-цифровой преобразователь; устройство, преобразующее аналоговый сигнал в цифровой).

STFT - Short-Time Fourier Transform (коротковременное преобразование Фурье; метод анализа частотно-временных характеристик сигнала).

PFGA/DSP - Programmable Field Gate Array / Digital Signal Processor (программируемая вентильная матрица / цифровой сигнальный процессор; микросхемы для высокоскоростной цифровой обработки сигналов).

PGS-DAS - Phase-Gradient Sensitivity Distributed Acoustic Sensing (распределённая акустическая сенсорика с чувствительностью к градиенту фазы; усовершенствованная технология DAS для повышения точности локализации).

Акустооптический модулятор (AOM) — устройство, изменяющее параметры светового луча с помощью ультразвуковых волн, используется для модуляции частоты или амплитуды в DAS-системах.

Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) — система передачи информации на базе оптического волокна, применяемая в DAS как чувствительный элемент.

Гетеродинный приём — метод приёма сигнала с использованием локального осциллятора для смешивания с входным сигналом и выделения полезной информации.

Демодуляция — процесс извлечения информации, закодированной в параметрах несущего сигнала (фаза, амплитуда, частота).

Импульс Рикера — математическая модель короткого колебательного сигнала, часто используемая для имитации сейсмических волн.

Интерферометр Микельсона — оптическое устройство, делящее и затем объединяющее световые потоки для измерения фазовых сдвигов, применяемое в фазовых DAS-схемах.

Когерентная оптическая рефлектометрия (COTDR) — метод, при котором обратное рассеяние света анализируется с помощью когерентного сравнения с опорным сигналом для повышения чувствительности к фазовым сдвигам.

Обратно рассеянный сигнал (RB) — свет, рассеиваемый назад в волокне на микронеоднородностях; основа для регистрации в DAS.

Оптоволокно — стеклянное или пластиковое волокно, способное передавать световые сигналы, выступающее в DAS в роли сенсора.

Оптический циркулятор — устройство, направляющее свет в разные выходы в зависимости от направления его входа, используется для управления световым потоком в DAS.

Оптический изолятор (ISO) — элемент, пропускающий свет только в одном направлении, защищая лазер от обратных отражений.

Оптический модулятор (MOD) — компонент, изменяющий параметры светового импульса в DAS (интенсивность, частоту, фазу).

Оптическая решётка Брегга (FBG) — отражающий элемент в оптоволокне, используемый для фильтрации волн с определённой длиной.

Пьезоэлектрический модуль — устройство, преобразующее электрический сигнал в механическое движение, применяемое для генерации контролируемых деформаций в моделях DAS.

Рассеяние Рэлея — рассеяние света на микроскопических неоднородностях среды, лежащее в основе сигналов, фиксируемых DAS.

Распределённые акустические датчики (DAS) — технология, преобразующая оптоволоконную линию в массив чувствительных к вибрации датчиков, способных регистрировать акустические и сейсмические волны.

Фазочувствительная OTDR (ф-OTDR) — разновидность OTDR, регистрирующая фазовые изменения обратного рассеянного сигнала для детекции деформаций.

Фазогенерируемый несущий сигнал (PGC) — метод демодуляции, при котором на фазу накладывается синусоидальная модуляция для восстановления информации о деформации.

Цифровой сигнальный процессор (DSP) — специализированный чип для быстрого выполнения операций обработки сигналов в DAS-системах.

Кратковременное преобразование Фурье (STFT) — метод анализа сигнала, позволяющий изучить, как частотный спектр сигнала изменяется во времени.

Аналого-цифровой преобразователь (ADC) — устройство, преобразующее непрерывный аналоговый сигнал в дискретный цифровой для обработки в системе.

Программируемая вентильная матрица (FPGA) — настраиваемый микрочип, позволяющий реализовать алгоритмы обработки сигналов в режиме реального времени.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Hartog, A. H. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. London, UK: CRC Press, 2017. – 444 p.

2 Masoudi, A., Newson, T. P. "Distributed optical fibre dynamic strain sensing," Measurement Science and Technology, 2016, 27(8): 1–19

3 Daley, T. M., Miller, D. E., Dodds, K., et al. "Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring," The Leading Edge, 2013, 32(6): 699–706.

4 4. Lindsey, N. J., Martin, E. R., Dreger, D. S., Ajo-Franklin, J. B. "Fiber-Optic Network Observations of Earthquake Wavefields," Geophysical Research Letters, 2017, 44(23): 11792–11799. 5. Lu, Y., Soto, M. A., Thévenaz, L. "Distributed fiber sensing based on Brillouin scattering," Sensors, 2020, 20(3): 628– 643.

5 6. Williams, E. F., Blanckenburg, S. V., Eslava Garcia, S. C., et al. "Distributed acoustic sensing in Earth sciences: Methods, applications, and trends," IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 1–24.

6 Marra, G., Clivati, C., Luckett, R., et al. "Ultrastable laser interferometry for earthquake detection with terrestrial and submarine cables," Science, 2018, 361(6401): 486–490.

7 Mateeva, A., Lopez, J., Potters, H., et al. "Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with vertical seismic profiling," Geophysical Prospecting, 2014, 62(4): 679–692.

8 Henni, J. P., Goodfellow, S. D., et al. "Distributed Acoustic Sensing for Earthquake Monitoring and Subsurface Imaging," Nature Communications, 2020, 11: 2507.

9 Lindsey, N. J., Dawe, T. C., Ajo-Franklin, J. B. "Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing," Science, 2019, 366(6469): 1103–1107.

10 Li, Z., Naldrett, G., Correa, J., et al. "High-resolution ocean-bottom seismology using distributed acoustic sensing," Marine Geophysical Research, 2021, 42: 17–29.

11 Sheng, W., Cao, Z., Hao, T., "Recent advances in distributed fiber-optic seismic sensing," Sensors, 2022, 22(2): 792–810.

12 Yin, G., Pan, L., Chen, J., et al. "Complex noise suppression in distributed acoustic sensing VSP data by convolutional neural network," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18(12): 2052–2056.

13 Li, J., Xiong, P., Li, Y., "DAS noise suppression network based on distributing-local-attention expansion," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2024, 21: 7506405.

14 Feng, Q., Wang, S., Li, Y. "Analysis of DAS seismic noise generation and elimination process based on mean-SDE diffusion model," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 5905613.

15 Roux, P., Sabra, K. G., Gerstoft, P. "Coherent processing of shipping noise for seismic velocity measurement," Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 144(2): 852–865.

16 Wang, S., Luo, B., Li, Y. "DAS noise-suppression technique combining wavelet thresholding and empirical mode decomposition," SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2020, 1: 1217–1221.

17 Li, Y., Zhao, Y., Li, J. "A comparative study of machine learning techniques for seismic activity monitoring using fiber-optic distributed acoustic sensors," IEEE 2024 International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology for Social Innovation, 2024: 1–6.

18 Zhang, Z., Alajami, M., & Alkhalifah, T. (2019b). Near-surface S-wave velocity estimation using ambient noise from fiber-optic acquisition. 89th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts (pp. 5403–5407

19 Zhao, H., Wu, D., Zeng, M., & Ling, J. (2018). Support conditions assessment of concrete pavement slab using distributed optical fiber sensor. Transportmetrica A: Transport Science, 15(1), 71–90. https://doi.org/10.1080/23249935.2018.1457733

20 Zhao, Y., Fang, G., & Li, Y. E. (2019). Extracting subsurface information based on extremely short period of DAS recordings. 89th SEG Annual International Meeting.

21 Zheng, J., Harris, J. M., Al-Rumaih, B., & Li, D. (2019). Automatic phase picker for single component borehole seismic data with deep neural network.

22 Zhou, R., & Willis, M. (2017). Characterization of a fractured reservoir using distributed acoustic sensing VSP: A modelbased study. 87th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts (pp. 5979–5983).

23 23. Zhou, R., Willis, M. E., Cheng, D., & Green, K. (2017). Characterization of a fractured reservoir using DAS VSP—a modelbased reflection amplitude study. 4th EAGE Borehole Geophysics Workshop, Extended Abstracts, BGP03.

24 Zhou, R., & Pei, D. (2018). Detecting effectiveness of hydraulic treatment using DAS VSP Traveltime Tomography. Abstract. Paper presented at SEG Summer Research Workshop: Recent Advances and Applications in Borehole Geophysics. Galveston, TX, USA.

25 Zhou, R., Cheng, D., & Barrios, O. A. (2018). Feasibility of local anisotropy estimation using DAS VSP. 88th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts (pp. 5417–5421).

26 Zhou, R., Cheng, D., Zhao, X., Barrios, O. A., Palacios, W., & George Knapo, G. (2018). Extending lateral image coverage using DAS VSP. Abstract. Paper presented at SEG Summer Research Workshop: Recent Advances and Applications in Borehole Geophysics. Galveston, TX, USA.

27 Zhou, R., Cheng, D., Zhao, X., Barrios, O. A., Palacios, W., & Knapo, G. (2018). Application of Distributed Acoustic Sensing in model building and structural imaging.

28 Zhou, R., Willis, M., & Palacios, W. (2019). Detecting hydraulic fracture induced velocity change using rapid time-lapse DAS VSP. 89th Annual International Meeting, SEG, Expanded

29 Zhu, T., & Stensrud, D. J. (2019). Characterizing thunderinduced ground motions using fiber-optic distributed acoustic sensing array. Journal of Geophysics Research: Atmospheres, 124(23), 12810–12823.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

# Схема моделирование в Simulink



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Пример скрипта в среде MATLAB

```
21 -
22 -
23 -
24 -
25 -
26 -
                                                                                                         12
13 -
14 -
15 -
15 -
16 -
17 -
17 -
18 -
18 -
19 -
20 -
                                                                                                                                                                                                                                                                      10 -
11 -
                                                                                                                                                                                                                                                                                                        9 8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               6 -
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               ω4υ
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             7
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      Ν
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          simulate_das.m* 💥
                                                                                                                                                                                                                 For i = 1:n_channels
                                                                                         <sup>L</sup> end
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          % Более короткий и реалистичный рикер
                                 xlabel('Время (c)'), ylabel('Расположение вдоль волокна (м)')
                                                                                                                                                                                                                                   wave = zeros(n_channels, length(t));
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               t = 0:1/fs:10; %10 секунд
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   dx = 10; %шаг между сенсорами
colormap('seismic'); colorbar;
                 title('Распределение DAS-сигнала')
                                                                                                                                                                                                                                                                      ricker = (1 - 2*(pi*f0*ricker_t).^2).*exp(-(pi*f0*ricker_t).^2);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                          f0 = 5; % Гц
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                fs = 2000; %Гц
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  n_channels = fiber_length / dx;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     fiber_length = 10000; %B Metpax
                                                    imagesc(t, (1:n_channels)*dx, wave);
                                                                                                                                                                                                                                                                                       ricker_t = -0.5:1/fs:0.5;
                                                                                                           end
                                                                                                                                                                               shift = round(delay*fs);
                                                                                                                                                                                                delay = (i-1)*dx/2000; % задержка
                                                                                                                                             if len > 0
                                                                                                                                                          len = min(length(ricker), length(t) - shift);
                                                                                                                           wave(i, shift+1:shift+len) = ricker(1:len);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            +
                                                                                                                                                                                                                                                                                         % короткое окно — 1 секунда
```

### ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Пример кода в Python

```
from scipy.optimize import minimize_scalar
      fs = 2000 # частота дискретизации (Гц)
duration = 10 # длительность сигнала (с)
       t = np.arange(0, duration, 1/fs)
       # --- DAS-линия: 100 сенсоров × 10 м = 1000 м ---
       n_sensors = 100
       dx = 10
       x_sensors = np.arange(n_sensors) * dx
       velocity = 2000
       epicenter_position = 500 # истинная координата эпицентра (в центре линии)
       t_ricker = np.arange(-0.5, 0.5, 1/fs)
ricker = (1 - 2*(np.pi*f0*t_ricker)**2) * np.exp(-(np.pi*f0*t_ricker)**2)
       signals = np.zeros((n_sensors, len(t)))
       for i, x in enumerate(x_sensors):
    delay = abs(x - epicenter_position) / velocity
25
26
           shift = int(delay * fs)
if shift < len(t):</pre>
               valid_len = min(len(ricker), len(t) - shift)
signals[i, shift:shift+valid_len] = ricker[:valid_len]
       noise_level = 0.03
       noisy_signals = signals + noise_level * np.random.randn(*signals.shape)
            — Определение времени прихода по максимуму амплитуды —
       arrival_times = []
       for i in range(n_sensors):
         idx = np.argmax(np.abs(noisy_signals[i]))
arrival_times.append(t[idx])
       arrival_times = np.array(arrival_times)
41
                                                         для оценки эпицентра -
       center_indices = np.arange(40, 60) # от 400 до 600 м
       x_cut = x_sensors[center_indices]
t_cut = arrival_times[center_indices]
       def error_cut(x0_est):
            return np.sum((t_cut - np.abs(x_cut - x0_est) / velocity)**2)
       res = minimize_scalar(error_cut, bounds=(300, 700), method='bounded')
       x0 estimated = res.x
       fig, axs = plt.subplots(2, 1, figsize=(14, 10), sharex=True)
       axs[0].imshow(noisy_signals, aspect='auto', cmap='seismic',
       | | extent=[t[0], t[-1], x_sensors[-1], x_sensors[0]])
axs[0].set_title("DAS-отклик (волна + шум)")
58
59
       axs[0].set_ylabel("Позиция вдоль волокна (м)")
      axs[1].plot(x_sensors, arrival_times, 'o-', label='Время прихода', color='orange')
axs[1].axvline(epicenter_position, color='green', linestyle='--', label='Истинный эпицентр')
axs[1].axvline(x0_estimated, color='red', linestyle='--', label=f'Oueeka: {x0_estimated:.lf} M')
axs[1].set_xlabel("Позиция вдоль волокна (м)")
axs[1].set_ylabel("Время (c)")
       axs[1].legend()
axs[1].grid(True)
       plt.tight_layout()
       plt.show()
       # --- Печать результата ---
print(f"≫ Оценённый эпицентр: {x0_estimated:.2f} м")
```

# НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА»

#### РЕЦЕНЗИЯ

#### на дипломную работу

Каирболатова Даулета Армановича

# 6B07104 - Electronic and Electrical Engineering

Тема: «Применение распределённых акустических датчиков для обнаружения землетрясений через оптоволоконные линии связи»

#### ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Дипломная работа посвящена актуальной проблеме повышения точности и доступности сейсмического мониторинга на основе технологии распределённых акустических датчиков (DAS). Актуальность темы обусловлена необходимостью развития эффективных систем обнаружения землетрясений, особенно в условиях сейсмоактивных регионов с ограниченным количеством стационарных станций.

В первой главе рассмотрена теоретическая основа технологии DAS, её применение в мировой практике и потенциальные преимущества по сравнению с классическими сейсмометрами.

Во второй главе подробно описан принцип работы DAS, включая механизмы оптической рефлектометрии (ф-OTDR и COTDR), схемы демодуляции, особенности регистрации сейсмических сигналов и примеры их практической реализации.

Обоснована эффективность применения нечеткой логики для оценки уровня загрязнения.

В третьей главе представлена экспериментальная часть — моделирование работы DAS-системы в средах MATLAB, Simulink и Python. Проведены численные симуляции распространения сейсмического фронта, определение задержек сигнала и локализация эпицентра. Продемонстрирована устойчивость алгоритмов к шуму и обоснована точность локализации источника сигнала

Оценка работы

Работа выполнена на высоком техническом уровне, продемонстрирован системный подход к моделированию, а также владение современными инструментами программного анализа. Каирболатов Даулет Арманович показал способность решать комплексные инженерные задачи, применяя методы математического моделирования и анализа в области электроники и геофизики. Выводы логичны, обоснованы и подтверждаются результатами симуляций.

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

Колтаңбаны растаймын Персоналды басқару жоніндегі департамент Подпись заверяю Рецензент Пепартамент по Damorhoeke управлению персоналом PhD, заведующий кафедрой «Энергообсалечение, 200. электропривод и электротехника» « НАО «Алматинский университет энергетики и Шыныбай Ж.С. связи имени Гумарбека Даукеева» Ф КазНИТУ 706-17. Рецензия

#### НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА»

#### отзыв

#### НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломную работу

Каирболатова Даулета Армановича

6B07104 - Electronic and Electrical engineering

Тема: «Применение распределённых акустических датчиков для обнаружения землетрясений через оптоволоконные линии связи»

Дипломная работа Каирболатова Даулета Армановича на тему «Применение распределённых акустических датчиков для обнаружения землетрясений через оптоволоконные линии связи» по образовательной программе 6B07104 – «Electronic and Electrical engineering» соответствует современным требованиям, является актуальной и обладает практической значимостью.

В дипломной работе рассматривается применение распределённых акустических датчиков (DAS) для обнаружения и локализации землетрясений с использованием оптоволоконных линий связи. В работе изложены принципы работы DAS, физикоматематическая модель распространения упругих волн, а также рассмотрены преимущества технологии по сравнению с традиционными сейсмостанциями. Студент сделал экспериментальное моделирование в средах MATLAB, Simulink и Python. В рамках экспериментов реализованы имитации прохождения сигнала вдоль волокна, визуализация фронта волны, добавление шумов и численная локализация эпицентра.

В процессе выполнения исследовательской работы Каирболатов Даулет 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 Каирболатов Даулет Арманович в процессе написания дипломной работы проявил способность к самостоятельной работе под руководством научного руководителя. Дипломная работа оценена на «95/А/отлично», и Каирболатов Даулет Арманович рекомендован к присвоению академической степени бакалавра техники и технологий по образовательной программе 6B07104 «Electrical and Electronic Engineering».

Научный руководитель Стариний преподаватель каф. ЭТиКТ, Лагистр технических наук Төлен Г.Б. 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 танысканын мәлімлейлі:

Автор: Каирболатов Даулет Арманович

### Тақырыбы: Применение распределённых акустических датчиков для обнаружения землетрясений через оптоволоконные линии связи»

Жетекшісі: Ерлан Таштай

1-ұқсастық коэффициенті (30): 4.6

2-ұқсастық коэффициенті (5): 1

Дәйексөз (35): 2.7

Әріптерді ауыстыру: 2

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 жүмысты 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.

Негізлеме:

2025-05-20

Күні

Кафедра меңгерушісі

#### Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Каирболатов Даулет Арманович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

**Название работы:** Применение распределённых акустических датчиков для обнаружения землетрясений через оптоволоконные линии связи»

Научный руководитель: Ерлан Таштай

Коэффициент Подобия 1: 4.6

Коэффициент Подобия 2: 1

Микропробелы: 1

Знаки из здругих алфавитов: 2

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:

2025-05-20

Дата

Josef

Заведующий кафедрой

#### Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Каирболатов Даулет Арманович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

**Название работы:** Применение распределённых акустических датчиков для обнаружения землетрясений через оптоволоконные линии связи»

Научный руководитель: Ерлан Таштай

Коэффициент Подобия 1: 4.6

Коэффициент Подобия 2: 1

Микропробелы: 1

Знаки из здругих алфавитов: 2

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:

2025-05-20

Дата

ON .

Сұңғат Марксұлы

проверяющий эксперт